

Pedro J. Torres Vega

# Simulación de sistemas

*con el software Arena*



UNIVERSIDAD DE LIMA



FONDO EDITORIAL



## Simulación de sistemas con el software Arena

---

Pedro J. Torres Vega



Pedro J. Torres Vega

# Simulación de sistemas

*con el software Arena*



FONDO EDITORIAL

---



Colección Textos Universitarios  
*Simulación de sistemas con el software Arena*  
Primera edición digital, marzo 2016

© Universidad de Lima  
Fondo Editorial  
Av. Manuel Olgún 125, Urb. Los Granados, Lima 33  
Apartado postal 852, Lima 100, Perú  
Teléfono: 437-6767, anexo 30131. Fax: 435-3396  
fondoeditorial@ulima.edu.pe  
www.ulima.edu.pe

Edición, diseño y carátula: Fondo Editorial de la Universidad de Lima

Versión ebook 2016  
Digitalizado y distribuido por Saxo.com Peru S.A.C.

**saxo**

www.saxo.com/es  
yopublico.saxo.com  
Teléfono: 51-1-221-9998  
Dirección: calle Dos de Mayo 534, Of. 304, Miraflores  
Lima - Perú

Se prohíbe la reproducción total o parcial de este libro sin permiso expreso del Fondo Editorial.

ISBN versión electrónica: 978-9972-45-321-2

## ÍNDICE

Presentación a la segunda edición	13
Prólogo a la primera edición	15
Presentación a la primera edición	17
<b>CAPÍTULO 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS</b>	<b>19</b>
1. ASPECTOS GENERALES	21
1.1 Sistema	21
1.2 Relación entre proceso y sistema	21
1.2.1 Proceso	21
1.2.2 Sistema	22
1.3 Elementos de un sistema	22
1.3.1 Entidades	22
1.3.2 Actividades	22
1.3.3 Recursos	23
1.3.4 Controles	23
1.4 Complejidad de un sistema	24
1.4.1 Interdependencia	24
1.4.2 Variabilidad	24
1.5 Modelo	24
2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS	25
2.1 Algunas aplicaciones de la simulación en la industria	26
2.2 Características de la simulación	26
2.3 Tipos de simulación según su naturaleza	27
2.3.1 Simulación basada en el avance del tiempo	27
2.3.2 Simulación basada en el uso de variables aleatorias	28
2.3.3 Simulación basada en la continuidad de la ocurrencia de los eventos	29
3. MODELOS ANALÍTICOS VERSUS MODELOS DE SIMULACIÓN	33
3.1 Modelos analíticos	33
3.2 Modelos de simulación	33
4. FASES DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN	34
4.1 Definir el problema, los objetivos y los requerimientos	35
4.2 Diseño del modelo conceptual	35
4.3 Obtención y análisis estadístico de los datos	36
4.4 Construcción del modelo de simulación	37
4.5 Verificación del modelo	38
4.6 Validación del modelo	38
4.7 Experimento de simulación, ejecución y análisis estadístico	39
4.8 Entrega de documentación y presentación de resultados	41
5. GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS	41
6. VARIABLES ALEATORIAS	43
7. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD	44

8.	SIMULACIÓN DE SISTEMAS POR EVENTOS Y POR PROCESOS	46
8.1	Simulación por eventos	46
8.2	Simulación por procesos	46
8.2.1	Evento programado en el tiempo	47
8.2.2	Evento condicional	48
9.	RELOJ DE LA SIMULACIÓN	48
10.	VARIABLES DEL SISTEMA	49
10.1	Variables de decisión	49
10.2	Variables de respuesta	49
10.3	Variables de estado	50
11.	ELEMENTOS ABSTRACTOS DEL SISTEMA	50
11.1	Entidades	50
11.2	Recursos	51
11.3	Atributos	52
11.4	Variables globales	54
	Caso de estudio N°1: Simulación manual por eventos	55
	Caso de estudio N°2: Expendio de gasolina en estación de servicios	62
	Caso de estudio N°3: Módulos de atención organizados en secuencia	64
	Caso de estudio N°4: Partido de básquet en el coliseo	66
	Caso de estudio N°5: Proceso de transformación de lotes de materia prima	68
	Caso de estudio N°6: Turismo vivencial por el río Amazonas	70
	Caso de estudio N°7: Proceso de acabado en línea de producción	72
	Caso de estudio N°8: Estación de servicio para venta de combustible	74
	Final de capítulo: Casos propuestos	76
	<b>CAPÍTULO 2: MODELADO DE SISTEMAS DISCRETOS POR PROCESOS – MÓDULOS BÁSICOS</b>	<b>79</b>
1.	MÓDULO CREATE	81
2.	MÓDULO PROCESS	82
3.	MÓDULO ASSIGN	85
4.	MÓDULO DISPOSE	87
5.	PARÁMETROS PARA EJECUTAR EL MODELO	88
5.1	Duración de la simulación	88
5.1.1	Estado transitorio	88
5.1.2	Estado estable	89
5.2	Configuración del experimento de simulación en Arena	89
	Caso de estudio 1: Tramitación en embajada	91
6.	MÓDULO DECIDE	96
7.	MÓDULO RECORD	99
	Caso de estudio 2: Estaciones de servicio en paralelo	102
	Caso de estudio 3: Estaciones de trabajo en serie	106
	Caso de estudio 4: Línea de producción con estaciones de inspección y ajuste	108
	Caso de estudio 5: Secuencia de operaciones de un proceso	110
	Caso de estudio 6: Evaluación de créditos hipotecarios	112
	Caso de estudio 7: De compras	116



8. MÓDULO DE DATOS: CONJUNTO DE RECURSOS	118
8.1 Criterios de selección de recursos	118
Caso de estudio 8: Control de ingreso de pasajeros en el aeropuerto	126
Caso de estudio 9: Atención a alumnos en asesoría	129
9. MÓDULO DE DATOS EXPRESSION (ESTRUCTURA DE DATOS)	131
Caso de estudio 10: Atención de clientes en un banco	135
10. REASIGNACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UN RECURSO	140
Caso de estudio 11: Programación de operarios según Schedule	142
Caso de estudio 12: Funcionamiento de una agencia bancaria	146
11. MODELADO DE ENSAMBLES	148
11.1 Módulo BATCH	149
11.1.1 Atributos de la nueva entidad	149
11.1.2 Reglas de agrupamiento	151
11.2 Módulo SEPARATE	152
11.2.1 Función Separador	152
11.2.2 Función Clonador	153
Caso de estudio 13: Lavado de piezas colocadas en racks	154
Caso de estudio 14: Ensamble del producto Triple X	156
Caso de estudio 15: Ensamblaje, prueba y embalaje de componentes electrónicos	159
12. FUNCIONES INDIVIDUALIZADAS DE UN PROCESO	164
12.1 Módulo SEIZE	165
12.2 Módulo DELAY	165
12.3 Módulo RELEASE	166
Caso de estudio 16: Arreglo de fallas en circuitos integrados	168
Caso de estudio 17: Secuencia de operaciones de un proceso	171
13. ACUMULADORES AUTOMÁTICOS	173
13.1 Módulo STORE	173
13.2 Módulo UNSTORE	173
Caso de estudio 18: Funcionamiento de una central de llamadas	175
14. MODELO BÁSICO DE INVENTARIOS	179
14.1 Indicadores de desempeño	179
14.2 Variables de recursos	180
14.3 Sistema de control de inventarios y venta con entrega diferida	183
Caso de estudio 19: Control de almacenes y distribución de cajas de aceite	184
Caso de estudio 20: Examen de "Simula"	188
Caso de estudio 21: Sistema rápido de transporte en corredor segregado	190
Final de capítulo: Casos propuestos	192
<b>CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS PARA EL MODELO</b>	<b>207</b>
1. ASPECTOS IMPORTANTES EN LA ETAPA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	209
1.1 Identificar los requerimientos de los datos	209
1.2 Identificar las relaciones causa-efecto	209
1.3 Recolección de datos en forma sistemática	210
1.4 Usar fuentes de datos apropiadas	211
1.5 Preparar una lista de supuestos	212

1.6	Convertir los datos en una forma utilizable en el modelo	212
1.7	Documentación de los datos	212
2.	AJUSTE DE LOS DATOS MUESTRALES A DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD TEÓRICAS POBLACIONALES	213
2.1	Distribuciones de probabilidad	213
2.1.1	Distribuciones teóricas y empíricas	213
2.1.2	Clasificación de las distribuciones teóricas	214
2.1.3	Distribución uniforme (continua)	216
2.1.4	Distribución exponencial (continua)	216
2.1.5	Distribución binomial (discreta)	217
2.1.6	Distribución normal (continua)	217
2.1.7	Distribución Poisson (discreta)	218
2.1.8	Distribución Beta (continua)	219
3.	PROCESO DE AJUSTE DE DATOS A UNA DISTRIBUCIÓN	220
3.1	Metodología	220
3.1.1	Análisis de la estadística descriptiva	220
3.1.2	Análisis de independencia o aleatoriedad	221
3.1.3	Prueba de bondad de ajuste	222
3.1.4	Ajuste de una distribución de probabilidad	222
4.	ANÁLISIS DE DATOS EN ARENA: INPUT ANALYZER	223
5.	ESCENARIO DE INCERTIDUMBRE TOTAL	228
5.1	Método Delphi	229
5.1.1	¿Cuándo se aplica?	229
5.1.2	Desventajas	229
5.1.3	Ventajas	230
5.1.4	¿A quiénes se puede considerar expertos?	230
	Caso de estudio 1: Ajuste de datos a distribuciones de probabilidad	231
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN</b>		235
1.	CONDICIONES DE INICIO Y FIN DE LA SIMULACIÓN	238
1.1	Simulación de estado transitorio	238
1.2	Simulación de estado estable	240
2.	ESPECIFICACIÓN DE ESTADÍSTICAS	243
2.1	Estadísticas por observaciones	243
2.2	Estadísticas dependientes del tiempo	244
2.3	Otras medidas particulares	244
3.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS	245
3.1	Muestras preliminares (n)	245
3.2	Determinación del número de réplicas (N)	245
3.3	Intervalos de confianza para $\mu$	246
3.3.1	Factor de precisión	246
3.4	Teorema del Límite Central	246
4.	TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VARIANZA	255
4.1	Técnica de Secuencias Comunes	257
4.2	Técnica de Secuencias Antitéticas	257

5. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	258
5.1 Comparación de medias usando muestras relacionadas	258
5.2 Comparación de medias usando muestras independientes	260
6. PRUEBA DE NORMALIDAD	261
7. EJECUCIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	265
7.1 Configuración del experimento de simulación en Arena	265
7.2 Análisis de los resultados en Arena	265
7.3 Output Analyzer	266
7.3.1 Determinación del intervalo de confianza para $\mu$	266
7.3.2 Comparación de escenarios	267
7.3.3 Cálculo de probabilidades	268
7.3.4 Comparación de escenarios: Muestras independientes	268
Caso de estudio 1: Comparación de escenarios	269
Caso de estudio 2: PERT versus simulación de la duración de un proyecto	273
Caso de estudio 3: Control de inventarios y venta con entrega diferida	276
Caso de estudio 4: Simulación del tráfico en una vía expresa	282
Final del capítulo: Caso propuesto	309
<b>CAPÍTULO 5: MODELADO DE SISTEMAS DISCRETOS POR PROCESOS - MÓDULOS AVANZADOS</b>	313
1. MÓDULO MATCH (continuación de ensambles)	315
1.1 Juntar, con base en cualquier entidad: <i>Any entities</i>	316
1.2 Juntar, con base en base de un atributo: <i>Based on attribute</i>	317
Caso de estudio 1: Lavandería "Blanquita"	318
Caso de estudio 2: Manufactura de ropa a pedido	321
2. MÓDULO HOLD (retención de entidades en cola)	325
3. MÓDULO SIGNAL (emisión de señales)	327
4. MÓDULO SEARCH (búsqueda de entidades en cola)	328
5. MÓDULO REMOVE (extracción de entidades de cola)	329
Caso de estudio 3: Duración de una actividad dependiente de condición	330
Caso de estudio 4: Análisis de tráfico por una sola vía	333
Caso de estudio 5: Transacciones en un cajero automático	336
Caso de estudio 6: Sala de reposo en una clínica	338
Caso de estudio 7: Almacenes "Mundo"	340
Caso de estudio 8: Atención de clientes en un supermercado	342
Caso de estudio 9: Venta de entradas en la Copa América 2007	344
Caso de estudio 10: Partido de definición del campeón nacional	346
6. MÓDULO PICKUP (entidad grupo)	348
7. MÓDULO DROPOFF (entidad grupo)	349
Caso de estudio 11: El ascensor	351
Caso de estudio 12: Atención en consultorio médico	353

Caso de estudio 13: Operaciones en una manufacturera	356
Caso de estudio 14: Uso de recurso en secuencia de operaciones	358
Caso de estudio 15: Simulación de fallas en las máquinas	361
8. MÓDULO READWRITE (interfase de lectura y escritura externa)	363
Caso de estudio 16: Escritura de datos en archivo externo	365
Caso de estudio 17: Lectura de datos de un archivo externo	367
Final del capítulo: Casos propuestos	369
<b>CAPÍTULO 6: MODELADO DE SISTEMAS CONTINUOS Y COMBINADOS</b>	<b>377</b>
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	379
2. MODELADO DE PROCESOS DE FLUJO	383
2.1 Módulo TANK	383
2.2 Módulos SEIZE REGULATOR, FLOW y RELEASE REGULATOR	384
2.3 Módulo FLOW	384
2.4 Módulo SENSOR	386
2.5 Módulo REGULATE	387
Caso de estudio 1: Simulación de la variación del nivel del tanque	389
Caso de estudio 2: Venta de un líquido a granel	393
Caso de estudio 3: Funcionamiento de una moledora de maíz	395
Caso de estudio 4: Venta de combustible en grifo	398
Caso de estudio 5: Operación de un tanque alimentador de una refinería	402
Caso de estudio 6: Plan de aguas para vivienda	407
Caso de estudio 7: Llenado de una piscina	411
Caso de estudio 8: Sistema de abastecimiento a planta industrial	414
Caso de estudio 9: Campaña de Navidad	416
Caso de estudio 10: Sistema de suministro de agua en edificio	418
Caso de estudio 11: Control de calidad en línea de producción	422
Caso de estudio 12: Empresa envasadora de GLP	424
Caso de estudio 13: Estación de llenado de bidones de agua	427
Final de capítulo: Casos propuestos	431
<b>ANEXOS</b>	<b>439</b>
Anexo 1: Modelo teórico de colas	441
Anexo 2: Principales funciones y variables en Arena	449
Anexo 3: Tablas estadísticas	454
Anexo 4: Redes de Petri	456
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>465</b>

## **PRESENTACIÓN A LA SEGUNDA EDICIÓN**

A tres años de ser presentada la primera edición de este libro, es muy satisfactorio para el autor abordar la tarea de escribir una breve presentación para la segunda edición, en la que se incluyen nuevos temas y se profundizan otros, con lo cual se complementa la edición original. También se han corregido todas las erratas detectadas después de la primera publicación, manteniendo la misma pulcritud y presentación didáctica.

Al incluir algunos temas y profundizar otros, se ha procurado enriquecer el contenido del libro. En particular se señalan las siguientes inclusiones: en el capítulo 1 se ha profundizado el tema de simulación por eventos mediante la presentación y desarrollo de nuevas situaciones; con referencia a este tema, se ha incluido el anexo 4 sobre las redes de Petri, que nos permiten representar el modelo conceptual sobre la dinámica de los eventos que ocurren en un sistema. En el capítulo 4 se ha profundizado en el análisis estadístico de los resultados del experimento de simulación, mediante la inclusión de un artículo publicado por el autor en la revista *Ingeniería Industrial*, de la Universidad de Lima, en el que se exponen con detalle los principales aspectos que deben ser considerados en dicho análisis para tomar decisiones con un cierto nivel de confiabilidad. Se han incrementado casos de estudio resueltos y propuestos acerca de nuevas situaciones planteadas en la simulación de procesos involucrados en la producción de bienes, en la logística y en los servicios.

Actualizar una obra cualquiera publicada en el ámbito científico o técnico puede ser una labor de incorporación de un sinnúmero de teorías y experiencias en continua evolución; sin embargo, en este libro se ha procurado no perder de vista su objetivo fundamental, que ha sido y sigue siendo la elaboración de un texto sobre los conceptos fundamentales de la simulación y su aplicación práctica en casos de estudio en la gestión del ingeniero industrial y afines, en el siempre prometedor y fascinante campo de la simulación de sistemas.

He dejado para el final algo muy especial para mí: dedicar este libro a mi esposa Lida, quien es la fuente inspiradora de mi trabajo.

*Pedro J. Torres Vega*



## PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN

Los profesionales conocedores de simulación encuentran inconcebible que, en nuestros días, el diseño, la construcción o la modificación de un sistema no sea acompañado por un análisis de simulación que permita tomar las correspondientes decisiones con los criterios adecuados. Si gracias a un estudio de este tipo se puede predecir el comportamiento de cualquier sistema por más complejo que sea, qué sentido tiene que se tomen riesgos innecesarios, se aumenten costos y se haga mal uso de recursos siempre escasos, simplemente por desconocer los beneficios de la simulación. Incontables son los ejemplos en el mundo que muestran el impacto de la simulación en la productividad de sistemas de todo ámbito. Son miles los trabajos de aplicación que anualmente se presentan en la "Winter Simulation Conference", por nombrar una de las conferencias más populares de la especialidad. No existe área del conocimiento que no haya recibido alguna aplicación exitosa de simulación.

Estas ventajas se logran gracias a que con la simulación se puede replicar el funcionamiento de cualquier sistema. La incertidumbre y la aleatoriedad presentes en la mayoría de sistemas reales son fácilmente incorporadas por esta técnica. Con un buen trabajo de validación se puede probar que el comportamiento de los modelos en la computadora son fiel reflejo de realidades concretas. Una línea de fabricación, un proceso de servicio público, una empresa completa son ejemplos que se pueden ver funcionando dentro de una computadora, mediante el uso de la simulación.

Debido a la popularización de computadoras de gran potencia la simulación está cada vez al alcance de más personas, que no siempre cuentan con un conocimiento adecuado. El mal uso ha ido de la mano con la popularización. Libros como el que ahora presento tienen como objetivo evitar ese peligro. Con lenguaje sencillo y multiplicidad de ejemplos, cubre distintos aspectos tanto de modelación como de análisis necesarios para efectuar una aplicación eficiente y correcta de simulación. Áreas tan populares como la modelación de procesos de negocios incluyen actualmente en sus herramientas la potencia de la simulación. El peligro está en que un usuario que desconozca los conceptos de simulación haga uso de dicha potencia y pueda obtener resultados errados que hagan peligrar el prestigio de la técnica.

Se ha elegido Arena (Rockwell Automation, Inc.) como el lenguaje de simulación, por ser el lenguaje más usado actualmente en el mundo profesional y académico. Existen varios lenguajes y podrán salir otros nuevos, pero los conceptos revisados y las aplicaciones mostradas seguirán vigentes.

Hace varios años la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Lima decidió que la enseñanza de simulación es vital en la formación de sus egresados de las facultades de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Sistemas. Este libro contribuye directamente con ese objetivo. Es indudable que el aprendizaje de simulación tiene dificultades reconocidas por todos los académicos, principalmente por la necesidad de modelar

sistemas sujetos a incertidumbre, pero seguiremos buscando las mejores formas de facilitar este aprendizaje, por eso bienvenidos sean esfuerzos como el de esta obra.

El ingeniero Torres Vega, autor de este libro, cuenta con una amplia experiencia académica en esta materia, que generosamente ha volcado en beneficio de los futuros lectores. No nos resta sino felicitarlo, agradecerle y alentarlo para que siga con este propósito.

*Julio Padilla Solís*



## PRESENTACIÓN A LA PRIMERA EDICIÓN

La simulación de sistemas es una disciplina que intenta representar en un modelo estocástico el comportamiento real de un sistema, con toda la complejidad de sus relaciones, que involucran incertidumbre, mediante la generación de eventos aleatorios que ocurren de manera natural y dinámica en todos los procesos.

Esta técnica de simulación estadística hace posible investigar los procesos por medio de un análisis operacional, evaluar los indicadores de desempeño del sistema actual, pronosticar su comportamiento y plantear posibles escenarios futuros. Hoy en día es necesario que las empresas aprovechen las herramientas que brinda la tecnología para adelantarse a los resultados y así minimizar el riesgo durante el proceso de toma de decisiones.

La simulación permite la medición de indicadores de desempeño propios de la gestión de los recursos disponibles, así como indicadores asociados con los niveles de calidad de servicio al cliente, por ejemplo la reducción del tiempo de espera en colas o de su permanencia en el sistema. Este proceso se realiza con el soporte de hardware y de software, creándose un escenario virtual o laboratorio de experimentación que opera de manera controlada sin tener que alterar el proceso ni arriesgar la operación real.

El énfasis de esta obra se centra en la aplicación práctica de los conceptos de simulación mediante el modelado de sistemas. El libro ha sido escrito en una secuencia lógica de temas, tomando como base el sílabo del curso de Simulación de Sistemas de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Lima. Fue elaborado utilizando el material didáctico preparado por el autor para el dictado de dicho curso, enriqueciéndolo con la experiencia académica. Así mismo, se presentan diversos casos de estudio con su correspondiente modelo de simulación y los reportes de resultados. Algunos de los enunciados de estos casos fueron obtenidos de prácticas y exámenes propuestos en la Escuela de Ingeniería de nuestra Universidad. Para la simulación de los casos se ha utilizado el software Arena, que permite el modelado de sistemas discretos por procesos, así como de sistemas de procesos de flujo, para la representación de un sistema real.

El presente libro está dirigido especialmente a los estudiantes universitarios de las carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería de Sistemas, Investigación Operativa y Administración de Negocios, así como a personas comprometidas con proyectos de mejora continua, innovación, reingeniería, optimización de procesos, ISO9000, Six Sigma, entre otros. El propósito de la presente obra es profundizar en el arte de la ingeniería y enriquecer la formación del estudiante universitario.

*Pedro J. Torres Vega*

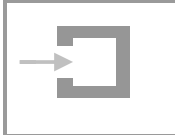


# Capítulo 1

## Conceptos fundamentales de la simulación de sistemas

- Aspectos generales
- Simulación de sistemas
- Modelos analíticos versus modelos de simulación
- Fases de un proyecto de simulación
- Generación de números aleatorios
- Variables aleatorias
- Distribución de probabilidad
- Simulación de sistemas por eventos y por procesos
- Reloj de simulación
- Variables del sistema
- Elementos abstractos del sistema

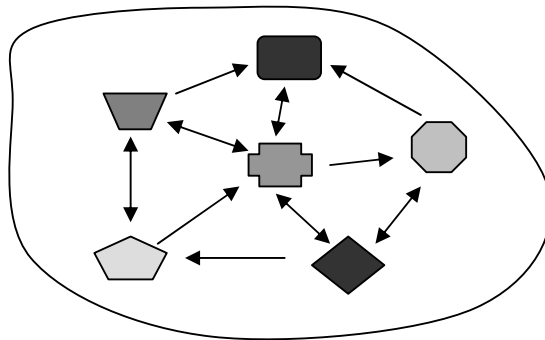
En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales en los que se apoyan las técnicas de simulación. El modelado de sistemas requiere de capacidades o habilidades analíticas, estadísticas, organizacionales y de ingeniería; sin embargo, la simulación es mucho más que la construcción de un modelo y su ejecución. Como cualquier proyecto, necesita planeamiento, coordinación y entendimiento de los requerimientos de cada una de las tareas involucradas; asimismo, se presenta una secuencia de etapas de cómo conducir un proyecto de simulación.



## 1. ASPECTOS GENERALES<sup>1</sup>

### 1.1 Sistema

Es una colección de elementos organizados que interactúan juntos hacia el logro de un objetivo común. Se circunscribe a un sector de la realidad que es el objeto de estudio o interés.



#### *Ejemplos:*

- El sistema de manufactura de un producto, en el cual trabajadores y máquinas convierten las materias primas en productos terminados.
- El sistema de servicio de atención en un supermercado, en el cual los clientes ingresan, escogen sus productos y finalmente forman una cola para realizar el pago.
- El sistema de servicio de emergencia de una clínica, en el cual las enfermeras, los médicos y los laboratorios son empleados para la atención de los pacientes que han ingresado al establecimiento.

### 1.2 Relación entre proceso y sistema

#### 1.2.1 Proceso

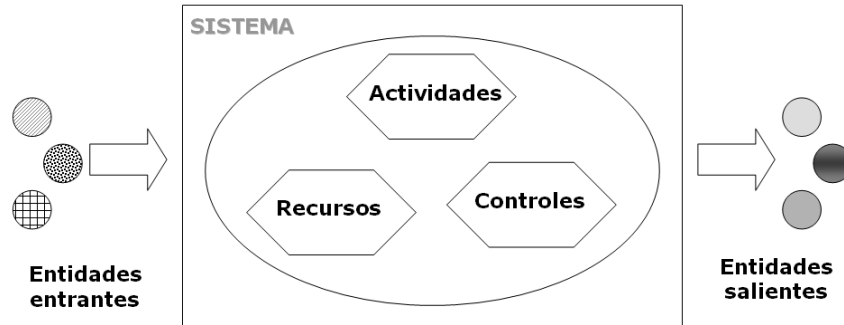
Es un conjunto de operaciones, actividades o tareas que crean una salida (*output*), con base en una o más entradas (*input*).

<sup>1</sup> Basado en HARRELL, CH.; GHOSH, B. K. y R. BOWDEN. *Simulation using Promodel*, 2000.

### 1.2.2 Sistema

Es un conjunto de elementos usados para ejecutar un proceso, para lo cual requiere, además, recursos y controles. Así, un sistema comprende un proceso, pero también incluye los recursos y los controles para poder realizar el proceso.

En el diseño de procesos el enfoque está dado en el *qué* está siendo ejecutado en el sistema. En el diseño de sistemas el énfasis está dado en los detalles del *cómo*, el *dónde* y el *cuándo* son ejecutados los procesos.



## 1.3 Elementos de un sistema

### 1.3.1 Entidades

Son los ítems que transitan por el sistema para ser procesados o recibir un servicio. Las entidades se pueden caracterizar por el costo, el orden, la prioridad, el estatus, entre otros factores.

Se clasifican en tres tipos:

- Humanos o animados: clientes de un supermercado, pacientes de una clínica.
- Inanimados: productos, piezas, documentos.
- Intangibles: llamadas telefónicas, correos electrónicos, proyectos.

### 1.3.2 Actividades

Son las tareas que se realizan en un sistema; pueden estar involucradas directa o indirectamente en el procesamiento de las entidades. Las actividades tienen una duración y por lo general involucran el uso de recursos. Se pueden clasificar en:

- Proceso de entidades: corte de una pieza, servicio a clientes.
- Movimiento de entidades y de recursos: transporte en un elevador.
- Ajuste, mantenimiento y reparación de recursos: configurar una máquina.

### 1.3.3 Recursos

Son los medios para poder ejecutar las actividades. Proveen el soporte de máquinas, equipos, personal y facilidades en general, para llevar a cabo las actividades.

Pueden ser:

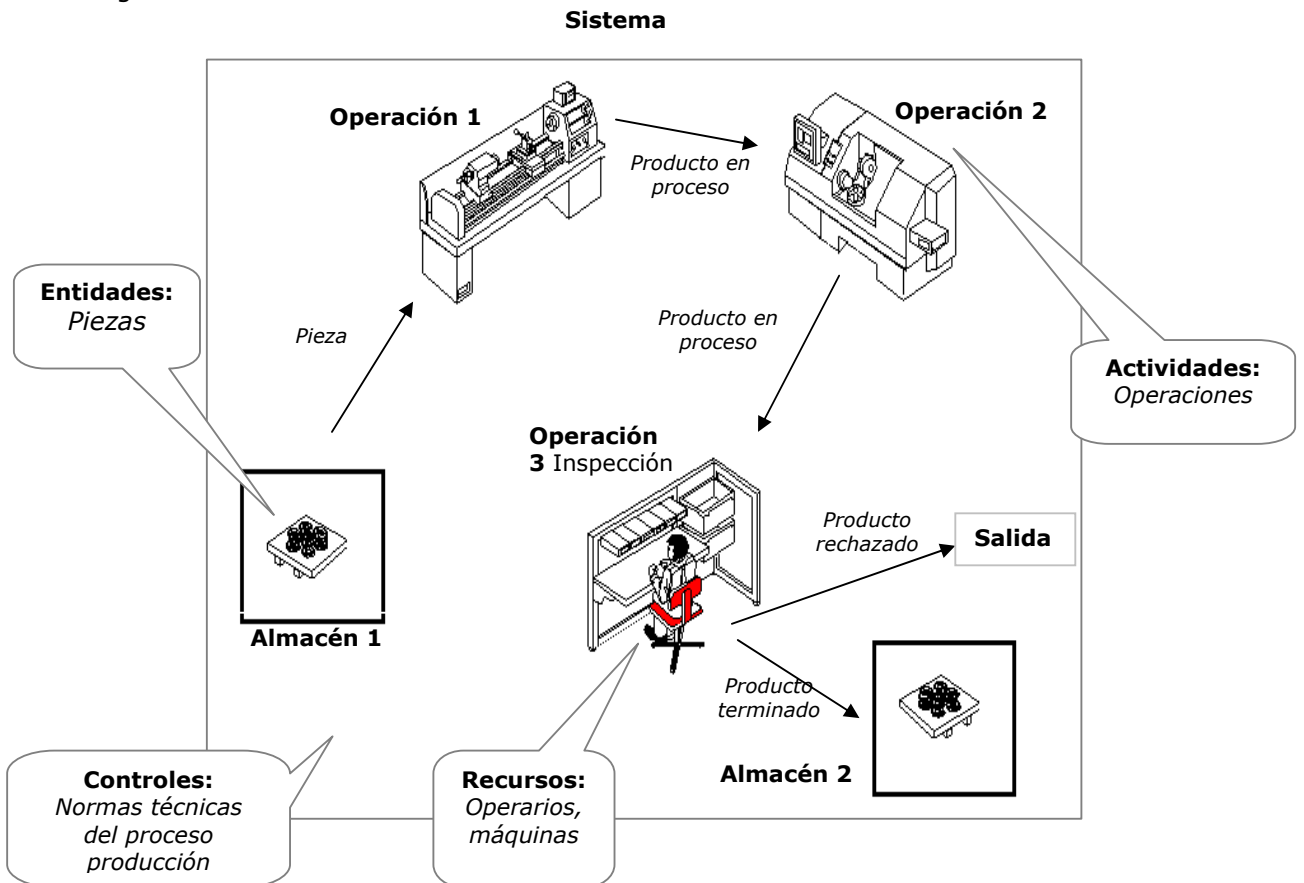
- Humanos o animados: operadores, personal de mantenimiento.
- Inanimados: equipos, herramientas, dinero, espacio de almacenamiento.
- Intangibles: información, tiempo, energía eléctrica.

### 1.3.4 Controles

Los controles gobiernan *cómo*, *cuándo* y *dónde* son ejecutadas las actividades; también determinan las acciones que se deben tomar cuando cierto evento o condición ocurre.

*Ejemplos:*

- Inicio y fin de la ejecución de las actividades.
- Priorización y secuenciación de actividades.
- Programas de producción.
- Programas de mantenimiento.



## **1.4 Complejidad de un sistema**

Un sistema se hace complejo básicamente por el número y tipos de entidades, actividades, recursos y controles que lo componen; de tal forma que el sistema se hace difícil de analizar. Esta complejidad es función de dos factores:

### **1.4.1 Interdependencia**

Cada elemento del sistema afecta a otros elementos.

*Ejemplo:*

Cuando se produce un tiempo muerto en una máquina debido a una falla, entonces el personal de mantenimiento se pone en acción para repararla.

### **1.4.2 Variabilidad**

Existe variabilidad en el comportamiento de los elementos del sistema, la que produce incertidumbre. La variabilidad es inherente a cualquier sistema comprendido por personas o máquinas.

*Ejemplos:*

- La incertidumbre en las entregas de los proveedores.
- El comportamiento aleatorio en las fallas en los equipos.
- Ausentismo impredecible de los obreros.
- Fluctuaciones en la demanda.

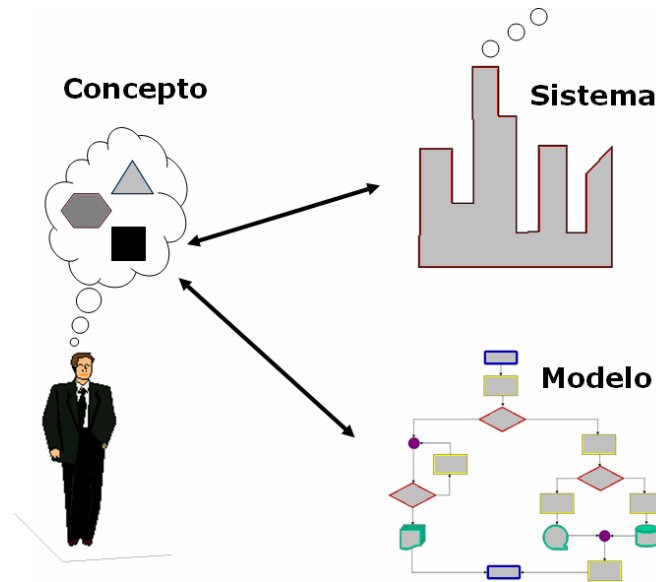
Todos estos ejemplos se combinan y generan estragos en las operaciones de planeamiento de los sistemas.

## **1.5 Modelo**

Desde la perspectiva de un sistema, un modelo podría definirse como una representación simplificada del sistema y sus relaciones, tales como relaciones causa-efecto, relaciones de flujo y relaciones del espacio. El propósito del modelado de sistemas es entender, predecir, controlar y mejorar el comportamiento o desempeño del sistema. El modelado de sistemas es arte y ha sido ejercido por el hombre durante siglos, la historia nos da muchos ejemplos de ello.

El proceso de modelado comienza con el estudio y análisis del actual sistema, con el propósito de desarrollar un concepto de cómo trabaja el sistema nuevo o el ya existente. Este concepto es traducido en el modelo que es utilizado para evaluar dicho concepto.





Los modelos han sido clasificados de muchas maneras; sin embargo, podemos mencionar algunos tipos como los denominados modelos *simbólicos* representados por los diagramas de flujo, los modelos *analíticos* o fórmulas matemáticas que producen resultados cuantitativos, y los modelos de simulación capaces de reproducir el mismo comportamiento que ocurre en el sistema actual. Un modelo de simulación debería ser visto esencialmente como una herramienta “Qué pasa si”, que permite al diseñador experimentar con diseños alternativos y estrategias para ver el impacto que aquellas decisiones tienen en el sistema global.

## 2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS

Es el proceso de diseñar un modelo lógico-matemático de un sistema real y reproducir sus condiciones, su comportamiento operacional y dinámico, para estudiarlo y probarlo, con el objetivo de lograr un mayor grado de conocimiento en la toma de decisiones.

La simulación evalúa con precisión el desempeño de un sistema por complejo que este sea. Es evaluadora y no generadora de soluciones, es decir que no produce una solución óptima, sino, por el contrario, es una herramienta de evaluación que nos orienta hacia la mejor solución.

La simulación genera un escenario virtual en el que los cambios no cuestan como en la realidad. Permite validar si se está tomando la mejor decisión o no.

**Ejemplos:**

- Simular el comportamiento de un sistema para evaluar el efecto en los indicadores de desempeño por la inclusión de un servidor adicional en una estación de servicio.
- Evaluar cómo se afecta el tiempo de ciclo de producción, debido a los tiempos muertos (*downtimes*) por paradas de las máquinas durante el proceso de producción.

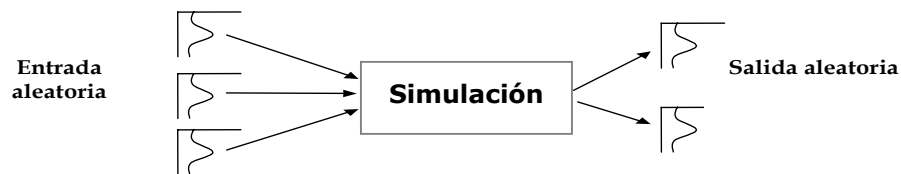
**2.1 Algunas aplicaciones de la simulación en la industria**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis y reducción del tiempo de ciclo</li> <li>• Secuenciación de las tareas</li> <li>• Análisis de cuellos de botella</li> <li>• Mejoramiento de la calidad</li> <li>• Reducción de costos</li> <li>• Reducción de inventarios</li> <li>• Mejoramiento de la productividad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición de planta</li> <li>• Simulación de sistemas MRP</li> <li>• Balance de líneas</li> <li>• Tamaño óptimo del lote</li> <li>• Planeamiento de la producción</li> <li>• Programación de los recursos</li> <li>• Programas de mantenimiento</li> <li>• Diseño de controles de sistemas</li> </ul>
--	--

La simulación al trabajar en un escenario virtual evita pérdidas de tiempo y no se interrumpe el funcionamiento del sistema actual ya que ambos sistemas pueden trabajar en paralelo. Es decir, todo lo contrario a las técnicas tradicionales de prueba y error.

**2.2 Características de la simulación**

- Capta la interdependencia que existe entre los elementos del sistema.
- Considera la variabilidad en el sistema.



- Es suficientemente versátil para modelar cualquier sistema.
- Muestra el comportamiento del sistema dinámico.
- Provee información estadística sobre múltiples indicadores de desempeño.
- Se ejecuta en tiempo comprimido, tiempo real o tiempo retardado.
- Los resultados son visuales y cuantitativos.

El ejercicio de modelar un sistema nos lleva a pensar en los detalles operacionales del proceso. Por lo general, existe una tendencia a ignorar los detalles de operación de un diseño o plan, hasta la fase de la implementación, cuando ya es demasiado tarde o irreversible para tomar decisiones que tengan un impacto significativo.

*Ejemplo:*

Suponga que se ha estudiado el comportamiento de fallas de una máquina. Se determinó que el tiempo entre fallas se ajusta a una distribución de probabilidad exponencial con una media de un mes.

En la vida real no se sabe cuándo va a fallar la máquina sino hasta que esto sucede. Por lo tanto, desde que registramos su comportamiento estadístico entre fallas se puede realizar una prueba de ajuste de datos, con el objetivo de generar variaciones *random* de la distribución (*de mejor ajuste*) y así poder estimar la próxima ocurrencia de falla.

Decir que una variable del modelo es aleatoria no significa que es indefinida o impredecible; por el contrario, el fenómeno que está siendo modelado tiende a variar estadísticamente. Estas variaciones estadísticas del fenómeno se pueden ajustar a predicciones probabilísticas.

## 2.3 Tipos de simulación (según su naturaleza)

### 2.3.1 Simulación basada en el avance del tiempo

- *Simulación estática*

El avance del tiempo no se considera en la simulación estática; es decir, es la representación del sistema en un instante específico del tiempo. A menudo involucra muestras aleatorias para generar reportes estadísticos, también se le llama simulación de Monte Carlo. En las finanzas se utiliza en la simulación de selección de cartera de inversiones.

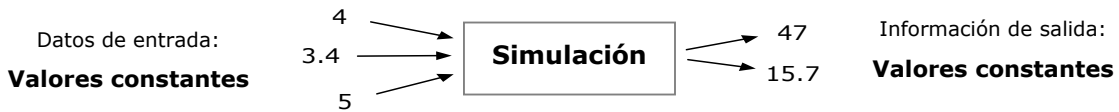
- *Simulación dinámica*

Incluye el paso del tiempo. Un mecanismo de reloj mueve el avance del tiempo y el estado de las variables del sistema son actualizadas. La simulación dinámica se ajusta para analizar los sistemas de manufactura y servicios, dado que ellos operan en el tiempo.

### 2.3.2 Simulación basada en el uso de variables aleatorias

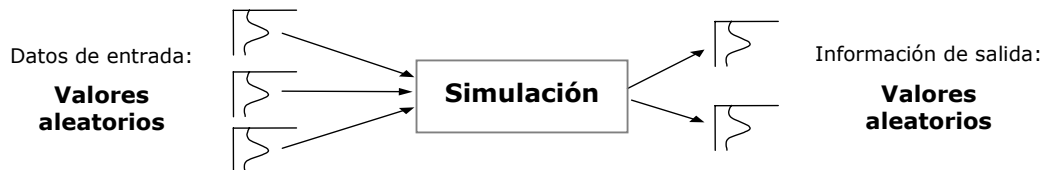
- *Simulación determinística*

Se denomina simulación determinística cuando los modelos tienen entradas y salidas (*inputs* y *outputs*) constantes. Estos son construidos de la misma manera que los probabilísticos o estocásticos, excepto que no poseen aleatoriedad. El resultado de una única corrida de simulación representa la medida exacta del desempeño del modelo.



- *Simulación estocástica o probabilística*

La simulación es estocástica o probabilística si los modelos se basan en una o más variables de entrada, cuya naturaleza es aleatoria. Un modelo estocástico tiene entradas aleatorias, entonces produce salidas aleatorias. En un modelo estocástico muchas réplicas de simulación (muestras) deben ser realizadas; entonces, el resultado es un promedio de las réplicas y provee solo un estimado del desempeño del modelo.



Decir que una variable del modelo es aleatoria no significa que es indefinida o impredecible; por el contrario, el fenómeno que está siendo modelado tiende a variar estadísticamente. Estas variaciones estadísticas del fenómeno se pueden ajustar a predicciones probabilísticas.

**Ejemplo:**  
 Suponga que se ha estudiado el comportamiento de fallas de una máquina y se determinó que el tiempo entre estas se ajusta a una distribución de probabilidad exponencial con una media de un mes.  
 En el mundo real no se sabe con precisión cuándo va a fallar la máquina hasta que sucede. Por lo tanto, desde que nosotros registramos su comportamiento estadístico entre fallas, se puede realizar una prueba de ajuste de datos, con el objetivo de generar variaciones *random* de la distribución (de mejor ajuste) y así poder estimar la próxima ocurrencia de falla.

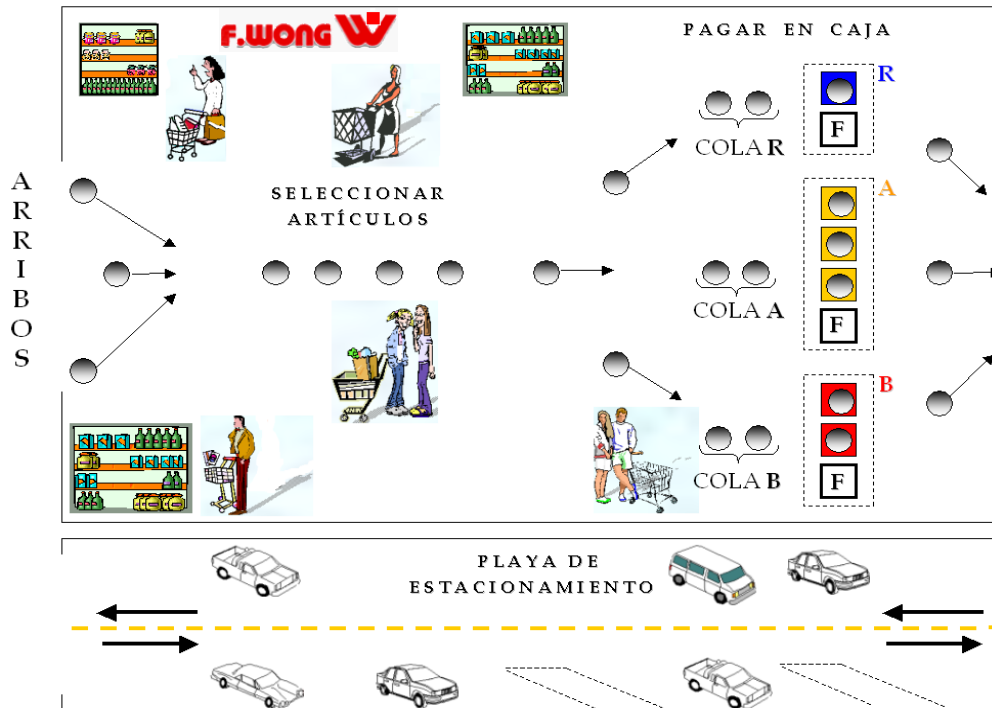
### 2.3.3 Simulación basada en la continuidad de la ocurrencia de los eventos

- *Simulación discreta*

Es aquella en la que los eventos se dan en puntos discretos del tiempo, con lo cual se actualizan los valores de las variables de estado del modelo en dichos puntos. Es decir, existe un intervalo de tiempo variable entre la ocurrencia de un evento y la del otro.

*Ejemplo:*

El arribo de clientes a un supermercado para realizar sus compras. Al ejecutar el modelo de simulación que representa esta situación, los eventos van sucediendo uno tras otro en el tiempo. Por ejemplo, el arribo de un cliente en un instante dado, la salida de caja de un cliente después de haber realizado el correspondiente pago, el ingreso de un cliente a la cola o las vueltas que da un auto en la playa de estacionamiento antes de encontrar un espacio disponible. Véase el esquema siguiente.

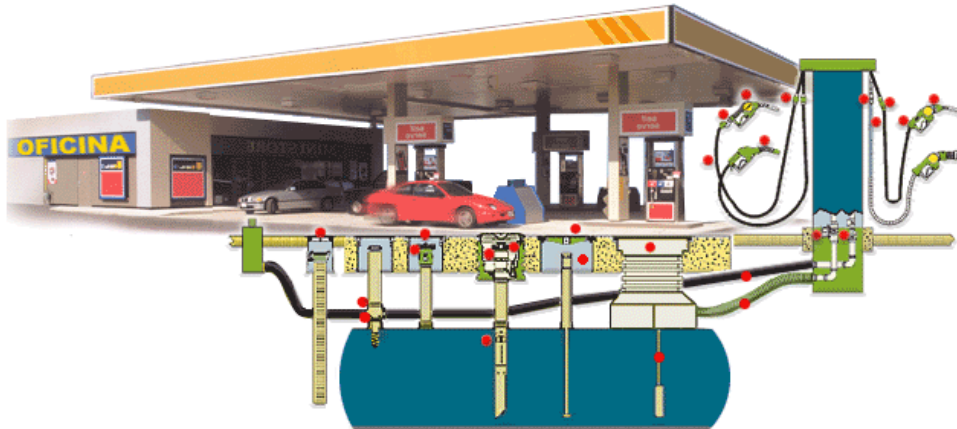


- *Simulación continua*

Es aquella en la que las variables de estado del modelo cambian continuamente respecto del tiempo. Es decir, el intervalo de tiempo entre la ocurrencia de un evento y otro se puede considerar infinitesimal.

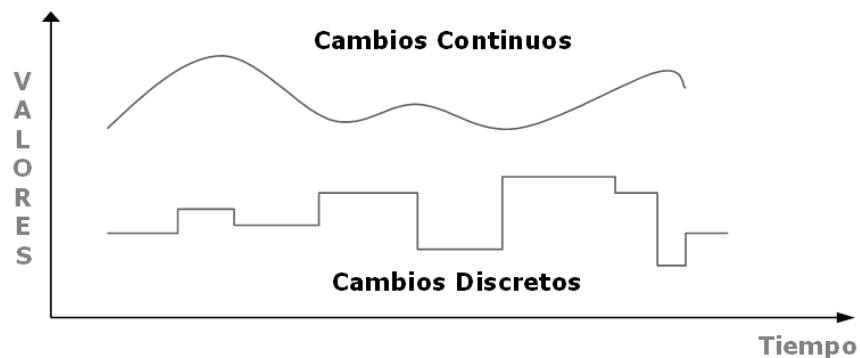
*Ejemplos:*

- La temperatura en el transcurso del día. La variable de estado toma diferentes valores en el tiempo, según la temperatura.
- El funcionamiento del tanque de gasolina de una estación de venta de combustible, que por medio de la máquina surtidora, transfiere un flujo hacia los tanques de los vehículos.



*¿Cuál es la diferencia entre variable discreta y variable continua?*

La diferencia está en la forma como cambian de valor. Las variables discretas cambian de valor con la ocurrencia de eventos en el sistema. Mientras no ocurra un evento sus valores permanecen constantes. En cambio, las variables continuas cambian con el simple avance del tiempo. Por ello, el valor de estas variables se rige por una ecuación en función del tiempo.

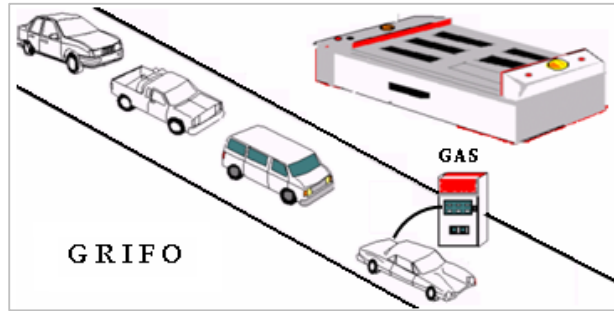


- *Combinación de eventos discretos y procesos continuos*

Llamada también simulación combinada, se da cuando en el sistema estudiado concurren ambos sistemas: discretos y continuos (sistemas híbridos).

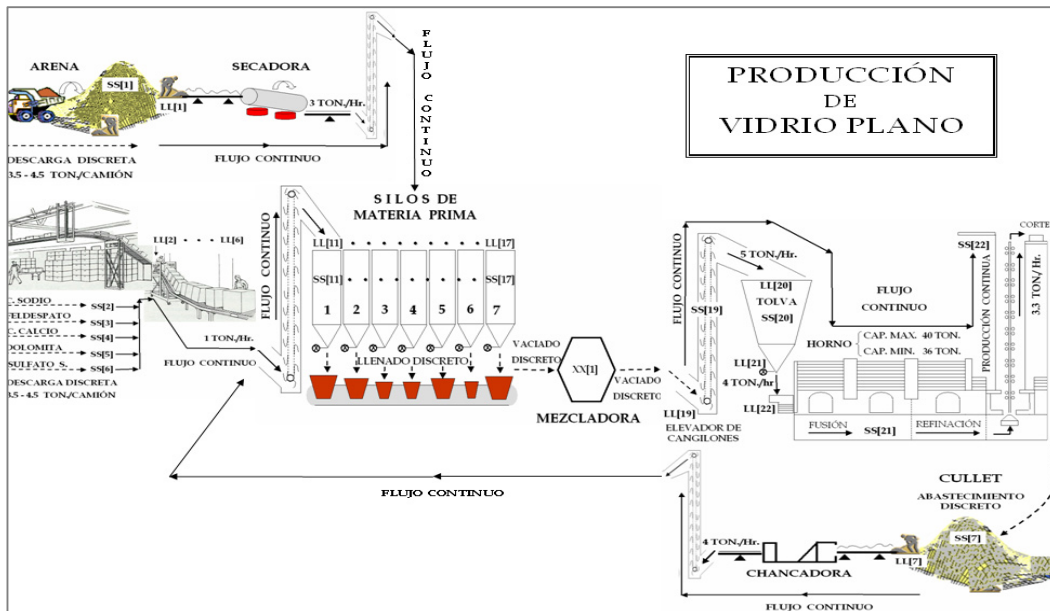
**Ejemplo:**

En una estación de venta de combustible los autos llegan al sistema en forma discreta, el abastecimiento de combustible al vehículo es un proceso continuo.



**Ejemplo:**

La producción de vidrio plano es otro ejemplo de simulación combinada. Los camiones llegan a la planta según un intervalo entre arribos (*modelo discreto por eventos*), para descargar la arena que contiene sílice, que es el componente principal del vidrio. Luego, por medio de fajas transportadoras y elevadores de cachos o "cangilones", todos los ingredientes son transportados a silos de almacenamiento (*modelo no discreto o continuo*). Existe otra parte del proceso que pertenece al modelo continuo que corresponde al abastecimiento de la mezcla o "batch" al horno de fusión. En el horno, esta mezcla se funde y desde allí la hoja de vidrio es jalada por medio de una serie de rodillos durante una distancia suficiente para que se enfríe por medio de ventiladores. En el extremo superior, operarios realizan el corte de la hoja, que luego se apila en un caballete. Observe que el tramo descrito es un proceso continuo, independientemente de la tecnología utilizada, es decir si el jalado de la hoja es vertical u horizontal.

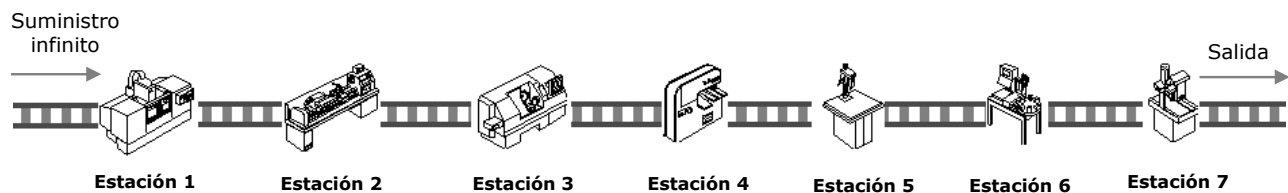


*Ejemplo:*

En el esquema siguiente se representa la producción continua de piezas metálicas. Las piezas avanzan por la línea por medio de *conveyors* o fajas transportadoras y son procesadas en cada estación.

Máquina	Ritmo de producción (unid/hr)	Capacidad de la faja (unid.)
1	2.500	5.000
2	3.160	600
3	1.216	5.120
4	5.850	4.520
5	1.500	3.450
6	2.800	4.120
7	3.660	-

El inicio se produce en la estación 1, a la que llegan las piezas en forma continua, de acuerdo con una tasa de 2.000 unidades por hora.



Por medio de la simulación de sistemas continuos podemos hacer un balance adecuado de la línea, experimentando cambios en el ritmo de producción.

Es posible modelar fenómenos continuos usando la lógica de eventos discretos, especialmente si un alto grado de precisión no es importante. Suponga que una sustancia fluye en forma continua, esta puede convertirse, para propósitos de simulación, en unidades discretas de medida tales como galones o libras. También es posible modelar eventos discretos usando la lógica de fenómenos continuos; en este caso, es deseable tratar los cambios discretos de las variables de estado como ocurrencias que se dan en intervalos de tiempo muy pequeños. Suponga que se realiza un cambio en el abastecimiento de unidades a una máquina empaquetadora, se pasa de un sistema en el que llegan en forma discreta con un tiempo entre arribos, a un sistema de abastecimiento infinito por medio de una faja transportadora, a razón de 200 unidades por hora.



## **3. MODELOS ANALÍTICOS VERSUS MODELOS DE SIMULACIÓN**

### **3.1 Modelos analíticos**

- Representan, por lo general, situaciones estáticas del problema; es decir, se asume que las condiciones son constantes en el tiempo durante el período de estudio. Ejemplo: las programaciones lineal y no lineal.
- Los resultados llevan a obtener una solución óptima para el problema y para lograr un solo objetivo, con lo cual se sacrifican otros objetivos secundarios. Ejemplo: la programación lineal.
- En los modelos analíticos no es posible considerar situaciones aleatorias que podrían ocurrir en un sistema; por lo tanto, el analista se ve forzado a usar tiempos promedios de proceso u otros indicadores que pueden producir resultados engañosos. Ejemplo: las técnicas PERT-CPM.
- Son incapaces de resolver problemas de gran aleatoriedad.

### **3.2 Modelos de simulación**

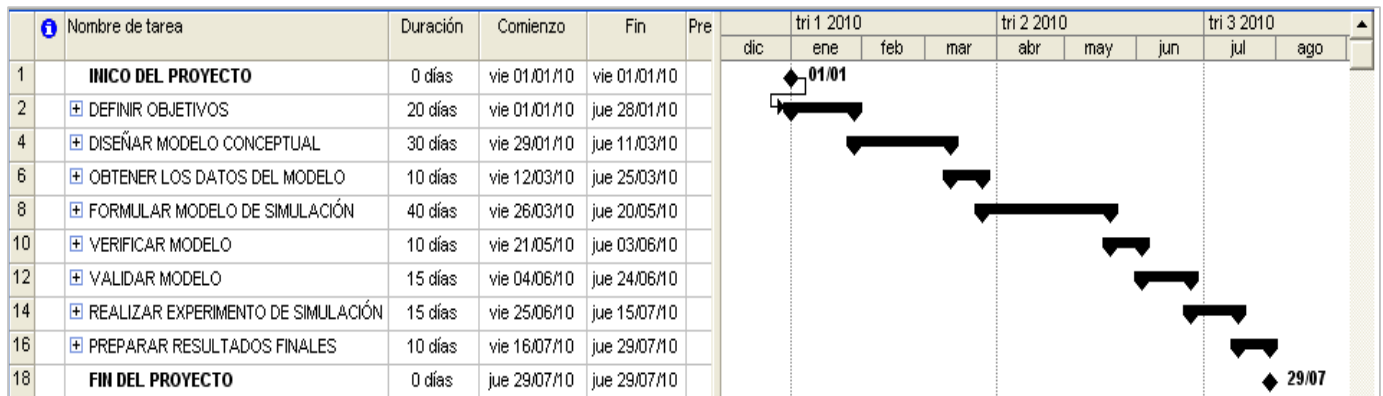
- Proporcionan una medida cuantitativa del desempeño del sistema, tal como el porcentaje de utilización de los recursos, o los tiempos de ciclo, etcétera. La simulación es una herramienta de evaluación de escenarios que permite al diseñador del experimento conocer qué alternativas de diseño y estrategias operativas tienen mayor impacto en el desempeño del sistema.
- Determinan cómo el sistema responde a cambios en su estructura y ambiente, o bajo ciertos supuestos.
- La simulación es usada para probar la efectividad de un sistema en particular. Pero por sí misma no resuelve un problema u optimiza un diseño. Ayuda a evaluar una solución pero no genera solución alguna. La solución solo puede ser conseguida a través de la experimentación, corriendo y comparando los resultados de las soluciones alternativas.
- A diferencia de los modelos analíticos, la simulación hace posible monitorear las más complejas fluctuaciones estadísticas e interdependencias en el sistema.
- Ayuda a eliminar las ineficiencias ocultas en un modelo analítico, que solo se detectan cuando el sistema está en operación; es decir, cuando es demasiado tarde.

## 4. FASES DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN<sup>2</sup>

La simulación es mucho más que la construcción del modelo y su ejecución. Como cualquier proyecto, requiere de planeamiento, coordinación y un entendimiento de los requerimientos de cada una de las tareas involucradas. El modelado de sistemas requiere de capacidades o habilidades analítica, estadística, organizacional y de ingeniería. El modelador debe ser capaz de entender el sistema que está siendo investigado y debe ordenar relaciones complejas causa-efecto. No hay reglas estrictas de cómo conducir un proyecto de simulación; sin embargo, a continuación se presenta una secuencia de etapas, generalmente recomendadas:

- Definir el problema, los objetivos y los requerimientos.
- Diseño del modelo conceptual.
- Obtención y análisis estadístico de los datos para el modelo.
- Construcción del modelo de simulación.
- Verificación del modelo.
- Validación del modelo.
- Diseño del experimento de simulación, ejecución y análisis estadístico.
- Entrega de documentación y presentación de resultados.

**Ejemplo:** Diagrama de Gantt de un proyecto de simulación



A continuación se desarrollarán los aspectos que se involucran en cada etapa; en ciertos casos se analizarán con mayor profundidad algunas de estas etapas en capítulos posteriores de este libro.

<sup>2</sup> Basado en HARRELL CH. y K.TUMAY. *Simulation made easy*, 1985.

## 4.1 Definir el problema, los objetivos y los requerimientos

No es suficiente expresar el problema en términos generales, como “¿Qué tan grande debe ser el aeropuerto que se va a construir?”. Una declaración más precisa del problema sería, por ejemplo: “¿Cuántas pistas de aterrizaje y de qué longitud serán requeridas para satisfacer la demanda estimada para un viaje aéreo?”. En la medida en que el problema se formule de una manera más precisa, la construcción del modelo se hará más sencilla.

Al inicio, es importante definir el problema entendiendo su contexto, identificando los objetivos que definen la razón y el propósito para llevar a cabo el proyecto de simulación. Una forma de conocer el problema es saber más sobre el sistema que se está investigando; por ejemplo, su capacidad actual de producción, las medidas de desempeño actuales del sistema (utilización, tiempo de ciclo, tiempo de espera, entre otros); conocer cuáles son las restricciones o “cuellos de botella” y ver la factibilidad de alcanzar indicadores meta de desempeño (adición de recursos, mejorar métodos, etcétera); qué variables de decisión son más sensibles en el desempeño global del sistema. El objetivo de la simulación debe ser realista y factible de ser ejecutado, y sus requerimientos deben definirse en términos de recursos, tiempo y presupuesto.

En la identificación de los objetivos debemos realizar las siguientes preguntas (Knepell y Arango, 1993):

- ¿Cuál es el propósito de la simulación?
- ¿Para quién es el modelo?, ¿quién será el usuario final del modelo?
- ¿Qué tan importantes serán las decisiones que se tomarán como resultado del modelo de simulación?
- ¿Cuáles son las expectativas del cliente?
- ¿Cuál es el presupuesto?
- ¿Cuál es la fecha límite para finalizar el proyecto?

El proyecto de simulación será exitoso en la medida en que los objetivos sean definidos en forma clara y las restricciones sean bien entendidas. La simulación solo debería ser ejecutada cuando se hayan definido el o los objetivos del proyecto y se haya determinado que la simulación es la herramienta más conveniente para adquirir dichos objetivos. Durante la ejecución del proyecto, es necesario regresar a los objetivos, para mantener la atención enfocada en lo que es importante. Algunas veces los objetivos cambian o se expanden durante el avance en la ejecución del proyecto.

## 4.2 Diseño del modelo conceptual

En esta etapa, el modelador debe traducir el sistema del mundo real en un modelo conceptual. En el diseño del modelo conceptual se debe establecer la lógica de las operaciones en el modelo en términos de los elementos estructurales del sistema y del flujo de entidades que pasarán a través del sistema. En este sentido, el modelador

debe entender la estructura y las reglas de operación del sistema que se investiga y ser capaz de extraer su esencia, sus características importantes. En esta etapa se deben tomar en cuenta aspectos como:

- En el modelo se pueden hacer suposiciones razonables.
- Los componentes que deben ser incluidos en el modelo y cuáles son las interacciones posibles entre estos.
- La secuencia de operaciones.
- Los recursos en disputa por las entidades.
- Los alcances del modelo. El nivel de detalle que debe ser incluido en el modelo depende de los objetivos planteados para el proyecto. En todo caso, solo aquellos componentes que causan diferencias significativas en la toma de decisiones deben ser considerados.
- Identifica los requerimientos de datos para cada componente del modelo, por ejemplo, 'atención al cliente'. Para un buen entendimiento, los requerimientos de datos pueden ser proyectados, con ellos se pueden considerar programas o *Schedule*, algoritmos y controles requeridos para el modelo.
- Planeamiento de experimentos. Definir, en forma tentativa, el número y la naturaleza de los escenarios o alternativas de configuración que será evaluada.
- Determinar el formato de presentación de los resultados. Este aspecto influye significativamente en el tiempo y el esfuerzo involucrado en el estudio de simulación. Si se requiere un detallado nivel de animación o si se espera un extenso reporte, entonces el proyecto se puede prolongar por varias semanas extras después de que la etapa de experimentación haya concluido. En algunos casos se requiere como resultado solo un valor, con el cual se verifica si el sistema es capaz de alcanzar los requerimientos de niveles de producción o servicio; en estos casos, un solo valor es suficiente. En otras situaciones se requiere una completa documentación en la que se detallen todos los objetivos, las fuentes de datos, las suposiciones, los procedimientos de modelado, los experimentos, los análisis de resultados y las recomendaciones. Una pauta para establecer la clase y la cantidad de información por presentar es preguntar al tomador de decisiones qué decisión está siendo respaldada por la simulación y los aspectos de fondo involucrados; así, se focalizará en los ítems importantes y se proveerá de efectiva visualización de información que facilite un adecuado proceso de toma de decisiones. Algunas veces la animación de la simulación puede ser efectiva para mostrar áreas congestionadas o "cuellos de botella"; también la presentación de gráficas o esquemas.

### **4.3 Obtención y análisis estadístico de los datos**

Una vez que en la etapa anterior se han identificado los requerimientos de los datos, entonces se procede a su obtención para que sean utilizados durante la etapa de cons-

trucción del modelo. Una inapropiada especificación en el modelo nos conducirá a una pérdida irreversible de tiempo y esfuerzo. Por ello, los datos deben ser obtenidos en forma sistemática, clasificados y analizados estadísticamente.

Los datos que conciernen al sistema son los involucrados con su estructura, con los componentes individuales existentes, las interacciones entre los componentes y las operaciones del sistema. Los posibles estados del sistema se establecen a partir de esta información.

*Ejemplo:* Operación de control de calidad.

A continuación se presentan los datos de entrada para el segmento del modelo:

- Tiempo de traslado de la estación previa a la estación de control.
- Duración de la actividad control de calidad.
- Probabilidad de aceptación y rechazo.
- Tiempo de traslado de la estación de control a la estación siguiente.

La fuente para la obtención de datos puede provenir de la ejecución de un estudio de tiempos, de entrevistas personales con los operadores del sistema, o de otras fuentes. El proceso de obtención de datos es vital e implica tiempo y costo; por lo tanto, debe ejecutarse en forma inteligente y sistemática para asegurar la construcción del modelo apropiado.

Una vez obtenidos los datos, estos deben pasar por ciertas pruebas estadísticas, para ver si se ajustan a alguna distribución de probabilidad. La información de un sistema tiene carácter dinámico y estocástico, la variabilidad de este debe modelarse con ciertas ecuaciones matemáticas que sean capaces de reproducir su comportamiento; en la mayoría de los casos es posible clasificar dicha variabilidad dentro de alguna distribución de probabilidad, en otros casos esto no es posible y se debe recurrir a distribuciones empíricas. La representación en el modelo de una variable aleatoria se da por medio de una distribución de probabilidad. Si luego de realizar las pruebas a los datos obtenidos se alcanza un ajuste significativo, entonces es posible representar en el modelo estos datos por medio de una distribución de probabilidad "teórica" (exponencial, uniforme, triangular, normal, etcétera).

Aspectos importantes de esta etapa se desarrollarán, con detalle, más adelante, cuando se aborde el capítulo de obtención y análisis de los datos para el modelo.

#### **4.4 Construcción del modelo de simulación**

En esta etapa el modelador debe traducir el modelo conceptual en un modelo de simulación que se prepara en la computadora y se basa en las reglas del sistema seleccionado, por ejemplo, los software Arena, ProModel, etcétera.

Un buen modelo no es aquel que necesariamente es real, pero sí lo suficientemente útil. Un modelo es útil si tiene suficiente detalle y exactitud para encontrar los objeti-

vos de la simulación. El grado al cual el modelo corresponde en detalle y exactitud al sistema actual está asociado al nivel de *fidelidad*. Altos niveles de fidelidad requieren largos desarrollos, depuraciones y tiempos de ejecución. Por ello, se recomienda establecer un mínimo requerido de fidelidad para lograr los objetivos del estudio. Se debe tener en cuenta que los modelos no tienen que incluir todo el detalle necesario para que puedan ejecutarse. Mediante un progresivo refinamiento estratégico puede adicionarse el detalle y no todo a la vez. Esto posibilita que el modelo se ejecute rápido y sea fácil la depuración de errores. En la etapa inicial, por ejemplo, no son necesarios los gráficos muy atractivos, como sí lo serían en la presentación final del modelo. En cuanto a la complejidad del modelo, se debe tomar en cuenta que es mejor empezar con un modelo simple y adicionar complejidad, en lugar de crear un modelo complejo enseguida. Es más fácil adicionar que extraer complejidad al modelo.

#### **4.5 Verificación del modelo**

Mediante el proceso de verificación se determina si el modelo de simulación construido refleja correctamente el modelo conceptual diseñado. Es decir, después de haber terminado la construcción del modelo es necesaria la comprobación, la confirmación de que el modelo trabaja correctamente.

Durante este proceso el modelador trata de detectar errores involuntarios en el modelo (de datos, de lógica u otros) y eliminarlos. Es recomendable investigar las regiones extremas de los parámetros de entrada, verificar que sucedan las cosas correctas con entradas obvias y seguir la secuencia lógica con las personas familiarizadas con el sistema. En esta etapa se debe continuar con el proceso de depuración y refinación del modelo, pero en una proporción menor que en la etapa de construcción.

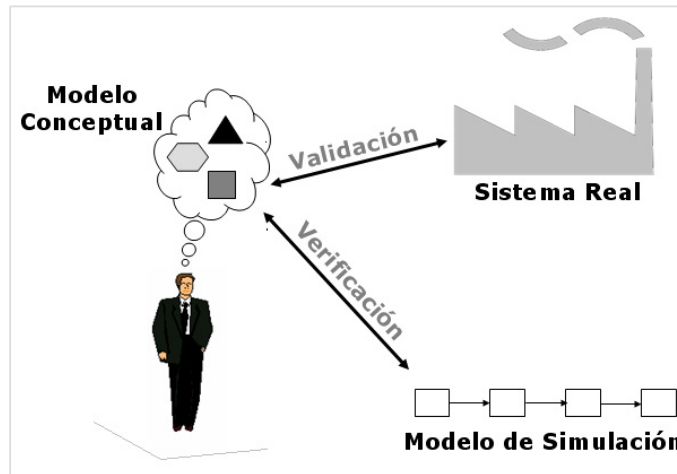
#### **4.6 Validación del modelo**

Mediante el proceso de validación del modelo se determina si el modelo conceptual rediseñado refleja correctamente el sistema real. La validación es un proceso racional en el cual el modelador traza conclusiones acerca de la precisión del modelo, basado en alguna evidencia disponible.

La validez del modelo se refiere a si este corresponde al sistema real, o si por lo menos representa con precisión la data recolectada y las suposiciones hechas con relación a la manera en que opera el sistema real. Durante el proceso de construcción del modelo, el modelador debe estar constantemente comprometido con la validación del modelo. Un ejemplo de validación es comparar la medición de un indicador de desempeño obtenido de la simulación, con la medición del mismo indicador tomado del sistema real, y ver si estas corresponden.

La recolección de evidencias que determinan la validez del modelo es extensamente llevado a cabo examinando la estructura del modelo y evaluando la información estática que se obtiene del modelo. La estructura del modelo (los algoritmos y las relaciones) debe ser verificada para ver cuán cerca esta corresponde a la definición actual del sistema. Para aquellos modelos que tienen una lógica de control compleja, la ani-

mación gráfica puede ser utilizada en forma efectiva como una herramienta de validación. Finalmente, la información de salida del modelo debe ser analizada para observar si los resultados parecen razonables. Si estos procedimientos son ejecutados sin encontrarse una discrepancia entre el sistema real y el modelo, entonces se dice que el modelo tiene una precisa representación del sistema.



Traducción en dos etapas para convertir el sistema del mundo real en un modelo de simulación.

La verificación y validación del modelo representan factores críticos para el éxito del proyecto de simulación. Importantes decisiones se basan en la información obtenida del experimento de simulación y, por lo tanto, esto es una evidencia demostrable de la validez del modelo.

#### 4.7 Experimento de simulación, ejecución y análisis estadístico

En esta etapa se planea qué es lo que se desea saber. Mediante los experimentos de simulación obtendremos las respuestas de una manera precisa y eficaz.

En un experimento de simulación hay ciertas variables llamadas "independientes" o "variables de entrada", que pueden ser manipuladas o variadas. Los efectos que causa esta manipulación en otras variables denominadas "dependientes" o "variables de respuesta" son medidos. Las variables independientes son manejadas o manipuladas en la experimentación; se les llama también variables de decisión o variables de experimento. Desde que el experimentador está interesado en variables dependientes estas son llamadas variables de respuesta o variables de desempeño.

Varios tipos de experimentos pueden ser conducidos usando simulación:

- Encontrando el desempeño esperado del diseño particular de un sistema.
- Encontrando el valor óptimo para una variable de decisión.
- Encontrando la combinación óptima de valores para dos o más variables de decisión.

- Determinando la sensibilidad del modelo de cambios en una o más variables.
- Comparando alternativas en la configuración de sistemas.

El objetivo en la conducción de experimentos no es encontrar cuán bien opera un sistema particular, sino tener suficiente conocimiento de cómo mejorar el desempeño del sistema. Desafortunadamente, la información obtenida de la simulación muy pocas veces identifica las causas de los problemas, solo reporta el comportamiento sintomático del problema. Por ejemplo, las actividades "cuello de botella" son usualmente identificadas porque determinado proceso posee siempre una cola larga, comparadas con los procesos cuyas colas están vacías. Esto es un síntoma de que existe un "cuello de botella" en el sistema.

El conjunto de valores de cada indicador, que resulta de la ejecución del experimento de simulación, sea de estado estable o transitorio, deberá ser sometido a pruebas estadísticas de bondad de ajuste a la distribución Normal, es decir, básicamente a las pruebas de Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling. El objetivo de esta prueba es verificar que se aplica el Teorema del Límite Central (TLC) para el indicador del estudio, es decir, que los N valores promedio que se logren producto de las N réplicas forman un conjunto de valores que se ajustan a una distribución de probabilidad Normal, y, por lo tanto, se podrá realizar inferencia estadística al indicador.

En la conducción de un experimento de simulación el modelador debe tener cuidado en la correcta interpretación de la información obtenida de la ejecución de la simulación. A continuación se presentan algunos puntos para tomar en cuenta en el diseño del experimento de simulación.

Aspectos claves en el diseño del experimento de simulación:

- ¿Está el interés focalizado en analizar el comportamiento del estado estable del sistema, o existe un determinado período de tiempo que se desea medir?
- ¿Cuál es la mejor manera de asegurar que los resultados reflejen solo el período de tiempo de interés y no sean influenciados por otras condiciones, como las condiciones iniciales?
- ¿Cuál es el mejor método para obtener una muestra de observaciones que pueden ser usadas para estimar el comportamiento del modelo?
- ¿Cuál es la longitud apropiada para ejecutar la simulación?
- ¿Cuántas réplicas deben ser ejecutadas?
- ¿Cuántas secuencias de números aleatorios deben ser utilizadas en el modelo?
- ¿Es factible realizar inferencia estadística con los valores obtenidos de cada indicador (producto de las N réplicas)?, ¿realmente se ajustan a una distribución Normal?

Las respuestas a estas preguntas dependerán del grado de precisión requerido del proyecto de simulación. Todos estos aspectos claves serán desarrollados en forma



detallada más adelante, en el capítulo correspondiente al diseño del experimento de simulación, su ejecución y análisis estadístico de los resultados.

#### **4.8 Entrega de documentación y presentación de resultados**

En esta etapa se hacen las recomendaciones para mejorar el sistema real sobre la base de los resultados del modelo de simulación.

Estas recomendaciones deben ser alcanzadas mediante un informe o reporte final, en el cual se adjunta la data utilizada, el desarrollo del modelo y los experimentos ejecutados. Los resultados deben ser presentados de forma que sean fáciles de evaluar; la animación y las gráficas son muy útiles como ayuda para comunicar los resultados del estudio de simulación.

Cuando se ha terminado la presentación y no hay más aspectos que analizar, y si es aprobada, entonces está lista para la implementación. Si la simulación ha sido adecuadamente documentada, esta proveerá buenas especificaciones funcionales para el equipo de implementación.

### **5. GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS**

---

Una de las características más importantes de la simulación es la capacidad de imitar el comportamiento aleatorio que existe en los sistemas estocásticos. Para simular este comportamiento aleatorio se requiere de un método que provea la generación de estos números aleatorios, así como de rutinas para generar variaciones aleatorias, basadas en distribuciones de probabilidad.

Un generador de números aleatorios es un algoritmo determinístico, usado para crear valores reales distribuidos entre 1 y 0, tal que  $0 \leq X < 1$ . Se debe considerar lo siguiente:

- La ocurrencia de cualquier valor es equiprobable o uniforme.
- El valor de la muestra previa no afecta la probabilidad del valor de la próxima muestra (independencia).

Estos números pueden ser transformados en valores que se ajustan a una determinada distribución de probabilidad. Existen varios métodos que son utilizados para generar números aleatorios, los más populares son los métodos congruenciales, que pueden ser: aditivos, multiplicativos o mixtos.

A continuación se presenta la expresión general de un generador congruencial mixto:

$$X_{n+1} = (a * X_n + c) \text{ mod } m$$

donde:

$X_{n+1}$ : número pseudoaleatorio generado

$X_n$ : valor inicial (raíz o semilla)

a: multiplicador

c: incremento

m:  $2^b$  donde  $b > 2$

Función mod: módulo (resto de la división entera; ejemplo:  $n \bmod m$ )

dado que:  $X_{n+1} = (a * X_n + c) \bmod m$

los números generados serán

$$X_1 = (a * X_0 + c) \bmod m$$

$$X_2 = (a * X_1 + c) \bmod m$$

$$X_3 = (a * X_2 + c) \bmod m$$

▪

▪

▪

Los números generados no son estrictamente aleatorios porque ellos son predecibles y reproducibles, por esta razón estos números generados son llamados pseudoaleatorios. No obstante, ellos se adecuan en forma aproximada a la aleatoriedad del mundo real, para propósitos de simulación.

*Ejemplo:*

De acuerdo con la información siguiente, determinar la secuencia completa de números aleatorios; es decir, hasta que se alcance el período correspondiente.

$X_0$ : 6

a: 6

c: 6

m: 10

**Solución:**

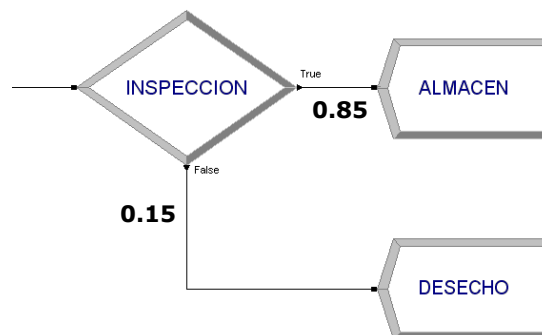
i	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c)$	$X_i = (a * X_{i-1} + c) \bmod m$	Número Aleatorio $R_i = X_i / m$
1	6	42	<b>2</b>	<b>0.2</b>
2	<b>2</b>	18	<b>8</b>	<b>0.8</b>
3	<b>8</b>	54	<b>4</b>	<b>0.4</b>
4	<b>4</b>	30	<b>0</b>	<b>0</b>
5	<b>0</b>	6	<b>6</b>	<b>0.6</b>
6	<b>6</b>	42	2	0.2
7	2	18	8	0.8
8	8	54	4	0.4
9	4	30	0	0
10	0	6	6	0.6

*Interpretación:*

- La secuencia de número aleatorios será: 0.2, 0.8, 0.4, 0 y 0.6, luego se repite la misma secuencia.
- Todos los números aleatorios generados tienen un período; es decir, después de una cierta cantidad de números aleatorios la serie vuelve a repetirse. Para nuestro ejemplo, el período es 5.
- Como el módulo es 10, los valores generados no excederán a 10.
- Los valores generados son pseudoaleatorios, porque el siguiente número se genera a partir del anterior, además después del período se repite la misma secuencia.
- En Arena, el período contiene por lo menos dos billones de números. Luego el ciclo se repite a través de la misma secuencia.
- Un número es completamente aleatorio si al repetir el experimento el orden es diferente. Por ejemplo al lanzar sucesivamente un dado.

*Ejemplo:* Expresiones de probabilidad.

Se desea evaluar la decisión, si la entidad que ingresa al módulo de decisión aprueba o desapruueba la inspección. Véase el siguiente esquema del modelo:



Para determinar el próximo resultado del evento aleatorio es necesario que se genere un número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1. Este valor es comparado con el valor de la probabilidad, definida en el modelo (0.85). Si el número generado está entre 0 y 0.85, entonces la entidad aprueba la inspección; de lo contrario, la entidad no pasa la inspección y se desecha.

## 6. VARIABLES ALEATORIAS<sup>3</sup>

Es aquella variable que puede tener asignado un valor (no previsible) de un determinado conjunto finito (variable aleatoria discreta) o infinito (variable aleatoria continua) de posibles valores. Es una función que asigna un número a cada posible resultado de un experimento (espacio de muestreo). Aunque la secuencia exacta de valores que serán asignados a una variable aleatoria no puede ser prevista, si que es

<sup>3</sup> Basado en HARRELL, CH.; B. K. GHOSH y R. BOWDEN. Op. cit.

posible conocer el rango de valores en los que puede variar, así como la probabilidad de tener asignado un cierto valor.

Un proceso estocástico evoluciona en el tiempo y/o espacio e involucra a una variable aleatoria, de tal modo que el comportamiento del proceso no puede preverse con exactitud. Estos procesos se utilizan para representar aquellas actividades cuyos efectos varían aleatoriamente en distintas salidas y los resultados generados sirven para obtener estimaciones de las variables que caracterizan el comportamiento real del sistema.

En simulación, los valores que puede tomar una variable aleatoria, como la duración de una actividad, o quizá el tiempo entre arribos de las entidades al sistema, son representados por una Distribución de Probabilidad. Para generar un valor individual de la variable aleatoria, un número aleatorio (creado mediante un generador de números aleatorios) es colocado en una rutina o ecuación de transformación, convirtiendo el número aleatorio en un valor que conforma una distribución de probabilidad y que representa a la variable aleatoria.

El comportamiento aleatorio en un sistema es expresado en un modelo de simulación, ya sea utilizando expresiones de probabilidad (véase el ejemplo anterior) o por la especificación de distribuciones de probabilidad. Esto depende de si se trata de un hecho particular de decisión mediante la comparación con un número aleatorio generado, o si se trata de la probabilidad de un valor asociado a una variable aleatoria, como la duración de una actividad, o quizá la cantidad de productos que compra un cliente, etcétera. Las expresiones de probabilidad definen la variabilidad de posibles resultados; las distribuciones de probabilidad definen la variabilidad de una situación dada, expresada por un universo de posibles valores pertenecientes a la variable aleatoria.

## 7. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

La distribución de probabilidad permite relacionar un conjunto de valores o medidas, con su frecuencia relativa de aparición. Frecuentemente, los sistemas estocásticos tienen situaciones que implican la determinación de valores de tiempo o cantidad, que varían de acuerdo a una forma o densidad y a un rango dado. Por ejemplo, el instante en que ocurrirá el próximo evento, el número de paquetes por trasladar, el tiempo de recorrido hasta la ventanilla de atención o el tiempo de una consulta médica, etcétera. Los resultados o valores posibles que pueden tomar todas estas situaciones conforman el universo de valores que está definido en la variable aleatoria y pueden ser expresados o representados por medio de una distribución de probabilidad.

### *Ejemplo:*

El tiempo de una actividad se define en el modelo mediante una distribución de probabilidad (Uniforme, Triangular, Normal, etcétera), incluyendo sus parámetros (Uniforme (4,6), Triangular (8,10,12), Normal (15,0.1), etcétera) que describen la forma o densidad y rango de la distribución. Durante la ejecución de la simulación, los valores individuales de las variables aleatorias se generarán de esta distribución, cada vez que una entidad inicie la operación.

Las distribuciones de probabilidad pueden ser discretas o continuas. Son discretas cuando representan un número entero y finito de posibles valores, como el número de individuos en un grupo de personas. Son continuas cuando representan un número que pertenece al rango de los números reales, por ejemplo, el tiempo de operación de una máquina que se distribuye uniformemente entre 1.2 y 1.8 minutos. En este caso, en este rango existe un infinito número de posibles valores.

A continuación se muestran algunos ejemplos de distribuciones de probabilidad modeladas utilizando el software Excel:

	A	B	C	D	E	F
2	<b>D I S T R I B U C I O N E S D E P R O B A B I L I D A D</b>					
3						
4						
5	<b>1. Numero Aleatorio:</b>	<b>2. Dist. Exponencial:</b>	<b>3. Dist. Normal:</b>			
6		EXPO(5)	NORM(20,3.4)			
7	=ALEATORIO()	= - LN(ALEATORIO())*5	=DISTR.NORM.INV(ALEATORIO(),20,3.4)			
8						
9	0.712796302	2.760594411	25.15727625			
10						
11		otra Alternativa:				
12		= - LN(1-ALEATORIO())*5				
13						
14		7.780191868				
15						
16					<b>6. Dist. Discreta:</b>	
17					Ejemplo:	
18	<b>4. Dist. Uniforme Continua:</b>	<b>5. Dist. Uniforme Discreta:</b>				
19	UNIF(2.5,4.8)	UNIF(2,6)				
20	= 2.5 + (4.8-2.5)*ALEATORIO()	=ALEATORIO.ENTRE(2,5)				
21						
22	2.711050194	5				
23						
24						
25					= ALEATORIO()	
26					Gas 95	0.33
27					=SI(F25>0.9,"Gas 97",SI(F25>0.3,"Gas 95","Gas 90"))	

---

## 8. SIMULACIÓN DE SISTEMAS POR EVENTOS Y POR PROCESOS

---

### 8.1 Simulación por eventos

Un evento es un acaecimiento, un hecho que sucede en un instante de tiempo. En el mundo real los eventos ocurren en forma simultánea; múltiples entidades pueden realizar actividades en forma paralela o simultánea; es decir, en el mismo instante. En el mundo virtual, los eventos suceden uno a la vez, aun cuando estos se dan en el mismo instante. Cuando el modelado de sistemas se centra en la ocurrencia de eventos y lo que sucede cuando ellos ocurren se denomina *orientación por eventos*.

### 8.2 Simulación por procesos

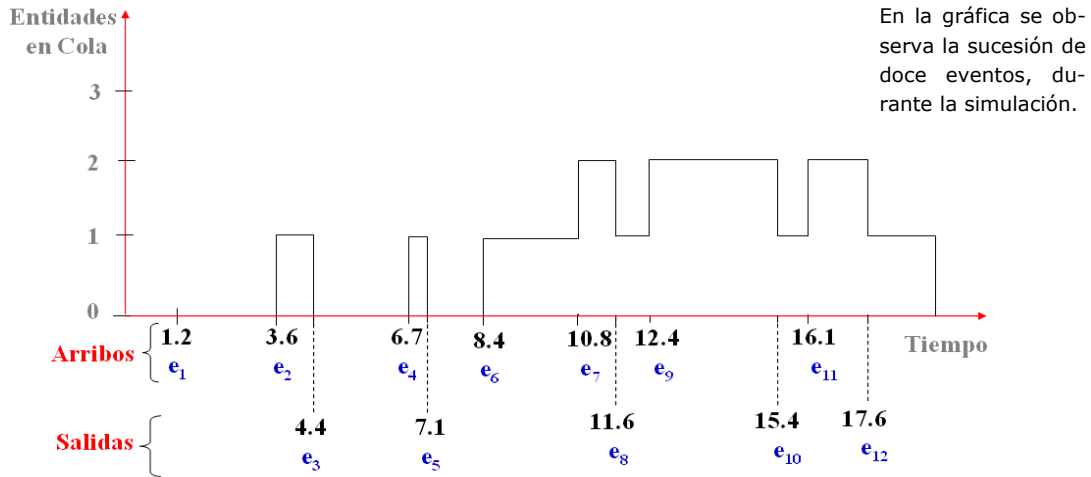
Otro enfoque diferente es el de *orientación por procesos*, que consiste en representar el funcionamiento de un sistema en función de la dinámica de las entidades a través del flujo del proceso; es decir, comenzando desde que estas arriban al sistema, pasando luego por una secuencia de actividades, para finalmente salir del sistema; esta situación puede representarse mediante un diagrama de flujo.

En Arena, la simulación se realiza por procesos de manera explícita, mediante la red de módulos. Pero en forma paralela e implícita (internamente) la simulación se realiza por eventos, mediante un calendario predeterminado y eventos condicionales.

En la lógica de eventos discretos, este flujo de actividades del proceso se traduce en una secuencia de eventos predeterminados, para simular el comportamiento del sistema. Supongamos que el primer evento consiste en el arribo de una entidad al sistema e ingresa inmediatamente a la cola del primer proceso, entonces ocurre un segundo evento que consiste en la terminación del proceso de otra entidad y su salida hacia un segundo proceso. Así, sucesivamente, se van dando los eventos uno a la vez, de acuerdo a un calendario cronológico y predeterminado.

En la simulación de eventos discretos, los cambios en el estado del sistema se dan en puntos discretos del tiempo, como resultado de la ocurrencia de eventos. Veamos los siguientes ejemplos de eventos típicos en simulación:

- El arribo de una entidad a una estación de trabajo.
- La falla de una máquina.
- El inicio de una actividad.
- La finalización de una actividad.
- El final de un turno de trabajo.
- La finalización de la simulación, etcétera.



Los eventos discretos pueden ser de dos tipos:

### 8.2.1 Evento programado en el tiempo (calendario)

Es aquel cuyo momento de ocurrencia puede ser determinado de antemano, y por lo tanto puede ser programado con anticipación. Para estos eventos, en los que es posible que se planee su ejecución en el transcurso del tiempo, el avance del reloj de la simulación se dispone según el próximo evento programado. Así, la ejecución de eventos programados continúa, hasta que se produce el evento de la terminación de la simulación.

#### *Ejemplo:*

Suponga que el tiempo entre arribos de los clientes al sistema se ajusta a una distribución exponencial con una media de 10 minutos. Este evento puede programarse fácilmente al inicio de la simulación, generando un valor individual de la variable aleatoria según la distribución de probabilidad exponencial y su parámetro. El valor obtenido, por ejemplo 8 minutos, define la ocurrencia del próximo evento que marcará el arribo del cliente. Este evento es programado con anticipación en el calendario de eventos.

**Ejemplo:**

Suponga que se define en el modelo la duración que tendrá una actividad y corresponde a una distribución uniforme con parámetros 4 y 6 minutos. Un evento origina el inicio de la actividad, entonces se trabaja en función del próximo evento; así, se genera un valor individual de la variable aleatoria asociada a la distribución uniforme y sus parámetros, supongamos que resulta el valor 5, entonces se programa el próximo evento que completará o finalizará la ejecución de la actividad, en forma cronológica y anticipada, en un calendario de eventos predeterminados, donde aguardarán hasta el instante de su ocurrencia.

**8.2.2 Evento condicional**

Un evento condicional se dispara cuando se da una condición en alguna de las variables de estado del sistema y no mediante su programación en el tiempo.

**Ejemplo:**

Supongamos que un recurso es liberado de una actividad y queda en estado "disponible"; como existen entidades en espera por el recurso, recién en ese instante se genera el evento para tomar dicho recurso disponible. Es decir, se dio la condición, entonces se generó el evento.

## 9. RELOJ DE LA SIMULACIÓN<sup>4</sup>

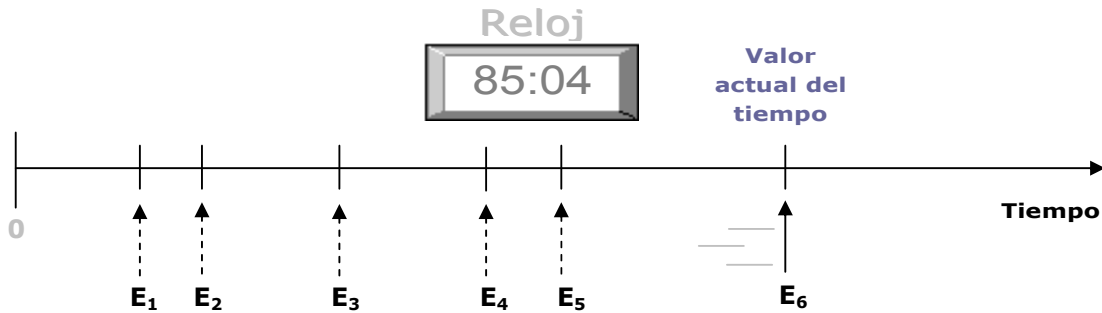
---

El reloj de la simulación es una variable utilizada para controlar el tiempo transcurrido durante la simulación y para interactuar con el calendario de eventos. Es un reloj no convencional, ya que no controla el tiempo en forma continua, sino más bien oscila hacia delante, mediante saltos en instantes discretos del tiempo. Apunta el instante en que se ejecuta el evento durante la simulación, luego salta al tiempo del siguiente evento. Cada salto implica un cambio en el estado del sistema y una actualización del calendario de eventos.

---

<sup>4</sup> Basado en KELTON, D.; SADOWSKI, R. y D. STURROCK. *Simulation with Arena*, 2004.





## 10. VARIABLES DEL SISTEMA<sup>5</sup>

En el diseño de un nuevo sistema o en la mejora de uno ya existente se requiere lograr un entendimiento de cómo los elementos del sistema se interrelacionan y afectan unos a otros. Para ayudar a entender estas relaciones estudiaremos tres tipos de variables del sistema:

1. Variables de decisión.
2. Variables de respuesta.
3. Variables de estado.

### 10.1 Variables de decisión

En un experimento, estas representan la variable independiente. Es posible alterar los valores de las variables independientes, cada vez que esto sucede se afecta el comportamiento del sistema. La persona que realiza el experimento controla y cambia los valores de las variables de decisión, bajo algún criterio técnico.

*Ejemplos:*

- Asignar a un determinado número de operarios a la línea de producción.
- Agregar un turno adicional de trabajo.

### 10.2 Variables de respuesta

También llamadas variables de *performance*, pues miden el desempeño del sistema en respuesta a alguna variable de decisión.

*Ejemplos:*

- El tiempo promedio que una entidad permanece en cola.
- El número de entidades procesadas en un período dado.
- La utilización promedio de un recurso, etcétera.

<sup>5</sup> Basado en HARRELL, CH.; GHOSH, B. K. y R. BOWDEN. Op. cit.

En un experimento, la variable de respuesta representa la variable dependiente; es decir, estas no pueden ser alteradas. El objetivo en el planeamiento de sistemas es encontrar la configuración o los valores idóneos de las variables de decisión que den los valores deseados de respuesta.

### **10.3 Variables de estado**

Las variables de estado contienen valores individuales, pero en forma conjunta describen el estatus del sistema en cualquier instante del tiempo.

*Ejemplos:*

- El número actual de entidades en cola, el número actual de recursos que están siendo utilizados o que están disponibles.
- El número promedio actual de entidades en el sistema.
- El estado actual de una máquina (ocupada, inactiva o malograda).

Las variables de estado a menudo tienen un efecto en la toma de decisiones cuando los eventos ocurren; por ejemplo, la disminución del número de entidades en una cola puede generar el cambio de cola de una entidad. Un cambio en una variable de estado del sistema, también puede causar la ocurrencia de otros eventos, por ejemplo, cuando el nivel del inventario cae por debajo de lo establecido, se lanza la orden de pedido al proveedor. Las decisiones que se toman también afectan las variables de estado, pues generan un cambio de valor en estas, por lo tanto, afectan el desempeño global del sistema.

En la simulación por eventos discretos se generan cambios discretos en las variables de estado. En la simulación continua se generan cambios continuos en las variables de estado, que cambian permanentemente en el tiempo.

## **11. ELEMENTOS ABSTRACTOS DEL SISTEMA**

---

Un modelo de simulación es una abstracción del sistema real. Para construir un modelo es necesario visualizar cómo el sistema real puede ser traducido en un modelo virtual, utilizando los elementos abstractos y las herramientas que provee el software. En este capítulo veremos conceptos fundamentales de elementos como entidades, recursos, atributos de entidad y variables globales.

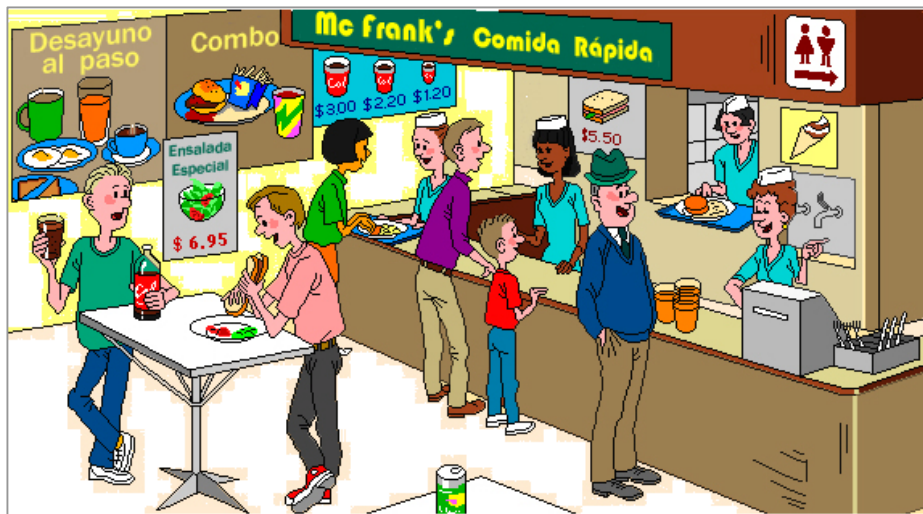
### **11.1 Entidades**

Las entidades representan los elementos que ingresan al sistema para recibir un servicio o para ser procesadas; representan las entradas y salidas del sistema. Por ejemplo: productos, clientes, documentos, etcétera.

Las entidades, al desplazarse por el sistema, van cambiando de estatus, afectan y son afectadas por otras entidades, afectan el estado del sistema y, por lo tanto, afectan también el reporte final de los indicadores de desempeño.

En muchos sistemas de manufactura y servicio las entidades son elementos discretos; por ejemplo: los clientes. A estos sistemas en los que circulan este tipo de entidades se les llama sistemas discretos. Sin embargo, existen otros sistemas, en los cuales lo que se desplaza por el sistema es un flujo continuo de alguna sustancia o líquido, que será procesada en lugar de entidades discretas; estos son los llamados sistemas continuos. También existen los sistemas combinados, en los que concurren ambos tipos de sistemas: discretos y no discretos (o continuos).

En el modelo virtual de simulación, una entidad puede dividirse o “clonarse” y formar otras entidades. También pueden juntarse dos o más entidades y formar una sola entidad; o concurrir entidades de diferente tipo, por ejemplo, una línea de cajas y otra línea de botellas.



En la gráfica se observa a los clientes (entidades) que demandan un servicio. También se observa los recursos disponibles para la atención de los clientes.

## 11.2 Recursos

Los recursos son los elementos que soportan, directa o indirectamente, el procesamiento de las entidades en el sistema. Existe siempre un interés por conocer cómo son utilizados los recursos o cómo se afecta el flujo de entidades, reflejado en tiempos de espera por la disponibilidad del recurso. Cómo mejorar la utilización de los recursos sin incurrir en extensos tiempos de espera, o cómo reducir tiempos de espera sin adicionar más recursos son aspectos que se deben analizar y experimentar en el modelo, desarrollando ciertas estrategias.



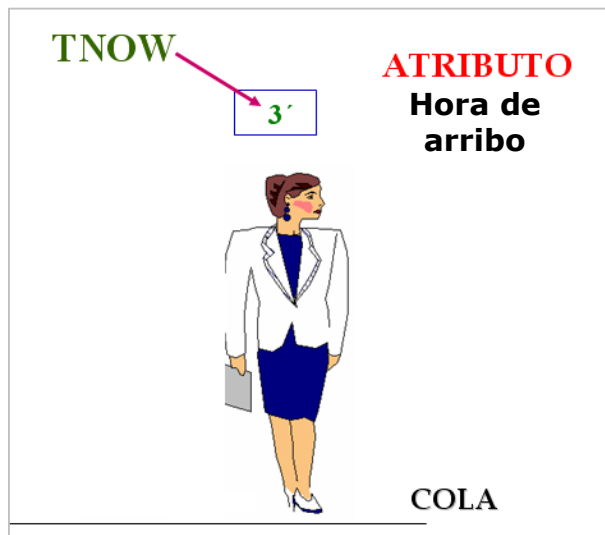
En la gráfica se observa al cajero (recurso), que brinda un servicio al cliente (entidad).



Cuando la demanda por el recurso (cajero) es mayor que la cantidad de recursos disponibles, entonces se forma una cola de espera.

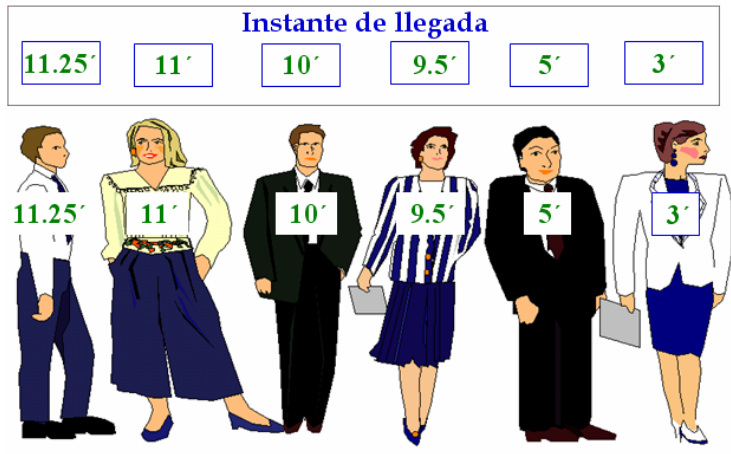
### 11.3 Atributos

Los atributos son variables asociadas exclusivamente a las entidades, almacenan valores o información acerca de cada entidad. Para individualizar entidades es necesario vincularle atributos. Las entidades poseen atributos que contienen información característica para cada entidad; es decir, las entidades poseen características que son comunes pero contienen información específica para cada entidad, que las diferencian unas de otras. Ejemplo: peso, edad, tamaño, hora de arribo, prioridad, tipo, etcétera.

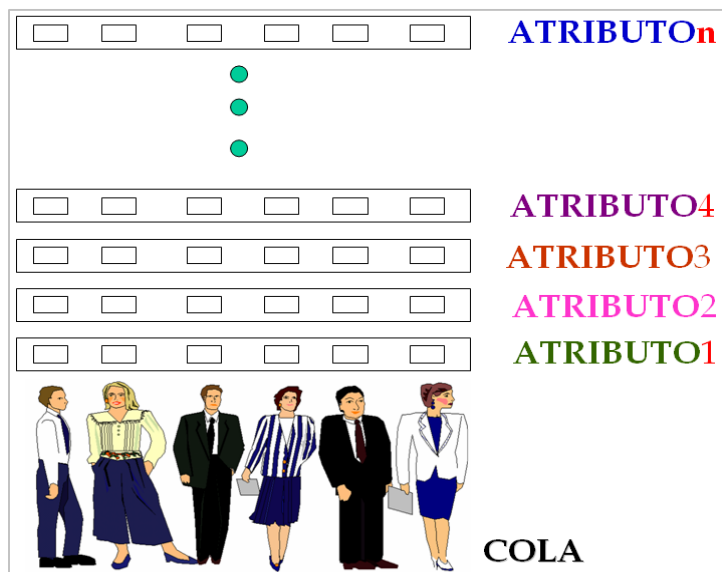
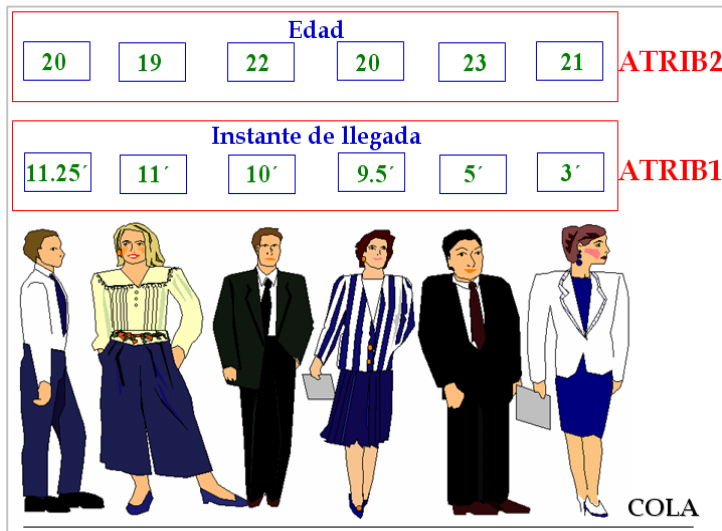


La variable TNOW, de Arena, proporciona el tiempo transcurrido de la simulación y se registra en un atributo, que la entidad llevará consigo durante su recorrido.

Después de unos minutos, observamos que creció el tamaño de la cola. En todas las entidades se grabó, en su atributo, la hora de arribo.



Cada entidad almacena en un atributo algún tipo de información, propio de dicha entidad.



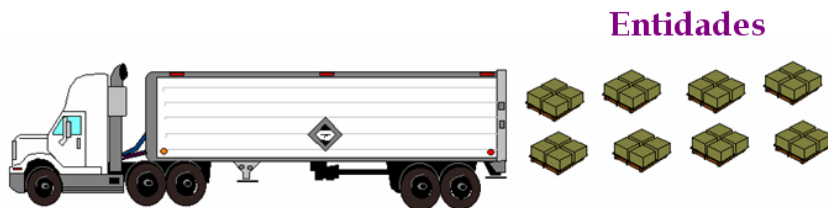
El mismo atributo tendrá diferentes valores para diferentes entidades. De acuerdo con la lógica del problema, se les podrá asignar valores, o cambiarlos, conforme convenga y usarlos cuando sea el momento.

## 11.4 Variables globales

Estas variables son utilizadas en el modelo de simulación; representan una parte de la información que refleja alguna característica del sistema en estudio, independientemente de la cantidad o tipo de entidades. A diferencia de los atributos, las variables no están asociadas a alguna entidad específica. Sin embargo, son accesibles para cualquiera de estas; incluso para alterar los valores que estas contienen. Las variables pueden representar algo que cambia en forma persistente durante la simulación. Las variables en Arena pueden ser arreglos de una y dos dimensiones, como vectores y matrices.

### *Ejemplo:* Uso de Variables Globales

**CONTAR LOS BULTOS QUE INGRESAN AL CAMIÓN**

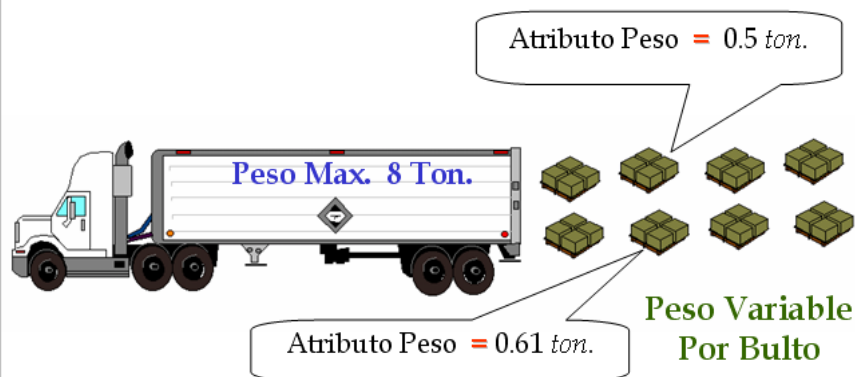


**Solución:**

$$\text{CUENTA} = \text{CUENTA} + 1$$

### *Ejemplo:* Uso de Variables Globales

**¿COMO PODEMOS ACUMULAR EL PESO?**



**Solución:**

$$\text{ACUMULA} = \text{ACUMULA} + \text{Atributo Peso}$$

1

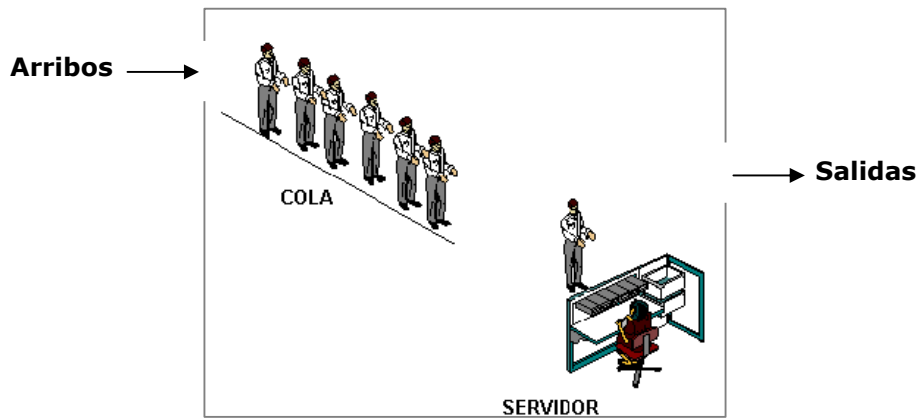
Caso de estudio

**Simulación manual por eventos**

Objetivos:

- Análisis del comportamiento de un sistema.
- Realización de una simulación manual.
- Identificar los datos de entrada necesarios para realizar el estudio.
- Estimación de los indicadores de desempeño del sistema.

Considere un sistema simple, de una cola y un servidor (véase esquema adjunto). En este existen tres diferentes elementos: clientes (entidades) que arriban al sistema, una cola FIFO y un servidor para la atención de los clientes.



El tiempo entre arribos de clientes a la cola cambia en forma aleatoria. Los clientes son atendidos individualmente en el servidor. Se asume que los tiempos entre arribos y la duración del servicio se ajustan a funciones estadísticas de distribución de probabilidad, cuyos valores se muestran a continuación:

A:	1.2	2.4	3.1	1.7	2.4	1.6	3.7	2.9	3.3	1.6	2.3
S:	3.2	2.7	4.5	3.8	2.2	4.3	3.1	2.4	4.2	3.3	2.9

A = *Tiempo entre Arribos* (minutos)

S = *Tiempo de Servicio* (minutos)

Se pide:

1. Realizar una simulación manual tomando en cuenta los datos del problema en estudio. El final de la simulación se da en el instante en que el quinto cliente sale del sistema.
2. Estimar los indicadores de desempeño que considere importantes en el estudio del sistema.

### Solución

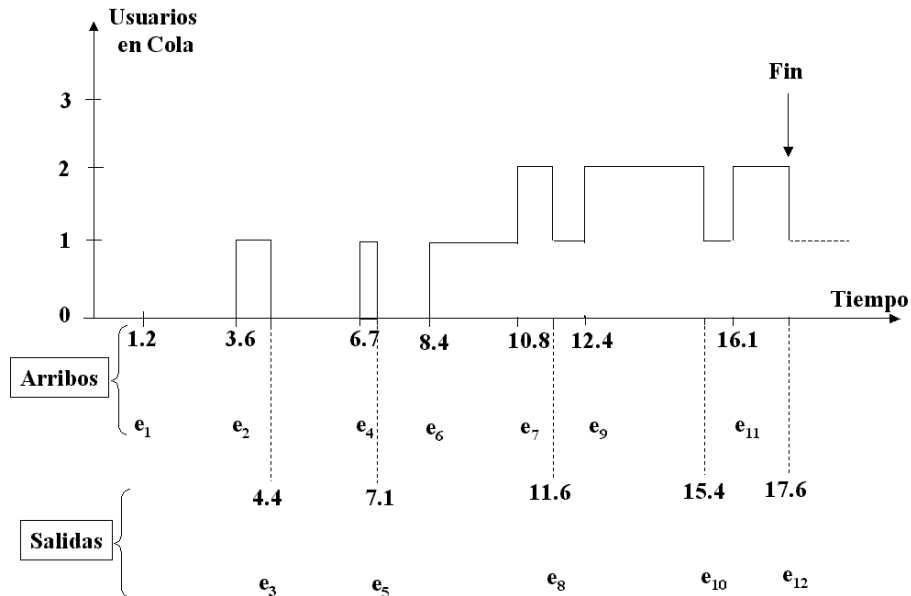
1. En el problema planteado existen dos tipos de eventos que deben tomarse en cuenta en la simulación: el arribo de un cliente y la salida de un cliente del sistema. A continuación se muestra la simulación manual de los eventos del sistema:

CLTE.	(1) TIEMPO ENTRE ARRIBOS	(2) HORA DE ARRIBO	(3) HORA DE INICIO	(4) TIEMPO DE ATENCIÓN	(5) HORA DE SALIDA	(6) TIEMPO EN COLA (2)-(1)	(7) TIEMPO EN SISTEMA (4)-(1)
1	1.2	1.2	1.2	3.2	4.4	0.0	3.2
2	2.4	3.6	4.4*	2.7	7.1	0.8	3.5
3	3.1	6.7	7.1	4.5	11.6	0.4	4.9
4	1.7	8.4	11.6	3.8	15.4	3.2	7.0
<b>5</b>	2.4	10.8	15.4	2.2	<b>17.6</b>	4.6	6.8
6	1.6	12.4	17.6	4.3	21.9	5.2**	5.2**
7	3.7	16.1	21.9	3.1	25.0	1.5**	1.5**
8	2.9	19.0					
				<b>16.4</b>	←Suma→	<b>14.2</b>	<b>25.4</b>

\* Valor máximo entre la hora de arribo del cliente 2 y la hora de salida del cliente 1: =**Max(3.6, 4.4)**

\*\* Tiempo de Simulación (**17.6**) menos Hora de Arribo.

La secuencia de eventos según el avance del reloj de la simulación es la siguiente:



La gráfica anterior nos da una idea clara sobre las variaciones de tamaño de cola durante la simulación. Durante 7.2 minutos (3.6+2.3+1.3) no consecutivos hubo cero clientes en cola; el tamaño máximo de cola fue de 2 clientes.

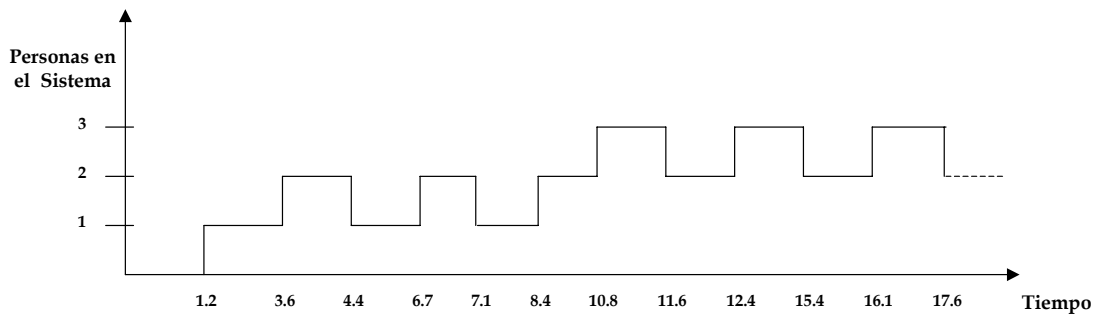


El siguiente cuadro muestra un análisis, según la secuencia de eventos:

**Calendario De Eventos:**

			(7)	(8)	(9)
	TIPO DE EVENTO	INSTANTE EN QUE OCURRIÓ EL EVENTO	NUM. CLTS. EN SISTEMA (Estado)	NUM. CLTS. EN COLA (Estado)	DURACIÓN DEL ESTADO
Evento 1	Arribo	1.20	1	0	2.40
Evento 2	Arribo	3.60	2	1	0.80
Evento 3	<b>Salida</b>	4.40	1	0	2.30
Evento 4	Arribo	6.70	2	1	0.40
Evento 5	<b>Salida</b>	7.10	1	0	1.30
Evento 6	Arribo	8.40	2	1	2.40
Evento 7	Arribo	10.80	3	2	0.80
Evento 8	<b>Salida</b>	11.60	2	1	0.80
Evento 9	Arribo	12.40	3	2	3.00
Evento 10	<b>Salida</b>	15.40	2	1	0.70
Evento 11	Arribo	16.10	3	2	1.50
Evento 12	<b>Salida</b>	<b>17.60</b>			

En la gráfica siguiente se aprecia que durante 16.4 minutos consecutivos hubo siempre en el sistema 1 cliente como mínimo y 3 clientes como máximo. Esto significa que el servidor estuvo inactivo solo los primeros 1.2 minutos:



**2. Indicadores de desempeño**

**2.1 Tiempo promedio en cola**

$$Tiempo = \frac{14.2}{6} = 2.4$$

*Interpretación:* La espera promedio en cola fue de 2.4 minutos.

**Nota:** El sexto cliente hizo la cola "completa" pero no pudo iniciar su atención ya que terminó la simulación.

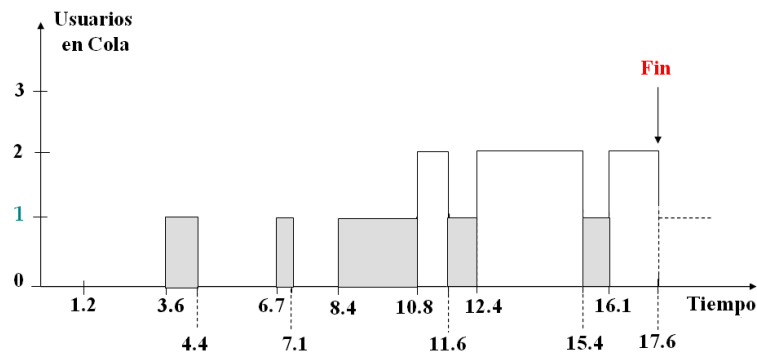
## 2.2 Tiempo promedio en el sistema

$$Permanencia = \frac{25.4}{5} = 5.08$$

*Interpretación:* La permanencia promedio de clientes en el sistema es de 5.08 minutos. Este *ratio* considera solo a los 5 clientes que fueron atendidos y salieron del sistema durante el tiempo de simulación.

## 2.3 Tamaño promedio de cola

En la siguiente gráfica se observa cómo varía la longitud de la cola, a medida que transcurre el tiempo de la simulación.



$$Tamaño = \frac{0(7.2) + 1(5.1) + 2(5.3)}{17.6} = 0.89$$

Método 1: [SumaProducto (8) y (9)]/17.6 (Referencia: calendario de eventos)

Método 2: Suma Col.(5)/17.6 = 15.7/17.6 = **0.89** clientes.

*Interpretación:* La longitud promedio de cola se obtiene del promedio ponderado de las áreas que se forman en la gráfica. El número promedio de personas que estuvieron esperando en cola durante la simulación fue de 0.89 (clientes).

Sustento teórico:

Sea

Q(t): una función que indica la cantidad de clientes en cola en el instante t

T(n): Tiempo total de simulación

t<sub>i</sub> : Cantidad de tiempo con i clientes en cola

P<sub>i</sub>: Proporción de tiempo en el que se tiene i clientes en cola

$$p_i = \frac{t_i}{T(n)}$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=0}^{\infty} i * p_i = q(n)$$

Longitud promedio de cola:

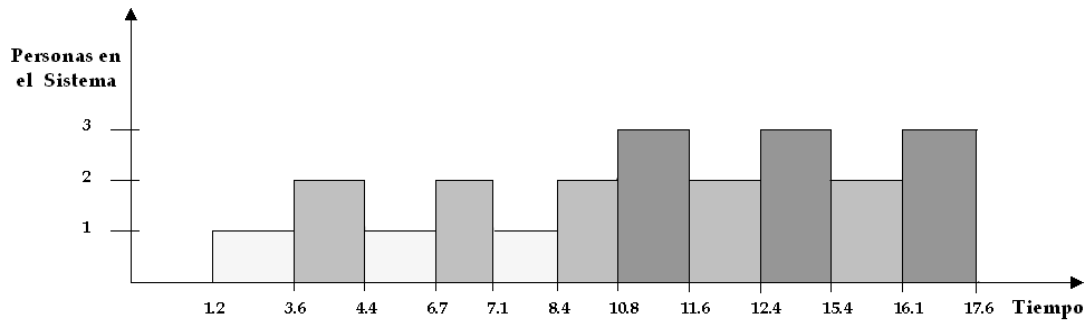
$$\hat{q}(n) = \sum_{i=0}^{\infty} i * \frac{t_i}{T(n)} = \frac{\sum i * t_i}{T(n)} = \frac{\int_0^{\infty} Q(t) dt}{T(n)}$$

$$\begin{aligned} t_0 &= (3.6 - 0) + (6.7 - 4.4) + (8.4 - 7.1) = 7.2 \\ t_1 &= 0.8 + 0.4 + 2.4 + 0.8 + 0.7 = 5.1 \\ t_2 &= 0.8 + 3 + 1.5 = 5.3 \end{aligned}$$

$$\hat{q}(n) = \frac{0(t_0) + 1(t_1) + 2(t_2)}{17.6} = \frac{0(7.2) + 1(5.1) + 2(5.3)}{17.6} = 0.89$$

## 2.4 Número promedio de personas en el sistema (Work in Process: WIP)

La cantidad promedio de personas en el sistema se obtiene del promedio ponderado de las áreas que se forman en la gráfica siguiente:



$$\text{Número} = \frac{0(1.2) + 1(6) + 2(5.1) + 3(5.3)}{17.6} = \frac{32.1}{17.6} = 1.82$$

Método 1: [SumaProducto (7) y (9)]/17.6 (Referencia: calendario de eventos)

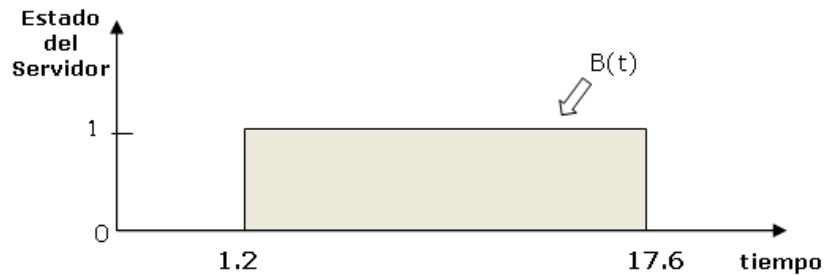
Método 2: Suma Col. (6)/17.6 = 32.1/17.6 = 1.82 *clientes*.

*Interpretación:* El número promedio de personas que estuvieron en el sistema durante el tiempo de simulación fue de 1.82 (clientes).

### 2.5 Utilización del servidor

En la primera gráfica se puede observar que el servidor comienza a trabajar en forma continua desde que llega el primer cliente hasta que termina la simulación.

Sea  $B(t)$  una función:  $B(t) = \begin{cases} 1 & \text{Servidor ocupado} \\ 0 & \text{Servidor desocupado} \end{cases}$



$$\hat{U}(n) = \frac{\int_0^{\infty} B(t) dt}{T(n)} = \frac{(17.6-1.2)*1}{17.6} = \frac{16.4}{17.6} = 0.93$$

*Interpretación:* El servidor estuvo activo el 93% del tiempo de simulación. Es decir, la capacidad ociosa fue del 7%.

### 2.6 Velocidad promedio del servidor

$$Velocidad = \frac{Clts. Atendidos}{Tiempode. Simulación} = \frac{5}{17.6} = 0.28$$

La atención promedio del servidor fue de 0.28 clientes por minuto.

### 2.7 Tiempo promedio de atención

$$Tiempo = \frac{16.4}{5} = 3.28 \quad (\text{Referencia: columna 3})$$

El tiempo promedio de atención del servidor fue de **3.28 minutos por cliente**.

**2.8** Tamaño máximo de la cola de espera

$$\text{MáximoCol.}(8) = 2 \quad (\text{Referencia: calendario de eventos})$$

El número máximo de clientes en espera durante la simulación fue 2.

**2.9** Máximo número de clientes en el sistema:

$$\text{MáximoCol.}(7) = 3 \quad (\text{Referencia: calendario de eventos})$$

El número máximo de clientes en el sistema durante la simulación fue 3.



Caso de estudio

**Expendio de gasolina en estación de servicio <sup>1</sup>**

Objetivos:

- o Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- o Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- o Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- o Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- o Generar el calendario de eventos y calcular los indicadores de desempeño.

En una estación de servicio se dispone de un surtidor para el expendio de gasolina de 90, 95 y 97 octanos, y se atiende solo a un auto a la vez. El intervalo de tiempo entre los arribos de los vehículos se ajusta a una distribución exponencial con una media de 6 *minutos*, inclusive el primero. Si al llegar un auto el surtidor se encontrase ocupado, entonces esperará formando cola. A continuación se muestra la información referente a la venta de gasolina:

Gasolina	Probabilidad de Venta	Precio de Venta (S/. por galón)
<b>90 octanos</b>	0.3	10.9
<b>95 octanos</b>	0.6	13.5
<b>97 octanos</b>	0.1	15.2

La cantidad de galones que se suministra a cada vehículo es una variable aleatoria. Así, la gasolina de 90 octanos se ajusta a una distribución uniforme entre 2 y 15 *galones*; para la de 95, entre 5 y 10 *galones*; y para la de 97, entre 8 y 15 *galones*. La atención de cada auto comprende las siguientes actividades:

1. Tomar el pedido del conductor, abrir la tapa del tanque y poner el marcador en cero: 0.5 *minutos*.
2. Surtir gasolina: 0.3 *minutos/galón*.
3. Cobrar: uniforme entre 1 y 3 *minutos*.

Considere los siguientes valores para el uso de las distribuciones de probabilidad:

	NÚMEROS ALEATORIOS																		
<b>ARRIBOS</b>	0.46	0.65	0.19	0.05	0.45	0.28	0.35	0.77	0.65	0.25	0.53	0.14	0.13	0.84	0.22	0.87	0.30	0.42	0.01
<b>TIPO GASOLINA</b>	0.84	0.28	0.38	0.56	0.24	0.88	0.75	0.74	0.43	0.81	0.53	0.62	0.37	0.26	0.46	0.12	0.60	0.24	0.99
<b>GALONES A SURTIR</b>	0.15	0.07	0.17	0.47	0.63	0.36	0.92	0.75	0.55	0.99	0.60	0.92	0.10	0.15	0.28	0.92	0.96	0.17	0.57
<b>COBRO</b>	0.22	0.56	0.67	0.82	0.60	0.77	0.60	0.93	0.54	0.98	0.94	0.63	0.04	0.11	0.95	0.51	0.45	0.77	0.09

Presente una matriz de trabajo en Excel, para simular manualmente el funcionamiento de esta estación de servicio. Simular hasta que se produzca el evento en el que el cliente número 18 sale del sistema.

Calcule los indicadores: ingresos por venta, tiempo promedio de espera en cola, número promedio de autos en cola, tiempo promedio de atención, tiempo promedio de permanencia en el grifo de los autos, número promedio de autos en el grifo, utilización del surtidor y velocidad de atención de la estación de servicio.

<sup>1</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2010-0".

**Solución:** en EXCEL

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)						
CLTE	ALEAT. ARRIBOS	TIEMPO ENTRE ARRIBOS	HORA DE ARRIBO	HORA DE INICIO	ALEAT TIPO GAS.	TIPO DE GAS.	ALEAT. GAL. A SURTIR	GALONES A SURTIR	ALEAT. COBRO	Recibir pedido	Surtir	Tiempo para Cobrar	TIEMPO DE ATENCIÓN	HORA DE SALIDA	VALOR DE VENTA	TIEMP EN COLA	TIEMP EN SIST.
1	0.46	4.62	4.62	4.62	0.84	Gas.95	0.15	5.74	0.22	0.50	1.72	1.44	3.66	8.28	77.50	0.00	3.66
2	0.65	2.58	7.20	8.28	0.28	Gas.90	0.07	2.85	0.56	0.50	0.86	2.13	3.49	11.76	31.10	1.07	4.56
3	0.19	9.81	17.01	17.01	0.38	Gas.95	0.17	5.87	0.67	0.50	1.76	2.34	4.60	21.61	79.28	0.00	4.60
4	0.05	17.49	34.50	34.50	0.56	Gas.95	0.47	7.37	0.82	0.50	2.21	2.63	5.34	39.84	99.52	0.00	5.34
5	0.45	4.83	39.33	39.84	0.24	Gas.90	0.63	10.15	0.60	0.50	3.04	2.20	5.74	45.58	110.59	0.51	6.25
6	0.28	7.57	46.90	46.90	0.88	Gas.95	0.36	6.80	0.77	0.50	2.04	2.54	5.08	51.98	91.79	0.00	5.08
7	0.35	6.32	53.21	53.21	0.75	Gas.95	0.92	9.60	0.60	0.50	2.88	2.21	5.59	58.80	129.59	0.00	5.59
8	0.77	1.55	54.77	58.80	0.74	Gas.95	0.75	8.77	0.93	0.50	2.63	2.86	5.99	64.79	118.35	4.03	10.03
9	0.65	2.58	57.35	64.79	0.43	Gas.95	0.55	7.75	0.54	0.50	2.33	2.09	4.91	69.71	104.69	7.44	12.36
10	0.25	8.35	65.69	69.71	0.81	Gas.95	0.99	9.95	0.98	0.50	2.98	2.97	6.45	76.16	134.30	4.01	10.47
11	0.53	3.86	69.56	76.16	0.53	Gas.95	0.60	8.00	0.94	0.50	2.40	2.87	5.77	81.93	108.04	6.60	12.38
12	0.14	11.76	81.31	81.93	0.62	Gas.95	0.92	9.58	0.63	0.50	2.87	2.26	5.64	87.57	129.28	0.62	6.26
13	0.13	12.11	93.42	93.42	0.37	Gas.95	0.10	5.49	0.04	0.50	1.65	1.08	3.23	96.65	74.07	0.00	3.23
14	0.84	1.05	94.47	96.65	0.26	Gas.90	0.15	3.89	0.11	0.50	1.17	1.21	2.88	99.53	42.44	2.17	5.06
15	0.22	9.16	103.63	103.63	0.46	Gas.95	0.28	6.38	0.95	0.50	1.91	2.90	5.32	108.95	86.17	0.00	5.32
16	0.87	0.85	104.48	108.95	0.12	Gas.90	0.92	13.97	0.51	0.50	4.19	2.01	6.70	115.66	152.30	4.47	11.17
17	0.30	7.29	111.78	115.66	0.60	Gas.95	0.96	9.80	0.45	0.50	2.94	1.90	5.34	120.99	132.36	3.88	9.22
18	0.42	5.22	117.0	120.99	0.24	Gas.90	0.17	4.17	0.77	0.50	1.25	2.55	4.30	125.29	45.42	3.99	8.29
19	0.01	27.63	144.6														

C  
A  
L  
E  
N  
D  
A  
R  
I  
O  
D  
E  
E  
V  
E  
N  
T  
O  
S

	(12)	(13)	(14)
EVENTO	TIPO DE EVENTO	HORA EN QUE OCURRIÓ EL EVENTO	NUM. AUTOS EN SISTEMA
Evento 1	Arribo	4.62	1
Evento 2	Arribo	7.20	2
Evento 3	Salida	8.28	1
Evento 4	Salida	11.76	0
Evento 5	Arribo	17.01	1
Evento 6	Salida	21.61	0
Evento 7	Arribo	34.50	1
Evento 8	Arribo	39.33	2
Evento 9	Salida	39.84	1
Evento 10	Salida	45.58	0
Evento 11	Arribo	46.90	1
Evento 12	Salida	51.98	0
Evento 13	Arribo	53.21	1
Evento 14	Arribo	54.77	2
Evento 15	Arribo	57.35	3
Evento 16	Salida	58.80	2
Evento 17	Salida	64.79	1
Evento 18	Arribo	65.69	2
Evento 19	Arribo	69.56	3
Evento 20	Salida	69.71	2
Evento 21	Salida	76.16	1
Evento 22	Arribo	81.31	2
Evento 23	Salida	81.93	1
Evento 24	Salida	87.57	0
Evento 25	Arribo	93.42	1
Evento 26	Arribo	94.47	2
Evento 27	Salida	96.65	1
Evento 28	Salida	99.53	0
Evento 29	Arribo	103.63	1
Evento 30	Arribo	104.48	2
Evento 31	Salida	108.95	1
Evento 32	Arribo	111.78	2
Evento 33	Salida	115.66	1
Evento 34	Arribo	117.00	2
Evento 35	Salida	120.99	1
Evento 36	Salida	125.29	

**INDICADORES DE DESEMPEÑO:**

- A. INGRESO POR VENTA: **1746.8 soles.** Suma Col. (9)
- B. TIEMPO PROM. ESPERA EN COLA: **2.16 minutos.** Prom. Col. (10)
- C. NUM. PROM. AUTOS EN COLA: **0.3098 autos.**  
**Método 1:**  
 Suma Col. (10)/125.29  
**Método 2:**  
 [SumaProducto Cols. (13) y (14)]/125.29
- D. TIEMPO PROM. PARA SURTIR: **2.27 minutos.** Promedio Col. (6)
- E. TIEMPO PROM. ATENCIÓN: **5.00 minutos.** Promedio Col. (7)
- F. TIEMPO PROM. EN EL SISTEMA: **7.16 minutos.** Promedio Col. (11)
- G. NUM. PROM. AUTOS EN SISTEMA: **1.02845 autos.**  
**Método 1:**  
 Suma Col. (11)/125.29  
**Método 2:**  
 [SumaProducto Cols.(12) y (14)]/125.29
- H. UTILIZACIÓN DEL SURTIDOR: **32.6%.** Suma Col. (6)/125.29
- I. VELOCIDAD DE ATENCIÓN: **0.14 clientes/minuto.**  
 Clientes atendidos/Tiempo de simulación
- J. CONSUMO PROMEDIO: **7.56 galones/auto.**  
 Promedio Col. (5)
- K. VENTA PROMEDIO: **97.04 soles/auto**  
 Promedio Col. (9)
- L. TAMAÑO MÁXIMO DE COLA:  
 Max. Col.(13) = **2 autos**

## 3

## Caso de estudio

**Módulos de atención organizados en secuencia**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Generar el calendario de eventos y calcular los indicadores de desempeño.

Se requiere modelar un sistema de atención a clientes que arriban a una embajada para realizar trámites documentarios. La llegada de los clientes se ajusta a una distribución de probabilidad Exponencial con una media entre llegadas de 15 minutos, por lo general llegan a la embajada muchos clientes pero existen directivas de dejar pasar y atender solamente a los primeros 20. Considere que el primer cliente llega al inicio de la simulación.

Existen dos módulos de atención organizados secuencialmente, en cada uno hay un funcionario encargado: cada cliente debe pasar por ambos módulos para concluir su gestión. El tiempo de atención en el módulo 1 se ajusta a una distribución normal con una media 10 minutos y una desviación estándar de 1 minuto. Todo cliente que termina de ser atendido en el primer módulo debe pasar a la cola del segundo módulo, cuyo tiempo de atención es una distribución normal con un media 12 y una desviación de 2 minutos. Cuando el cliente termina de ser atendido en el módulo 2, éste finaliza su gestión y se retira de la embajada.

El horario de atención comienza a las 8 am. Desarrolle la simulación manual con Excel hasta la salida de la embajada del último cliente. Generar los números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

$R_i$  = Número Random ó Aleatorio

Donde,  $m = (2^{31} - 1)$  ó 2147483647

$a = 15600$

$c = 6$

Las semillas a utilizar deben ser las siguientes:

Tiempo entre llegadas:  $X_0 = 2500$

Tiempo de atención Estación 1:  $X_0 = 3250$

Tiempo de atención Estación 2:  $X_0 = 4600$

1. Identifique a las entidades, actividades, eventos y recursos del sistema en estudio.
2. Crear la matriz de trabajo en Excel y determine los siguientes indicadores de desempeño:
  - Tiempo promedio de espera en las colas de los módulos 1 y 2.
  - Tiempo promedio en el sistema.
  - Utilización del módulo de atención 2.
  - Velocidad de atención en los módulos 1 y 2.
  - Número promedio de clientes en cola en los módulos durante la simulación.
  - Crear la matriz del calendario de eventos.
  - Número máximo de clientes en el sistema durante la simulación.
  - Número promedio de clientes en el sistema durante la simulación.
  - ¿Cuál es la probabilidad de que un cliente llegue a la embajada y no sea atendido inmediatamente?

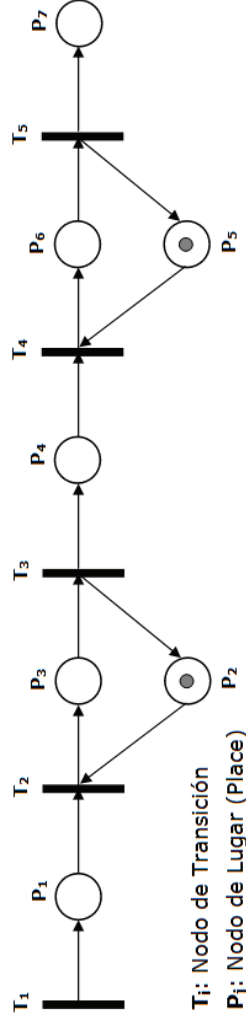


**Solución en EXCEL**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U		
1	i	X <sub>t-1</sub>	(a*X <sub>t-1</sub> +c) mod m	Número Aleatorio	Tempo entre Arribos	Hora de Arribo	Hora de Inicio 1	X <sub>t-1</sub>	(a*X <sub>t-1</sub> +c) mod m	Número Aleatorio	Tempo de Servicio 1	Cola 1	Hora de Salida 1	Hora de Inicio 2	X <sub>t-1</sub>	(a*X <sub>t-1</sub> +c) mod m	Número Aleatorio	Tempo de Servicio 2	Cola 2	Hora de Salida 2	Tempo en Sistema	
2	1	2500	390000006	0.01816	0	0	3250	507000006	0.02361	8.02	8.02	0	8.02	8.02	4600	717600006	0.03342	8.33	0	16.35	16.35	
3	1	2500	390000006	0.01816	0	0	3250	507000006	0.02361	8.02	8.02	0	8.02	8.02	4600	717600006	0.03342	8.33	0	16.35	16.35	
4	2	390000006	662221505	0.30837	17.65	17.65	17.65	507000006	0.02361	8.02	8.02	0	8.02	8.02	4600	717600006	0.03342	8.33	0	16.35	16.35	
5	3	662221505	1259135936	0.58633	8.01	25.65	27.12	6.46E+08	0.58633	0.30837	9.48	0	27.12	27.12	17.65	17.65	0.90766	10.88	0	38.00	20.36	
6	4	1.259E+09	1635166144	0.76143	4.09	29.74	37.27	1.2E+09	0.46674	0.92	7.53	7.53	47.19	52.66	1.949E+09	0.15653333	0.53628	12.18	5.47	64.84	35.09	
7	5	1.635E+09	781087340	0.36372	15.17	44.91	47.19	1E+09	0.81862	8.61	2.27	55.79	64.84	64.84	1.152E+09	0.291287651	0.97383	15.88	9.04	80.72	35.80	
8	7	81087340	140290928	0.06533	40.93	85.84	85.84	1.75E+08	0.24718	9.32	0	95.16	95.16	2.091E+09	0.1663274029	0.74752	13.51	0	108.66	22.82		
9	6	1.40290928	252640513	0.11764	32.10	117.94	117.94	5.31E+08	0.05716	8.42	0	126.36	126.36	1.77429352	0.54828	12.24	0	138.60	0	206.6	20.66	
10	8	252640513	559510561	0.26054	20.17	138.11	138.11	1.23E+08	0.67427	10.45	0	148.57	148.57	1.177E+09	0.70258415	0.21898	10.45	0	159.02	0	209.0	20.90
11	9	559510561	991210198	0.46157	11.60	149.71	149.71	1.45E+09	0.62021	10.31	0	160.02	160.02	470258415	0.10577	9.50	0	169.52	0	191.81	19.81	
12	10	991210198	996830406	0.46419	11.51	161.22	161.22	1.33E+09	0.29363	9.46	0	170.68	170.68	22135854	0.98664	16.43	0	187.11	0	258.9	25.89	
13	11	996830406	62545679	0.92224	0.27	180.00	190.17	1.44E+09	0.95301	11.67	10.17	201.84	202.42	1.18E+09	0.54940	12.25	0	202.42	0	224.22	22.42	
14	12	62545679	2109351379	0.98224	14.74	194.81	213.59	2.06E+09	0.60883	10.27	18.77	233.86	224.85	204482484	0.42540	10.35	2.49	246.82	0	246.82	44.78	
15	13	2.109E+09	2137073072	0.99515	0.07	180.07	201.84	2.05E+09	0.95946	11.74	21.77	213.59	215.47	1.504E+09	0.09522	9.38	1.88	224.85	0	246.82	44.78	
16	14	2.137E+09	803787178	0.37429	14.74	194.81	213.59	2.06E+09	0.60883	10.27	18.77	233.86	224.85	204482484	0.42540	10.35	2.49	246.82	0	246.82	44.78	
17	15	803787178	207045620	0.96413	0.55	195.36	223.86	1.3E+09	0.88414	11.20	8.04	255.87	255.87	86362711	0.36603	11.32	0	267.18	0	305.6	30.56	
18	16	2.07E+09	797621126	0.37142	14.86	210.22	233.99	1.18E+09	0.75313	10.68	23.77	244.67	246.82	438450114	0.04022	8.50	2.15	255.32	0	267.18	30.56	
19	17	797621126	369314888	0.17198	26.41	236.62	244.67	1.62E+09	0.88414	11.20	8.04	255.87	255.87	86362711	0.36603	11.32	0	267.18	0	305.6	30.56	
20	18	369314888	1761111552	0.82008	2.98	239.60	255.87	1.9E+09	0.55537	10.14	16.27	266.00	267.18	786044937	0.07888	9.17	1.18	276.36	0	267.18	30.56	
21	19	1.761E+09	581915135	0.27098	19.59	259.19	266.00	1.19E+09	0.71816	10.58	6.82	276.58	276.58	169392836	0.52310	12.12	0	288.70	0	288.70	29.51	
22	20	581915135	462730137	0.21548	23.02	282.21	282.21	1.54E+09	0.35694	9.63	0	291.84	291.84	1.123E+09	0.41158	11.55	0	303.40	0	303.40	21.19	
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34	<b>INDICADORES:</b>																					
35	31	Tempos Prom. en Cola (min.)	7.27	1.23	min.																	
36	2	Tempo Prom. en Sistema (min.)	30.19																			
37	3	Utilización de Estaciones:	76.92%																			
38	4	Velocidad de Estaciones:	0.0685	0.0659	dts./min.																	
39	5	Núm. Prom. dts. en Cola:	0.4792	0.0808	dts.																	
40																						
41	6	Núm. Máx. dts. en Sistema:	5		dts.																	
42																						
43																						
44	7	Núm. Prom. dts. en Sistema:	1.99	1.99	dts.																	
45	8	PROBABILIDAD DE ATENCIÓN:	0.6612	<- utilización Estac. 1																		

Elementos del sistema en estudio:  
 • Entidades : Clientes  
 • Eventos : Arribos, Salida de Estación 1 y Salida de Estación 2.  
 • Actividades: Estación 1 y Estación 2.  
 • Recursos : Empleado 1 y Empleado 2.

**Representación gráfica de un modelo de eventos discretos**



- T1: Arribos de los clientes
- P1: Clts. en cola módulo 1
- T2: Inicio atención mód. 1
- P2: Servidor 1 disponible
- P3: Atención en módulo 1
- T3: Fin atención módulo 1
- T4: Clts. en cola módulo 2
- T5: Inicio atención mód. 2
- P5: Servidor 2 disponible
- P6: Atención en módulo 2
- T6: Fin del proceso
- P7: Clientes atendidos

## 4

## Caso de estudio

**Partido de básquet en el coliseo<sup>1</sup>**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Modelo conceptual: diagrama de PETRI.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Calcular los indicadores de desempeño asociados al sistema en estudio.

Para un partido de básquet de exhibición, las entradas se venden en la boletería del coliseo, en una ventanilla con capacidad para atender a un cliente a vez, por lo que se forma una cola si el boleterero está ocupado. Los clientes llegan a intervalos de tiempo que se ajustan a una distribución exponencial con media de 3 minutos; considere que el primer cliente llega en el instante en que se abre la boletería. El tiempo que les toma comprar sus entradas depende de la cantidad que van a comprar; los clientes pueden comprar entre 2, 3 ó 4 entradas con probabilidades de 0.2, 0.2 y 0.6, respectivamente. El tiempo que toma comprar a cada cliente sus entradas se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\text{Uniforme}(0.3, 0.5) * \text{Número de Entradas}$$

Una vez que el cliente compra sus entradas abandona la boletería e ingresa al espectáculo. La venta de entradas en la boletería se realiza solo durante una hora previa al inicio del espectáculo, pero una vez que éste empieza, se cierra la boletería y ya no se venderán más entradas, inclusive a los clientes que en ese momento estuvieran en cola.

1. Presente el esquema del proceso indicando los eventos y entidades. Desde el punto de vista de la simulación por procesos, indique además, cuáles son las actividades y los recursos del sistema.
2. Desarrolle la simulación manual con Excel. Considere la información siguiente para la generación de números aleatorios con el algoritmo CONGRUENCIAL MIXTO:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

Donde:

$$m = (2^{31} - 1) \text{ ó } 2147483647$$

$$a = 7^5 \text{ ó } 16807$$

$$c = 0$$

$$R_i = \text{Número aleatorio raíz (o número Random)}$$

Las semillas a utilizar deben ser las siguientes:

- Para el tiempo entre llegadas:  $X_0 = 23$
- Para el número de entradas:  $X_0 = 31$
- Para el tiempo de compra:  $X_0 = 41$

3. El tiempo promedio que las personas se toman hasta entrar al espectáculo desde que llegan a comprar sus entradas.
4. Indique el número de clientes que estando en la cola no llegan a comprar sus entradas en la boletería porque la función empezó.

<sup>2</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2010-1".



## 5

## Caso de estudio

**Proceso de transformación de lotes de materia prima<sup>3</sup>**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Modelo conceptual: diagrama de PETRI.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Calcular los indicadores de desempeño asociados al sistema en estudio.

Un proceso de producción consiste en la transformación de la estructura de un cierto material. Los lotes de materia prima llegan a la planta de producción a intervalos de tiempo que se ajustan a una distribución exponencial con media de 8 minutos, llegando el primer lote al inicio de la jornada. Cada lote pasa por una primera inspección que determina si se encuentra apto para ser procesado. Se tiene registros que señalan que un 20% del material no está apto para el proceso y se descarta, el resto pasa a la operación de transformación, en la que trabaja un operario que se dedica exclusivamente a esta tarea y tiene un ritmo de trabajo que le permite atender a un lote en un tiempo uniformemente distribuido entre 5 y 8 minutos.

El producto final que se obtiene puede ser de primera calidad el 60% de las veces y de segunda el resto de las veces. El producto de primera calidad tiene un peso que varía uniformemente entre 10 y 25 kilos y se vende a razón de \$5 el kilo o fracción, mientras que el producto final de segunda calidad tiene un peso que varía entre 12 y 18 kilos pero se vende a \$3 el kilo o fracción.

1. Presente el esquema del proceso indicando los eventos y entidades. Desde el punto de vista de la simulación por procesos, indique además, cuáles son las actividades y los recursos del sistema.
2. Desarrolle la simulación manual con Excel, para procesar los 10 primeros lotes que llegan a la planta de producción. Generar los números aleatorios con el algoritmo CONGRUENCIAL MIXTO:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

*Donde:*  $m = (2^{31} - 1) \text{ ó } 2147483647$

$$a = 7^5 \text{ ó } 16807$$

$$c = 0$$

$$R_i = \text{Número aleatorio raíz (ó número Random)}$$

Las semillas a utilizar deben ser las siguientes:

- Para el tiempo entre llegadas:  $X_0 = 3217$
- Para la primera inspección:  $X_0 = 4253$
- Para el tiempo de operación:  $X_0 = 521$
- Para la calidad del producto:  $X_0 = 1279$
- Para el peso del producto final:  $X_0 = 607$

3. Utilizando su hoja de trabajo en Excel, deje indicadas las operaciones para obtener los siguientes indicadores:
  - a) El valor total del producto final obtenido.
  - b) La utilización del trabajador.

<sup>3</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2010-1".

## Solución en EXCEL

Elementos del sistema en estudio:

- Entidades:** Los lotes de materia prima.
- Eventos:** Arribos y salidas de la operación "Transformar Lote".
- Actividad:** Transformar lote de materia prima.
- Recursos:** Operario encargado de transformar lote de m.p.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	$X_{i-1}$	$X_i$	Número Aleatorio	TIEMPO ENTRE ARRIBOS	HORA DE ARRIBO	$X_{i-1}$	$X_i$	Número Aleatorio	RESULTADO 1ra INSPEC.
2	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c) \bmod m$	Número Aleatorio	ARRIBOS	ARRIBO	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c) \bmod m$	Número Aleatorio	
3	1	54068119	0.02518	0	0	4253	71480171	0.03329	0
4	2	54068119	0.15706	14.81	14.81	71480171	923875324	0.43021	1
5	3	337293352	0.78232	1.964	16.77	923875324	1265802658	0.58944	1
6	4	1680022631	0.47747	5.914	22.69	1265802658	1372265824	0.63901	1
7	5	1025368461	0.91220	0.735	23.42	1372265824	1844818835	0.85906	1
8	6	1958940499	0.39170	7.498	30.92	1844818835	501264459	0.23342	1
9	7	841174536	0.34253	8.571	39.49	501264459	173415232	0.08075	0
10	8	735578351	0.90779	0.774	40.26	173415232	454495245	0.21164	1
11	9	1949473125	0.29654	9.725	49.99	454495245	102250336	0.04761	0
12	10	636809596	0.90705	0.780	50.77	102250336	534479552	0.24889	1

SI(13>0.2,1,0)

SI(S4>0.4,1,2)

K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	HORA DE INICIO	$X_i$	Número Aleatorio	TIEMPO DE PROCESO	HORA DE SALIDA	$X_{i-1}$	$X_i$	Número Aleatorio	CALIDAD
2	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c) \bmod m$	Número Aleatorio	PROCESO	SALIDA	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c) \bmod m$	Número Aleatorio	
3	521	8756447	0.00408	6.59	21.40	1279	21496153	0.01001	2
4	14.81	8756447	0.53119	7.01	28.41	21496153	508590775	0.23683	1
5	21.40	1140716733	0.67037	7.87	36.28	508590775	900240365	0.41921	1
6	28.41	1439614762	0.95672	5.23	43.00	900240365	1317521440	0.61352	1
7	36.28	2054537832	0.57173	7.07	48.23	1317521440	878957863	0.40930	2
8	43.00	1227782311	0.07774	7.92	55.30	878957863	104795728	0.04880	2
9		166936954	0.51025		63.22	104795728	365209956	0.17006	
10	48.23	1095742896	0.68852	7.07		365209956	575467366	0.26797	2
11		1478580047	0.91343			575467366	1761157921	0.82010	
12	55.30	1961570492	0.97500	7.92		1761157921	1014071646	0.47221	1

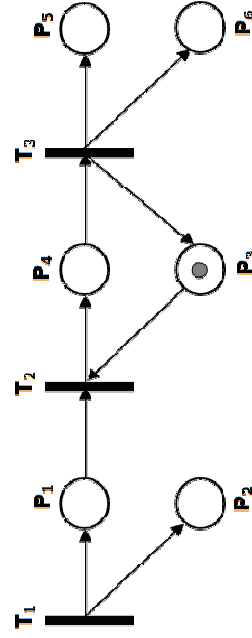
Representación de un modelo de eventos discretos

UTILIZACIÓN: 76.58%

MAX(F12:P10)

U	V	W	X	Y	Z
1	$X_{i-1}$	Número Aleatorio	PESO	PRECIO PRODUCCIÓN	VALOR DE LA PRODUCCIÓN
2	$X_{i-1}$	$(a * X_{i-1} + c) \bmod m$	PESO	PRECIO PRODUCCIÓN	VALOR DE LA PRODUCCIÓN
3	607	10201849	0.00475	3	51.18
4	10201849	1811268030	0.84344	5	98.93
5	1811268030	1401083985	0.65243	5	80.05
6	1401083985	860346540	0.40063	5	79.23
7	860346540	836902529	0.38971	3	52.35
8	836902529	1950400700	0.90823	5	
9	1950400700	1194177092	0.55608	3	
10	1194177092	152220382	0.07088	5	
11	152220382	714936697	0.33292	3	
12	714936697	770061514	0.35859	5	
<b>TOTAL:</b>					<b>\$475.91</b>

T<sub>i</sub>: Conjunto de nodos tipo Transición  
P<sub>j</sub>: Conjunto de nodos tipo lugar (Place)



- T<sub>1</sub>: Arribos de lotes de m.p.
- P<sub>1</sub>: Lotes de m.p. en Cola
- P<sub>2</sub>: Lotes de m.p. no aptos (20%)
- T<sub>2</sub>: Inicio de la actividad transformar lote
- P<sub>3</sub>: Recurso libre (operario)
- P<sub>4</sub>: Lote de m.p. siendo procesado
- T<sub>3</sub>: Fin de la actividad transformar lote
- P<sub>5</sub>: Lotes procesados calidad 1
- P<sub>6</sub>: Lotes procesados calidad 2 (40%)

## 6

## Caso de estudio

**Turismo vivencial por el río Amazonas<sup>4</sup>**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Modelo conceptual: diagrama de PETRI.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Calcular los indicadores de desempeño asociados al sistema en estudio.

Una empresa ofrece un paseo por un paraje exótico de la selva peruana, a través de un importante río de la zona. Los pasajeros van llegando al puerto con distribución exponencial con una media de 5 minutos y antes de iniciar el paseo, sin hacer cola, deben leer las recomendaciones y colocarse los implementos de seguridad necesarios, lo que toma 6 minutos al 70% de los pasajeros que son aquellos que ya conocen el lugar y 12 minutos a aquellos que vienen por primera vez. Luego, los pasajeros se dirigen hacia el muelle de salida, donde esperarán según orden de llegada; cada vez que se alcance siete pasajeros esperando en el muelle, recién suben a la embarcación e inmediatamente inician el paseo. Considere que siempre hay un barco disponible para la atención del servicio y que el tiempo que tardan los pasajeros en abordar la nave es despreciable.

El paseo completo, hasta regresar al muelle de salida, toma un tiempo que varía uniformemente entre 40 y 70 minutos, luego de lo cual los pasajeros bajan de la embarcación en un tiempo igualmente despreciable.

1. Presente el esquema del proceso e identifique a los eventos y entidades. Desde el punto de vista de la simulación por procesos, indique además, cuáles son las actividades y los recursos del sistema.
2. Desarrolle la simulación manual con Excel, para observar lo que ocurre con los primeros 21 pasajeros en llegar al sistema. Generar los números aleatorios raíz con el algoritmo CONGRUENCIAL MIXTO:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

Donde:

$$m = (2^{31} - 1) \text{ ó } 2147483647$$

$$a = 7^5 \text{ ó } 16807$$

$$c = 0$$

$$R_i = \text{Número aleatorio raíz (número Random)}$$

Utilizar la semilla:  $X_0 = 98342$

Con esta semilla se deberá generar una única lista de números aleatorios "Ri" y utilizarlos ordenadamente, de la siguiente manera:

- para los tiempos entre llegadas,
- para leer las recomendaciones de seguridad y
- para calcular los tiempos de viaje.

3. Responder las preguntas siguientes y construir los indicadores de desempeño solicitados:
  - a) ¿Cuánto duró el experimento de simulación?
  - b) ¿Cuál es el tiempo promedio de espera de los pasajeros?
  - c) ¿Cuál es el número promedio de personas en espera?
  - d) ¿Cuál es el tiempo promedio en el sistema de los pasajeros?
  - e) ¿Cuál fue el número promedio de personas en el sistema, durante la simulación?

# Solución en EXCEL

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
ARRIBOS AL PUERTO		LECTURA DE INSTRUCCIONES				ORDENADA		VIAJE		SALIDAS			
Número Aleatorio	TIEMPO ENTRE ARIBOS	HORA DE ARIBO	Número Aleatorio	LECTURA INSTRUCCIÓN	FIN DE LECTURA	HORA DE ARRIBO	FIN DE LECTURA	Número Aleatorio	TIEMPO DE VIAJE	HORA DE SALIDA	TIEMPO EN COLAS	TIEMPO EN SISTEMA	
1	1.31	1.31	0.602079	6*	7.31	1.31	7.31			90.81	17.43**	89.50	
2	1.86	3.17	0.141012	12	15.17	4.69	10.69			90.81	14.05	86.12	
3	1.52	4.69	0.985765	6	10.69	7.48	13.48			90.81	11.25	83.32	
4	2.80	7.48	0.744346	6	13.48	3.17	15.17			90.81	9.57	87.64	
5	4.64	12.12	0.229845	12	24.12	16.60	22.60			90.81	2.14	74.21	
6	0.61	12.74	0.011287	12	24.74	12.12	24.12			90.81	0.61	78.69	
7	3.86	16.60	0.698590	6	22.60	12.74	24.74	0.869133	66.07	90.81	0.00	78.07	
8	0.45	17.05	0.208751	12	29.05	22.06	28.06			101.61	17.96	79.55	
9	5.01	22.06	0.485439	6	28.06	17.05	29.05			101.61	16.97	84.56	
10	2.82	24.88	0.771112	6	30.88	24.88	30.88			101.61	15.14	76.73	
11	5.09	29.97	0.079619	12	41.97	35.17	41.17			101.61	4.85	66.43	
12	4.05	34.02	0.152303	12	46.02	35.75	41.75			101.61	4.27	65.85	
13	1.15	35.17	0.755207	6	41.17	29.97	41.97			101.61	4.05	71.64	
14	0.58	35.75	0.764694	6	41.75	34.02	46.02	0.519524	55.59	101.61	0.00	67.59	
15	3.23	38.98	0.210266	12	50.98	40.25	46.25			140.05	34.61	99.80	
16	1.27	40.25	0.942043	6	46.25	38.98	50.98			140.05	29.88	101.07	
17	8.78	49.03	0.920009	6	55.03	49.03	55.03			140.05	25.83	91.02	
18	14.50	63.53	0.598568	12	69.53	63.53	69.53			140.05	11.33	76.52	
19	0.74	64.27	0.135556	12	76.27	64.27	76.27			140.05	4.59	75.78	
20	4.59	68.86	0.298088	12	80.86	73.37	79.37			140.05	1.49	66.68	
21	4.51	73.37	0.960247	6	79.37	68.86	80.86	0.639678	59.19	140.05	0.00	71.19	

\* =SI(D4>0.3,6,12)  
 \*\* =SI(I0-I4

Elementos del sistema en estudio:

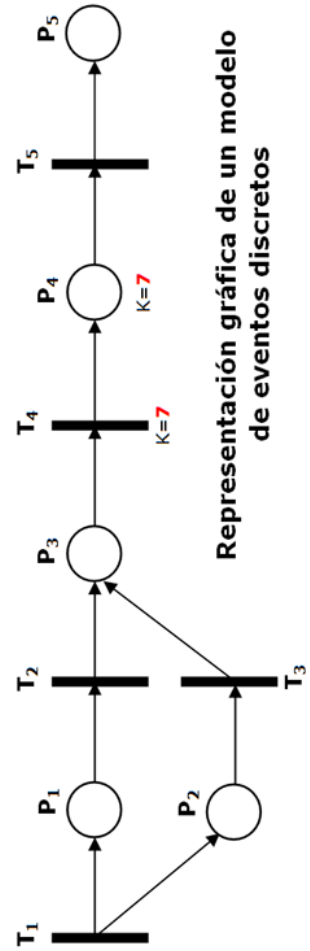
- **Entidades:** Pasajeros.
- **Atributo de entidad:** Tiempo de lectura de instrucciones.
- **Eventos:** Arribos, Salida de Lectura, Salida de Cola y Salida del Sistema.
- **Actividades:** (1) Leer Instrucciones.  
(2) Viajar por el Amazonas.
- **Recursos:** No hay recursos, por ello no hay ninguna disputa entre las entidades por tomar algún recurso. En todo caso, se podría considerar al barco como un recurso, pero con capacidad infinita.

**Nota:** Existe un evento extra, que se programa en el calendario, para terminar la simulación.

TIEMPO DE SIMULACIÓN:	140.05
TIEMPO PROM. EN ESPERA (min.):	10.76
NUM. PROM. PERSONAS EN ESPERA:	1.61
TIEMPO PROM. EN SISTEMA (min.):	79.62
NUM. PROM. PERSONAS EN SISTEMA:	11.94

T<sub>i</sub>: Conjunto de nodos tipo **Transición**  
 P<sub>j</sub>: Conjunto de nodos tipo lugar (**Place**)

- T<sub>1</sub>: Arribos de los pasajeros al puerto
- P<sub>1</sub>: Pasajeros expertos leyendo instrucciones (70%)
- P<sub>2</sub>: Pasajeros inexpertos leyendo instrucciones
- T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>: Arribo de los pasajeros al muelle de embarque
- P<sub>3</sub>: Pasajeros en espera en el muelle (cola FIFO)
- T<sub>4</sub>: Inicio del paseo; siete pasajeros suben al barco
- P<sub>4</sub>: Siete pasajeros realizando el paseo
- T<sub>5</sub>: Fin del paseo; los pasajeros bajan del barco
- P<sub>5</sub>: Pasajeros atendidos



**Representación gráfica de un modelo de eventos discretos**

## 7

## Caso de estudio

**Proceso de acabado en línea de producción<sup>5</sup>**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Modelo conceptual: diagrama de PETRI.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Calcular los indicadores de desempeño asociados al sistema en estudio.

Se desea simular el proceso de acabado en una línea de producción. Los productos llegan al proceso de acabado a intervalos de tiempo que se ajustan a una distribución exponencial con media de 12 minutos, inclusive el primero. La operación de acabado la realiza un operario en un tiempo que varía con distribución uniforme entre 10 y 20 minutos por producto. Luego, el propio operario determina si su trabajo es bueno o no, en un tiempo despreciable; históricamente, el 70% de las veces el trabajo de acabado fue bueno. Los productos con un acabado bueno son enviados a almacén; mientras que los defectuosos deben ser reprocesados inmediatamente por otro operario. El tiempo que se requiere para la operación de reproceso varía de la siguiente manera:

40% : Tiempo de Reproceso = 8 minutos + 50% de su tiempo de acabado original

60% : Tiempo de Reproceso = 5 minutos + 50% de su tiempo de acabado original.

Luego de la operación de reproceso, el acabado se considera bueno y el producto se envía al almacén.

1. Presente el esquema del proceso e identifique a los eventos y entidades. Desde el punto de vista de la simulación por procesos, indique además, cuáles son las actividades y los recursos del sistema.
2. Desarrolle la simulación manual con Excel, para observar lo que ocurre en el proceso de acabado de los **30** primeros productos en llegar en la línea de producción. Generar los números aleatorios raíz con el algoritmo **CONGRUENCIAL MIXTO**:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

Donde:

$$m = (2^{31} - 1) \text{ ó } 2147483647$$

$$a = 7^5 \text{ ó } 16807$$

$$c = 0$$

$$R_i = \text{Número aleatorio raíz (número Random)}$$

Utilizar la semilla:  $X_0 = 42407$

Con esta semilla se deberá generar una única lista de números aleatorios "Ri" y utilizarlos ordenadamente, de la siguiente manera:

los primeros 30 para los tiempos entre llegadas, los siguientes 30 para los tiempos de acabado, y así sucesivamente.

3. Responder las preguntas siguientes y construir los indicadores de desempeño solicitados:
  - a) ¿Es posible completar la atención de los 30 productos en 12 horas? Justifique su respuesta señalando en qué indicador se fundamenta su respuesta.
  - b) ¿Cuál es el tiempo promedio, que requiere cualquier producto, en el proceso completo de acabado?
  - c) ¿Qué cantidad de productos, en promedio, están en espera en cualquier parte del proceso?
  - d) Determine el número promedio de productos en la línea de producción, durante la simulación

<sup>5</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2011-1".





## 8

## Caso de estudio

**Estación de servicio para venta de combustible<sup>6</sup>**

## Objetivos:

- Simular manualmente sistemas discretos por eventos.
- Identificar entidades, eventos, actividades y recursos del sistema.
- Modelo conceptual: diagrama de PETRI.
- Generación de números aleatorios con el algoritmo congruencial mixto.
- Modelar distribuciones de probabilidad mediante su expresión matemática.
- Calcular los indicadores de desempeño asociados al sistema en estudio.

Una pequeña estación de servicio para la venta de combustible dispone de una isla con un único surtidor. Los arribos de los autos se ajustan a una distribución exponencial con una media de 15 minutos. El número de autos por arribo puede ser de uno ó dos autos, con una probabilidad del 90% y 10% respectivamente. Se estima que el primer arribo se producirá a los 10 minutos de iniciada la atención.

Existen dos formas de solicitar la compra. El 50% de los autos indica la cantidad de galones que desea y el resto indica el monto de dinero de su consumo; para los primeros la cantidad de combustible estará entre 5 y 10 galones con distribución uniforme y para los otros el monto estará entre 50 y 100 soles con distribución uniforme.

La atención toma un tiempo con distribución uniforme entre 30 y 50 segundos por galón. El precio por galón es de 13 soles. Se desea simular lo que ocurre con los 30 primeros arribos.

1. Presente el esquema del proceso e identifique a los eventos, entidades, actividades y los recursos del sistema.
2. Desarrolle la simulación manual con Excel, para observar el funcionamiento de la estación de servicio hasta los **30** primeros arribos. Generar los números aleatorios raíz con el algoritmo CONGRUENCIAL MIXTO:

$$X_i = (a * X_{i-1} + c) \text{ mod } m$$

$$R_i = X_i / m$$

Donde:

$$m = (2^{31} - 1) \text{ ó } 2147483647$$

$$a = 7^5 \text{ ó } 16807$$

$$c = 0$$

$$R_i = \text{Número aleatorio raíz (número random)}$$

Utilizar las semillas siguientes:

- Para el tiempo entre llegadas:  $X_0 = 42407$
- Para el número de autos por arribo:  $X_0 = 859433$
- Para la forma de compra:  $X_0 = 23209$
- Para el consumo de combustible:  $X_0 = 86243$
- Para el tiempo de atención:  $X_0 = 756839$

3. Responder las preguntas siguientes y construir los indicadores de desempeño solicitados:
  - a) Número total autos atendidos.
  - b) Tiempo requerido para atender a todos los autos recibidos.
  - c) Número promedio de autos que estuvieron esperando para recibir atención.
  - d) De acuerdo con la simulación efectuada, ¿recomendaría usted la implementación de un surtidor adicional? Justifique su respuesta con dos indicadores adicionales diferentes a los ya solicitados en las preguntas anteriores.

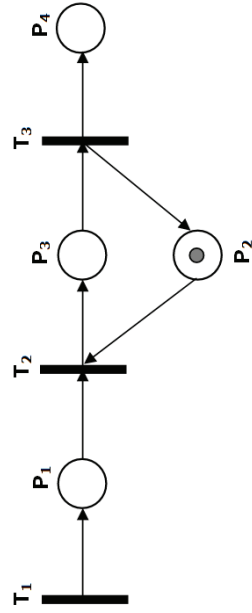
<sup>6</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2011-2".

**Solución en EXCEL**

A	D	E	F	I	J	K	L	O	P	S	T	W	X	Y	Z	AA
1	Número Aleatorio	TIEMPO ENTRE ARRIBOS	HORA DEL ARRIBO	Número Aleatorio	NUM. AUTOS POR ARRIBO	HORA DE ARRIBO	HORA DE INICIO	Número Aleatorio	FORMA DE COMPRA	Número Aleatorio	CONSUMO (GALONES)	Número Aleatorio	TIEMPO DE ATENCIÓN	HORA DE SALIDA	TIEMPO EN COLA	TIEMPO EN SISTEMA
2	1	1.97	11.97	0.72624	1	10.00	10.00	0.18164	2 *	0.67497	6.44	0.92330	5.20	15.20	0.00	5.20
3	2	46.48	58.45	0.91588	2	11.97	15.20	0.86053	1 **	0.21346	6.07	0.92804	4.91	20.11	3.24	8.15
4	3	56.04	114.49	0.14887	1	11.97	20.11	0.84392	1	0.66980	8.35	0.57644	5.78	25.89	8.15	13.92
5	4	0.93	115.42	0.05883	1	58.45	58.45	0.81091	1	0.36333	6.82	0.30719	4.11	62.56	0.00	4.11
6	5	7.72	123.14	0.74515	1	114.49	114.49	0.99481	1	0.44486	7.22	0.20230	3.67	118.16	0.00	3.67
7	6	0.32	123.46	0.75038	1	115.42	118.16	0.82376	1	0.69711	8.49	0.85162	6.65	124.81	2.74	9.39
8	7	14.36	137.81	0.69565	1	123.14	124.81	0.85850	1	0.26884	6.34	0.20029	3.60	128.40	1.67	5.27
9	8	38.40	176.21	0.74021	1	123.46	128.40	0.77121	1	0.32978	6.65	0.29345	3.97	132.38	4.95	8.92
10	9	2.84	187.27	0.74796	1	137.81	137.81	0.79028	1	0.55993	7.80	0.01250	3.93	141.75	0.00	3.93
11	10	33.12	223.24	0.91964	2	176.21	176.21	0.28742	2	0.71942	6.61	0.03667	3.39	179.60	0.00	3.39
12	11	20.64	243.88	0.34096	2	187.27	187.27	0.69972	1	0.36967	6.85	0.32883	4.17	191.45	0.00	4.17
13	12	20.64	243.88	0.57090	1	187.27	191.45	0.13458	2	0.02618	3.95	0.56762	2.72	194.17	4.17	6.89
14	13	1.57	245.45	0.04031	1	190.11	194.17	0.87472	1	0.94434	9.72	0.98159	8.04	202.21	4.05	12.09
15	14	2.39	247.84	0.41267	1	223.24	223.24	0.38411	2	0.60253	6.16	0.52156	4.15	227.39	0.00	4.15
16	15	83.20	331.04	0.69339	1	243.88	243.88	0.79109	1	0.69179	8.46	0.85041	6.63	250.50	0.00	6.63
17	16	8.48	339.52	0.82626	1	245.45	250.50	0.81179	1	0.93377	9.67	0.76462	7.30	257.80	5.06	12.35
18	17	9.16	348.68	0.92861	1	247.84	257.80	0.70606	1	0.93633	9.68	0.02870	4.93	262.74	9.96	14.89
19	18	10.62	359.31	0.07527	1	331.04	331.04	0.66720	1	0.91467	9.57	0.28755	5.70	336.75	0.00	5.70
20	19	372.28	451.13	0.06298	2	339.52	339.52	0.69384	1	0.91597	9.58	0.91770	7.72	347.24	0.00	7.72
21	20	5.96	431.04	0.42472	1	348.68	347.24	0.34149	2	0.67509	6.44	0.81220	4.97	352.21	7.72	12.69
22	21	52.81	451.13	0.22349	1	372.28	352.21	0.43198	2	0.24290	4.78	0.66742	3.45	355.66	3.53	6.98
23	22	19.78	450.82	0.13250	1	359.31	359.31	0.30788	2	0.33903	5.15	0.37285	3.22	362.52	0.00	3.22
24	23	0.31	451.13	0.96310	1	372.28	372.28	0.55890	1	0.11261	5.56	0.49340	3.70	375.97	0.00	3.70
25	24	7.65	458.77	0.82797	1	378.23	378.23	0.50061	1	0.63461	8.17	0.62623	5.79	384.02	0.00	5.79
26	25	9.49	468.26	0.74921	1	431.04	431.04	0.68736	1	0.97114	9.86	0.10325	5.27	436.30	0.00	5.27
27	26	46.56	514.81	0.98011	2	450.82	450.82	0.49000	2	0.91857	7.38	0.24910	4.30	455.12	0.00	4.30
28	27	5.03	535.10	0.66196	1	451.13	455.12	0.41315	2	0.32807	5.11	0.61596	3.60	458.72	4.30	7.91
29	28	5.03	540.13	0.53553	1	458.77	458.72	0.80520	1	0.93307	9.67	0.37351	6.04	464.76	7.60	13.63
30	29	7.40	547.53	0.57526	1	468.26	464.76	0.92907	1	0.03253	5.16	0.53724	3.51	468.26	5.99	9.49
31	30	7.40	547.53	0.33616	2	468.26	468.26	0.93251	1	0.78044	8.90	0.38831	5.60	473.87	0.01	5.61
32	31	7.40	547.53	0.33616	2	468.26	468.26	0.93251	1	0.79938	9.00	0.30703	5.42	479.29	5.61	11.03
33	32	7.40	547.53	0.33616	1	514.81	514.81	0.63615	1	0.24554	6.23	0.20216	3.53	518.35	0.00	3.53
34	33	7.40	547.53	0.33616	1	535.10	535.10	0.27153	2	0.73353	6.67	0.66127	4.80	539.91	0.00	4.80
35	34	7.40	547.53	0.33616	1	540.13	540.13	0.60390	1	0.48206	7.41	0.99509	6.16	546.29	0.00	6.16
36	35	7.40	547.53	0.33616	1	547.53	547.53	0.72446	1	0.90997	9.55	0.47745	6.29	553.83	0.00	6.29
37	36	7.40	547.53	0.33616	1	547.53	547.53	0.72446	1	0.90997	9.55	0.47745	6.29	553.83	0.00	6.29

\* SI(J7>0.4, 4, SI(J7>0.2, 3, 2))  
 \*\* UNIF(0.3,0.5)\*NUMERO DE ENTRADAS

**Representación gráfica de un modelo de eventos discretos**



**Elementos del sistema en estudio:**

**1. Entidades:** Autos

Atributos de entidad: Forma de compra y consumo.

**2. Eventos:** Arribos a la estación de servicio y Salidas.

**3. Actividades:** Atención al vehículo.

**4. Recursos:** Surtidor de combustible.

**Nota:** Existe un evento extra, que se programa para terminar la simulación.

T<sub>i</sub>: Conjunto de nodos tipo Transición  
 P<sub>j</sub>: Conjunto de nodos tipo lugar (Place)

T<sub>1</sub>: Arribos de los vehículos

P<sub>1</sub>: Vehículos en cola

T<sub>2</sub>: Inicio de la atención al vehículo

P<sub>2</sub>: Recurso libre (surtidor)

P<sub>3</sub>: Vehículo siendo atendido

T<sub>3</sub>: Fin de la atención al vehículo

P<sub>4</sub>: Vehículos atendidos (salientes)

3a) TOTAL AUTOS:	35
3b) TIEMPO TOTAL (minutos):	553.83
3c) NUM PROM AUTOS EN COLA:	0.142
3d) % UTILIZACIÓN DEL SERVIDOR:	31.10%
TIEMPO PROM. EN SISTEMA:	7.17



Final de capítulo

## Casos propuestos

### Caso 1: Venta, compra y control de inventarios de *tablets*.

Importaciones Hirakawa es una empresa que se dedica a la comercialización de tabletas electrónicas. Sus clientes, en su mayoría, son comerciantes que compran el producto al por mayor; el tiempo entre los arribos de los clientes al establecimiento se comporta de acuerdo a una distribución EXPO(5) minutos; considerar que el primer cliente llega al inicio del experimento. La cantidad que compran los clientes se ajusta a una distribución UNIF(1,5) unidades por persona. Se dispone de un vendedor para la atención, quien demora entre 5 y 7 minutos uniformemente distribuido, por cada uno.

La empresa emplea un sistema de revisión para realizar un nuevo pedido. Así, al término de la transacción del cliente, si la cantidad en stock es menor que el punto de reorden de 7 unidades, entonces el sistema emitirá automáticamente un pedido al almacén de un lote de 15 unidades. Suponer que la reposición es inmediata, es decir, el tiempo desde que se emite la orden de pedido hasta que llega la mercadería es despreciable. Se dispone de un inventario inicial de 10 unidades.

Desarrolle la simulación manual con Excel, para observar la dinámica de los 16 primeros clientes. Considere la información siguiente para la generación de números aleatorios con el algoritmo CONGRUENCIAL MIXTO y tómelos en forma ordenada y secuencial, según sus necesidades:

Semilla:  $X_0 = 23$ ;  $m = (2^{31} - 1)$  ó 2147483647;  $a = 7^5$  ó 16807;  $c = 0$

1. Determine los siguientes indicadores de desempeño:

- Venta total
- Tiempo promedio en cola
- Utilización promedio del vendedor
- Número promedio de personas en la tienda

2. Genere el calendario de eventos y obtenga los siguientes indicadores:

- Inventario promedio (indicador ponderado por el tiempo).
- Máximo número de personas en la tienda, durante la simulación

### Caso 2: Simulación del funcionamiento de un semáforo.

En el cruce de dos avenidas existe un semáforo para controlar el tráfico; se desea simular la dinámica de los vehículos que van en una sola dirección que llamaremos A. El semáforo se inicia con luz verde para los vehículos en la dirección A; luego de cinco minutos cambia a luz roja y permanece así durante cinco minutos, luego el ciclo se repite en forma alternada. Los tiempos entre arribos de los vehículos en la dirección A

se ajusta a una distribución EXPO (3) minutos. Si un vehículo llega al cruce y encuentra luz verde, entonces pasa, de lo contrario se detiene y espera. Considere que todos los vehículos en espera, cruzan el semáforo durante la luz verde, nadie se queda.

Una vez que el vehículo cruza el semáforo se encuentra con que un tramo de la vía está siendo reparada y por cuestiones de seguridad, el paso de los vehículos debe ser de uno en uno (FIFO), así, una vez que un auto hizo todo el recorrido del tramo en mantenimiento, entonces recién puede pasar el siguiente auto. El tiempo de recorrido de este tramo se ajusta a una distribución UNIF(1,3) minutos.

1. Realice una simulación manual para los eventos que ocurran durante los primeros 30 minutos. Presente una matriz en Excel con la sucesión de eventos.
2. Determine la cantidad máxima de vehículos, que se encuentran en espera frente al semáforo en un determinado instante, durante la simulación. Determine el tiempo promedio de espera de los vehículos, durante la luz roja.
3. Presente el calendario de eventos y determine el número promedio de vehículos en todo el sistema, desde que un auto llega al semáforo hasta que éste termina de pasar el tramo en reparación.

**Caso 3: Proceso de producción con estaciones de trabajo en serie.**

A un planta de producción llegan piezas para ser procesadas en una secuencia de dos operaciones en serie; en cada estación de trabajo labora un operario. Los tiempos entre arribos y los tiempos de servicio de las piezas se muestran a continuación:

Tiempo entre Arribos	0	2.1	5.7	0.3	1.5	2.8	5	1.4	3.2	2.1
Tiempo de servicio 1	9.1	8.2	8.5	6.1	8.8	9.4	8.2	7.3	6.5	8.3
Tiempo de servicio 2	10.2	7.3	9.8	6.5	7.3	10.6	9.2	7.4	8.2	9.1

Realizar una simulación manual, en base a una sucesión de eventos. Considere que, el experimento terminará a los 95 minutos.

1. Identifique a las entidades, actividades, eventos y recursos del sistema en estudio.
2. Crear la matriz de trabajo en Excel y determine los siguientes indicadores de desempeño:
  - Tiempo promedio de espera en la cola 1.
  - Tiempo promedio en el sistema.
  - Utilización de la estación 2.
  - Velocidad de atención en las estaciones 1 y 2.
  - Crear la matriz del calendario de eventos.
  - Número promedio y máximo de piezas en las colas de espera durante la simulación.
  - Número promedio y máximo de piezas en el sistema durante la simulación.
  - ¿Cuál es la probabilidad de que una pieza llegue a la planta y sea procesada inmediatamente?



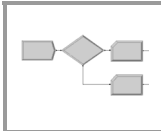
## Capítulo 2

# Modelado de sistemas discretos por procesos - Módulos básicos

- Módulo Create
- Módulo Process
- Módulo Assing
- Módulo Dispose
- Parámetros para ejecutar el modelo
- Módulo Decide
- Módulo Record
- Módulo de datos: Conjunto de recursos
- Módulo de datos Expression
- Módulo Batch
- Módulo Separate
- Módulo Seize
- Módulo Delay
- Módulo Release
- Módulo Store
- Módulo Unstore
- Modelo básico de inventarios

El proceso de modelado se inicia con el estudio y el análisis del sistema, para ello es necesario desarrollar un modelo conceptual de cómo trabaja dicho sistema, que luego será traducido en el modelo de simulación, con el que se podrá predecir, controlar y mejorar el desempeño del sistema. Para la construcción del modelo se explican las herramientas básicas del software Arena que nos permitirá representar el sistema como un sistema virtual por procesos, cuyas variables discretas cambian de valor con la ocurrencia de eventos en el sistema.





Para realizar proyectos de simulación es necesario contar con la herramienta de software que permita desarrollar el modelo de simulación. La elección de la herramienta correcta es un factor crítico importante que debe ser evaluada de acuerdo con los requerimientos propios del usuario. En términos generales, para la selección del software de simulación es importante establecer criterios de calidad como algoritmos fiables y ausencia de errores, capacidad de modelar sistemas de cualquier tamaño y complejidad, interfase de animación, flexibilidad en el ingreso de los datos para el modelo, flexibilidad en la generación de reportes, fácil de usar e intuitivo (“amigable”), soporte técnico y costo total, entre los principales criterios. En nuestro caso utilizaremos el software Arena como un vehículo para lograr el modelado de sistemas discretos y continuos, validar los datos de entrada y ajustarlos a una distribución que los represente, definir el experimento de simulación y, finalmente, realizar el análisis estadístico de los resultados.

## 1. MÓDULO CREATE

Este módulo es usado para generar una o más entidades que ingresarán al modelo del sistema. En este se especifica el tiempo entre arribos de las entidades, el número de entidades por arribo y la hora en que debe aparecer la primera entidad que ingresa al sistema.

*Ejemplo:*

The image shows a diagram of an arrival process and a screenshot of the 'Create' module configuration window in Arena. The diagram on the left shows a box labeled 'ARRIBOS' with an arrow pointing to a circle, representing an arrival process. The 'Create' window on the right has the following settings:

- Name: ARRIBOS
- Entity Type: PIEZAS
- Time Between Arrivals: Type: Random (Expo), Expression: 15, Units: Minutes
- Entities per Arrival: 2
- Max Arrivals: 300
- First Creation: UNIF(15, 20)

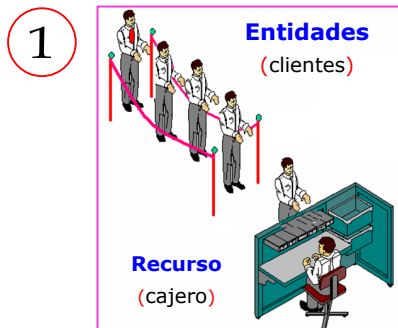
Callouts provide additional context:

- Intervalo entre llegadas de las piezas: Exponencial (15) minutos
- Las piezas llegan en lotes de dos unidades
- Se ha programado 300 arribos (600 piezas)
- Hora estimada del primer arribo

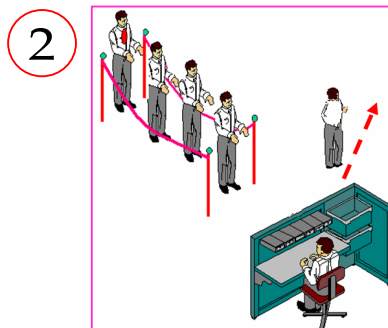
## 2. MÓDULO PROCESS

Este módulo ejecuta la actividad que debe realizar la entidad en el sistema. Cuando una entidad ingresa al módulo Process, lo esencial es saber el impacto en términos de consumo de tiempo, utilización del recurso o cualquier otra lógica que impacte el desempeño del sistema. La actividad puede ser solo un retardo o Delay, por ejemplo un desplazamiento. Pero también puede ser una operación que consume recursos del sistema, como el servicio de atención al cliente por medio de un empleado.

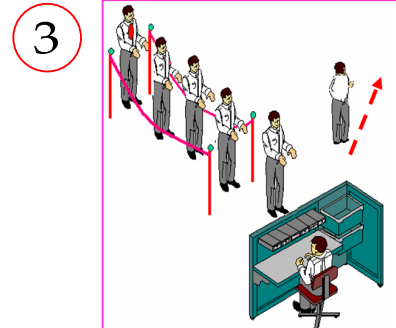
En la secuencia siguiente se aprecia el proceso que debe realizar la entidad para que sea procesada o atendida por el recurso o servidor. En primer término, si la demanda por el recurso excede la capacidad, entonces la entidad forma cola hasta que el recurso quede disponible. Cuando esto sucede, la primera entidad en cola toma el recurso; a esta acción se le denomina Seize; luego, la entidad será atendida durante un tiempo, al cual denominaremos Delay. Al final de su atención, la entidad libera el servidor para que este pueda atender a la siguiente entidad en cola; a esta acción se le denomina Release.



**Recurso ocupado**

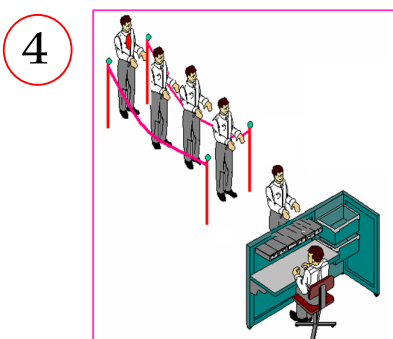


**Recurso disponible**



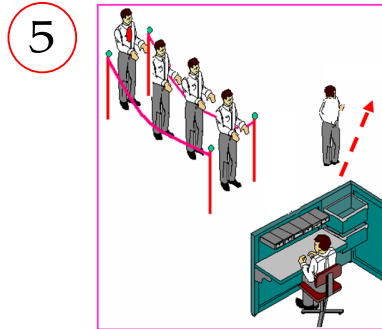
**Seize**

La siguiente entidad en cola toma el recurso disponible.



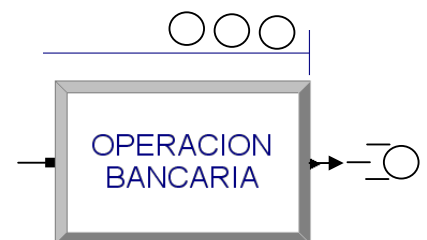
**Delay**

Duración de la actividad. Tiempo que tarda el cajero en atender al cliente.



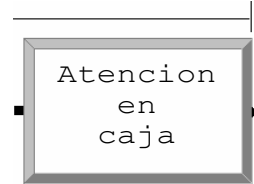
**Release**

Terminada la actividad se libera el recurso, entonces este queda disponible nuevamente, para ser asignado a la siguiente entidad.



**Ejemplo 1:** Atención en caja

- **Duración:** Dist. uniforme (10, 20) minutos
- **Recursos :** 5 cajeros
- **Regla de selección** (en cola): FIFO (*First Input First Output*)



**Process**

Name: ATENCION EN CAJA Type: Standard

Logic

Action: Seize Delay Release Priority: Medium(2)

Resources: Resource, CAJERO, 1

Buttons: Add... Edit... Delete

Delay Type: Uniform Units: Minutes Allocation: Value Added

Minimum: 10 Maximum: 20

Report Statistics

Buttons: OK Cancel

**Resources**

Type: Resource

Resource Name: CAJERO Quantity: 1

Buttons: Cancel OK

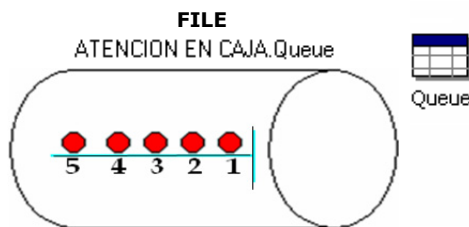
En la ventana superior se aprecian los requerimientos de recursos y la cantidad. Según sea el caso, se puede adicionar una lista de requerimientos de recursos. Por ejemplo:

Action: Seize Delay Release

Resources:

Resource, MAESTRO DE OBRA, 1  
Resource, AYUDANTE, 2  
Resource, PEONES, 5

En nuestro ejemplo de atención en caja, el módulo Process se vincula con los módulos de datos Queue y Resource; en el primero definimos la regla bajo la cual se ordenarán las entidades en cola; por defecto es la regla FIFO, los primeros que llegan serán los primeros en salir; en el segundo definimos la capacidad del recurso. Veamos ambos módulos:



Queue - Basic Process

	Name	Type
1	ATENCION EN CAJA.Queue	First In First Out

Criterios de ordenamiento o prioridad en cola de espera

- First In First Out
- Last In First Out
- Lowest Attribute Value
- Highest Attribute Value

Resource - Basic Process

	Name	Type	Capacity
1	CAJERO	Fixed Capacity	5

Definir capacidad del recurso

Al ejecutar el modelo de simulación se obtiene una serie de estadísticas en diferentes aspectos sobre el desempeño del sistema, por ejemplo, información sobre las entidades y recursos:

**Wait Time:**  
Tiempo promedio de espera en cola.

Entity			
Time			
VA Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
CLIENTES	14.9934	14.4525	15.5428
Wait Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
CLIENTES	2.4101	0.00	29.5500
Total Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
CLIENTES	17.4036	14.4525	44.6879

**Tiempo promedio en sistema**

**Value Added Time:**  
Tiempo efectivo o tiempo promedio en atención.

Número de entidades que salieron del sistema:

Entity	
Other	
Number Out	Value
CLIENTES	150.00

Uso de los recursos:

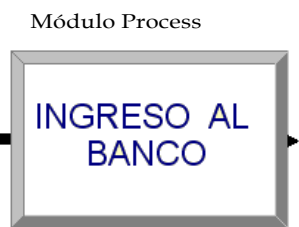
- 48.29% del tiempo total estuvo activo.
- Atendió a un total de 29 clientes.

Resource Usage	
Instantaneous Utilization	Average
CAJERO	0.4829
Total Number Seized	Value
CAJERO	29.00

**Ejemplo 2:**

Representar la siguiente actividad:

- Proceso: Ingreso y desplazamiento hasta la cola.
- Duración: Distribución uniforme (1.5, 2) minutos

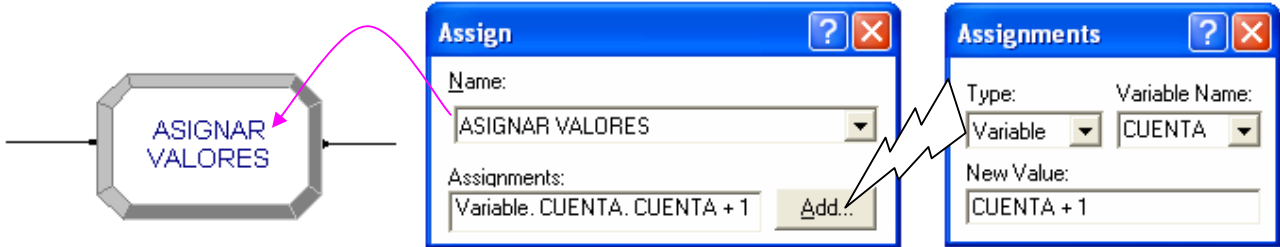


En este caso, el desplazamiento de la entidad no consume recursos, pero sí existe un retardo o Delay.

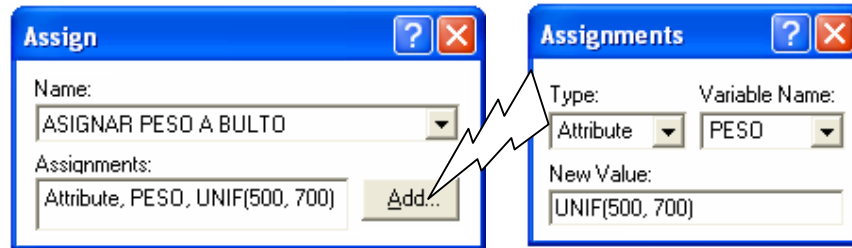
### 3. MÓDULO ASSIGN

Mediante este módulo se asignan valores a Variables, Atributos, Arreglos, Tipos de Entidad y otros.

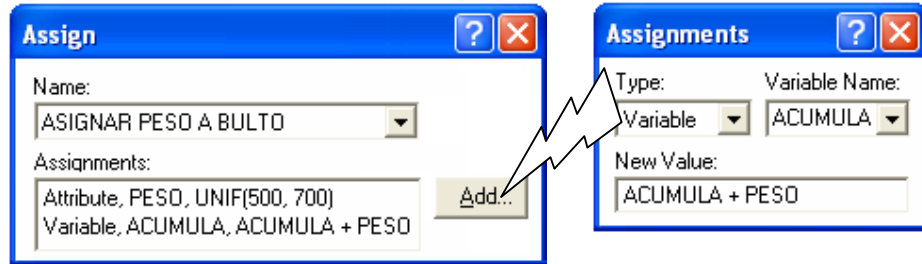
*Ejemplo 1:*



*Ejemplo 2:*

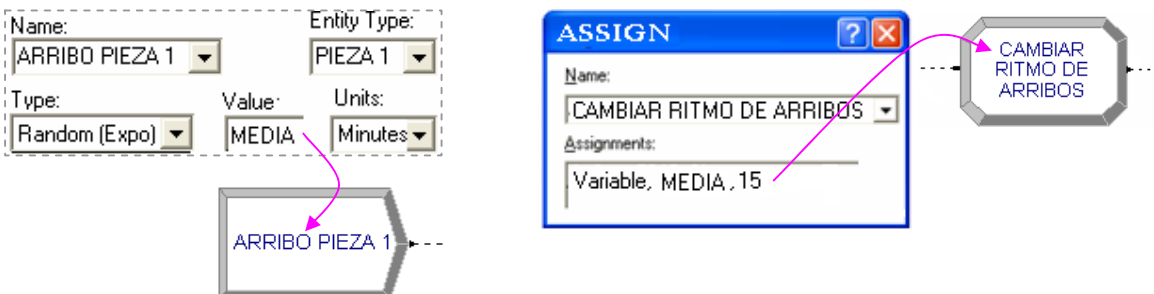


*Ejemplo 3:*



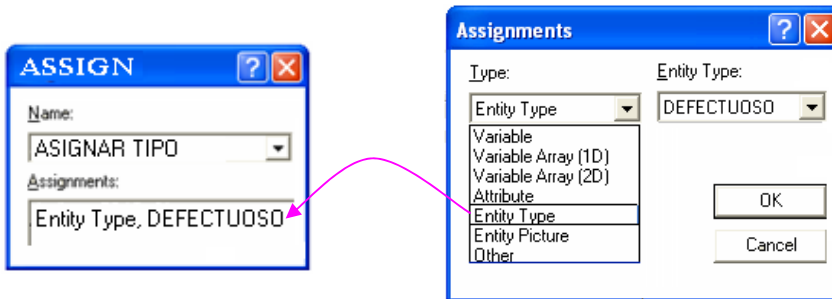
*Ejemplo 4:*

En este ejemplo se ilustra el cambio de ritmo o variación en el tiempo entre arribos al sistema de las entidades. Suponga que al inicio la Media tiene un valor de 20, posteriormente una condición hace que se cambie de ritmo, para una Media = 15.

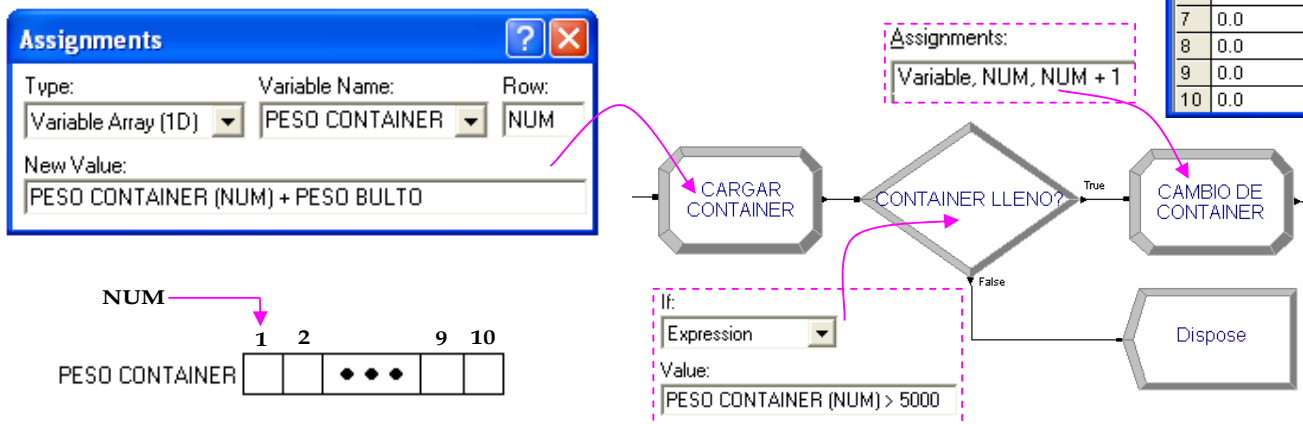
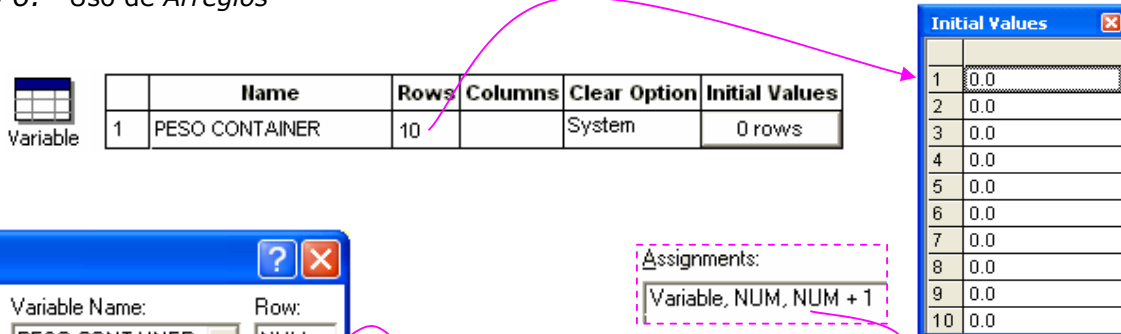


**Ejemplo 5: Uso del Entity Type**

A los productos que no pasaron el control de calidad se le asigna el estatus de "defectuoso".

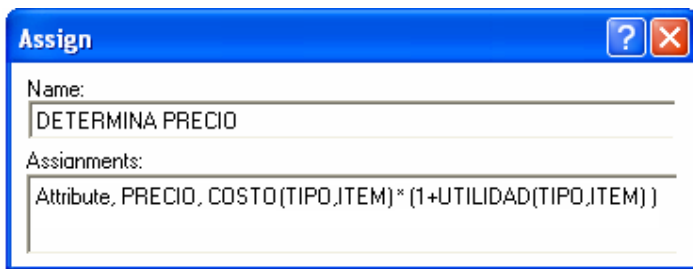


**Ejemplo 6: Uso de Arreglos**



**Ejemplo 7: Asignar valores leídos del módulo Expression**

Lectura y asignación de costos y porcentajes de utilidades:



Costo

Item	1	2	3
1	5.1	3.5	1.75
2	2.15	4.3	3.2

Utilidad

Item	1	2	3
1	0.30	0.15	0.20
2	0.18	0.25	0.22

El orden de los atributos en el módulo Assign es importante, ya que la secuencia comienza leyendo el costo de la entidad y luego se determina su precio, incrementando un porcentaje de ganancia al costo. Tipo e item son dos atributos ya definidos.

## Operadores

Operadores matemáticos	Referencia	Prioridad
**	Potencia	1
/	División	2
*	Multiplicación	2
-	Resta	3
+	Suma	3
<b>Operadores relacionales</b>		
.EQ. , ==	Igualdad	4
.NE. , <>	Diferente	4
.LT. , <	Menor que	4
.GT. , >	Mayor que	4
.LE. , <=	Menor o igual que	4
.GE. , >=	Mayor o igual que	4
<b>Operadores lógicos</b>		
.AND. , &&	Conjunción	5
.OR. ,	Inclusive <i>disjunction</i> (or)	5

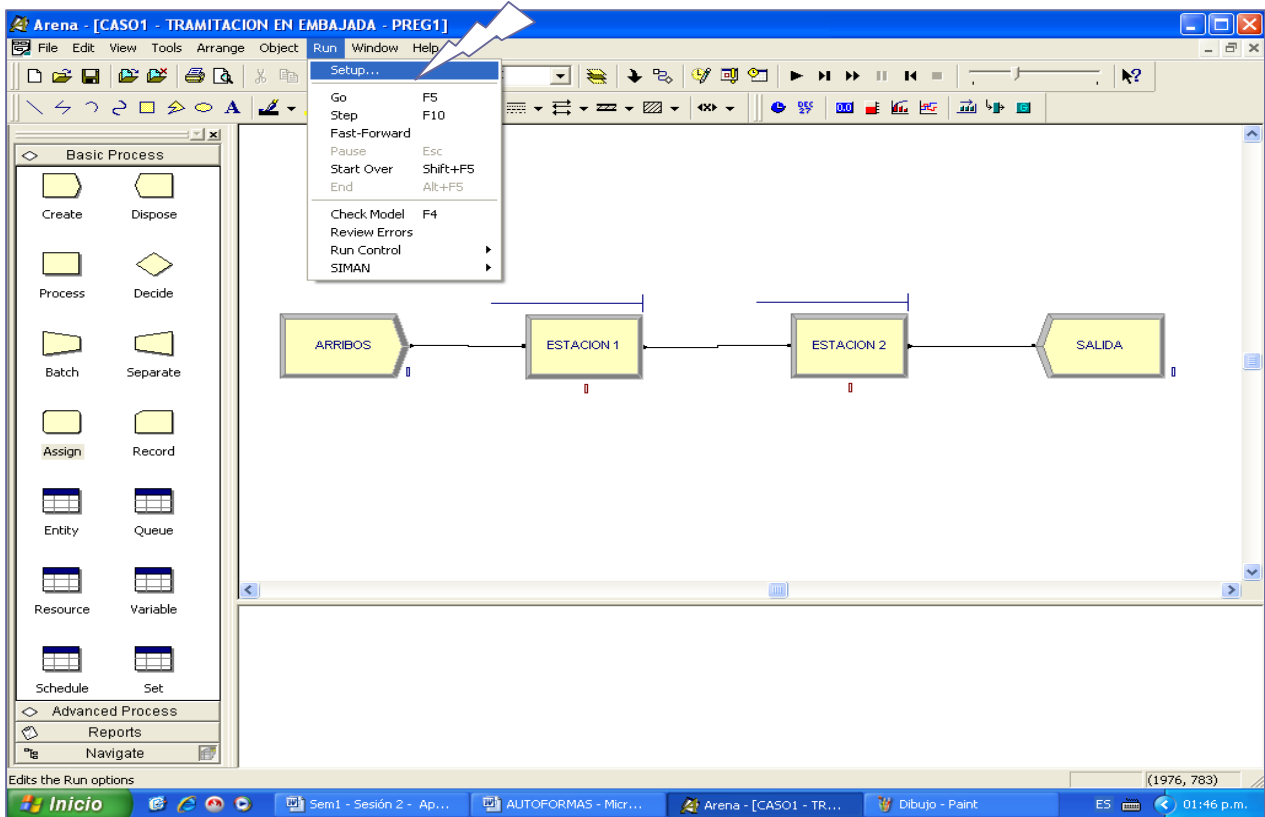
## 4. MÓDULO DISPOSE

De la misma manera que el módulo Create representa el ingreso de las entidades al sistema, el módulo Dispose representa la salida, es decir, el primer módulo las crea y el segundo las elimina. Hay una variable que va contabilizando el número de entidades que pasan por el módulo dispose, para nuestro ejemplo de abajo, dicha variable toma el nombre de Salida.NumberOut. Luego se puede hacer referencia a ella en alguna expresión o en una condición.



## 5. PARÁMETROS PARA EJECUTAR EL MODELO

Para realizar el experimento de simulación debemos configurar la ejecución del modelo; por ejemplo, definir el número de réplicas por ejecutar, el período de calentamiento por considerar, la duración de la simulación, el número de horas por día que se está considerando, la inclusión de alguna condición de finalización durante la ejecución, entre otros.



### 5.1 Duración de la simulación

El tema de la longitud o extensión que tendrá la simulación es un aspecto importante que se debe definir cuando se realiza el diseño del experimento de simulación. Esta materia se abordará con detalle en el capítulo "Análisis de la información de salida del modelo". Sin embargo, podemos adelantar que la duración de la simulación dependerá de si esta es de estado estable o de estado transitorio.

#### 5.1.1 Estado transitorio

La simulación es de estado transitorio cuando el sistema empieza vacío y después de un tiempo de funcionamiento el sistema queda vacío, entonces la simulación termina por ausencia de eventos. Esta condición puede programarse de tal manera que se incluya en el modelo y controle e impida el ingreso de más entidades a una determinada hora. Cuando esto sucede, las entidades en proceso que todavía están en el sistema, irán saliendo una a una, hasta que el sistema queda vacío, entonces la simulación ter-



mina. Finaliza porque ya no se generan más eventos, pues ya no hay entidades dentro del sistema. El sistema terminó como empezó, es decir vacío.

Un ejemplo de esta situación puede ser restringir el ingreso de entidades a un máximo de 50 (Max Arrivals) en el módulo Create. En esta situación no se sabe con exactitud en qué instante terminará la simulación, sin embargo ésta finalizará cuando salga del sistema la última entidad.

### 5.1.2 Estado estable

La simulación es de estado estable cuando su funcionamiento no tiene término, o tiende a ser infinito. Imagínese el funcionamiento del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, o el funcionamiento de una estación de bomberos, o el funcionamiento de la comisaría de un distrito, o las diferentes estaciones climáticas que tenemos todos los años, o el funcionamiento del tanque de agua de un edificio; en estos casos, el funcionamiento se realiza durante las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 12 meses del año y siguen funcionando.

En este contexto, la simulación se ejecuta por un período predeterminado, asegurándonos de que sea suficiente para lograr los objetivos del estudio. Por lo general, se alcanza un estado estable, después de un período de calentamiento o *Warm-up* que parte de las condiciones iniciales. Es importante definir este período en el experimento de simulación, para recortar y no considerar las estadísticas que se generan en dicho periodo, por no ser representativas.

## 5.2 Configuración del experimento de simulación en Arena

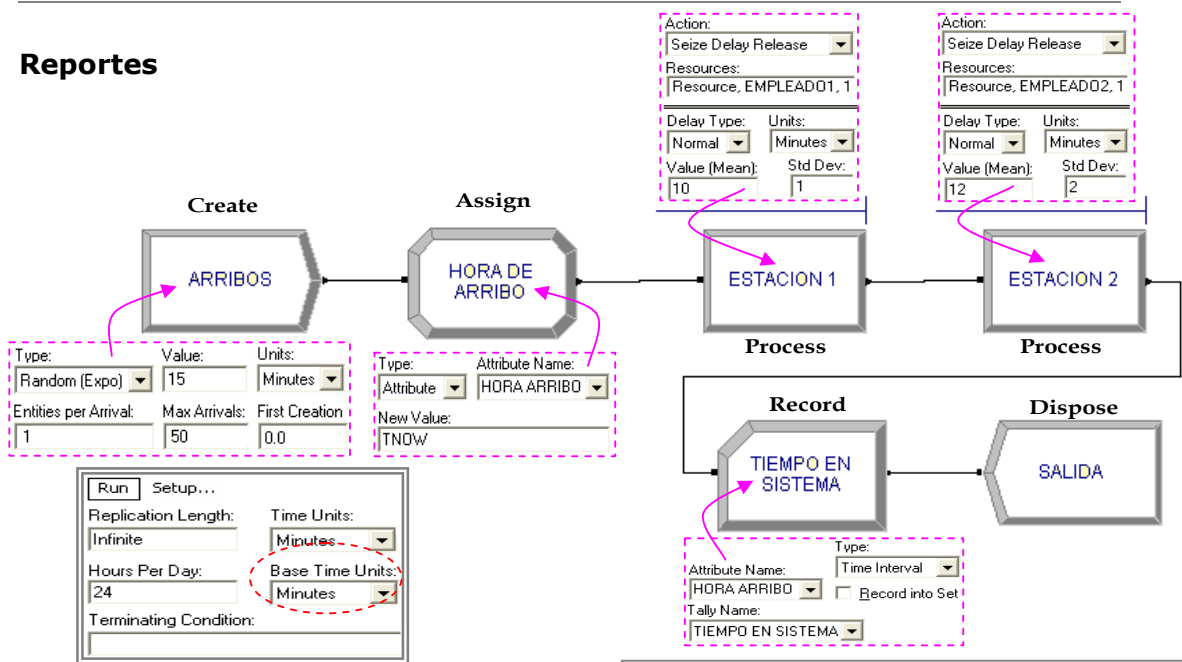
The image shows the 'Setup...' dialog box in Arena, specifically the 'Replication Parameters' tab. The dialog contains the following fields and options:

- Number of Replications:** A text input field.
- Start Date and Time:** A date and time selector showing 'lunes .01 de enero de 2007 0:00:00'.
- Warm-up Period:** A text input field.
- Replication Length:** A text input field.
- Hours Per Day:** A text input field with '24' entered.
- Terminating Condition:** A text input field.
- Initialize Between Replications:** A section with two checked checkboxes: 'Statistics' and 'System'.
- Time Units:** A dropdown menu set to 'Hours'.
- Base Time Units:** A dropdown menu set to 'Minutes'.

Callout boxes provide the following explanations:

- Número de ejecuciones al modelo (réplicas). Cada réplica es una muestra.** (Number of executions to the model (replicas). Each replica is a sample.)
- Fecha y hora de inicio de la simulación.** (Start date and time of the simulation.)
- Tiempo o período de calentamiento, hasta que el sistema logra estabilidad. No se recolecta estadísticas en este.** (Time or warm-up period, until the system achieves stability. Statistics are not collected during this time.)
- Duración de la simulación.** (Duration of the simulation.)
- Si se activa, entonces el sistema se inicia vacío, sin entidades y con recursos inactivos.** (If activated, the system starts empty, with no entities and resources inactive.)
- Si se activa, entonces borra estadísticas al final de cada réplica o ejecución al modelo.** (If activated, it erases statistics at the end of each replica or execution.)
- Unidad de tiempo base, que se está considerando, para el modelo.** (Base time unit being considered for the model.)
- Condición para que finalice la simulación.** (Condition for the simulation to end.)

# Reportes



Unnamed Project			
Replications:	1	Time Units:	Minutes
Key Performance Indicators			
System		Average	
Number Out			50

Queue			
Time			
Waiting Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
ESTACION 1.Queue	4.4685	0.00	18.4213
ESTACION 2.Queue	2.4568	0.00	11.7150
Other			
Number Waiting	Average	Minimum Value	Maximum Value
ESTACION 1.Queue	0.2191	0.00	2.0000
ESTACION 2.Queue	0.1205	0.00	1.0000

Utilización: 49.61%  
 Capacidad ociosa: 50.39%

Resource			
Usage			
Instantaneous Utilization	Average	Minimum Value	Maximum Value
EMPLEADO1	0.4961	0.00	1.0000
EMPLEADO2	0.5847	0.00	1.0000
Total Number Seized			
	Value		
EMPLEADO1	50.0000		
EMPLEADO2	50.0000		

Utilización: 58.47%  
 Capacidad ociosa: 41.53%

Entity				
Time				
VA Time	Average	Time en proceso	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	22.0379		16.2382	28.6017
NVA Time	Average	Timeo que no estuvo en proceso	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00		0.00	0.00
Wait Time	Average	Timeo en espera	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	6.9253		0.00	29.0907
Transfer Time	Average	Timeo en traslados	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00		0.00	0.00
Other Time	Average	Timeo en otras tareas	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00		0.00	0.00
Total Time	Average	Total	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	28.9632		17.2010	51.3258
Other				
Number In	Value			
Entity 1	50.0000			
Number Out	Value			
Entity 1	50.0000			
WIP	Average	Minimum Value	Maximum Value	
Entity 1	1.4204	0.00	5.0000	
Work in Process				

User Specified			
Tally			
Interval	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO EN SISTEMA	28.9632	17.2010	51.3258

## 1

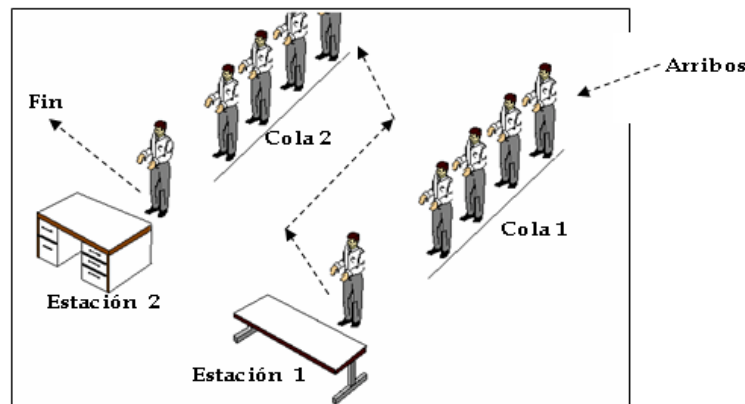
## Caso de estudio

**Tramitación en embajada**

## Objetivos:

- Construcción de modelos de simulación utilizando el software Arena.
- Estado transitorio de la simulación.
- Módulos: Create, Assign, Process, Record y Dispose.
- Atributos y variables globales.
- Interpretación del reporte de resultados.

Se requiere modelar un sistema de atención a clientes que arriban a una Embajada para realizar trámites documentarios. Véase la gráfica siguiente:

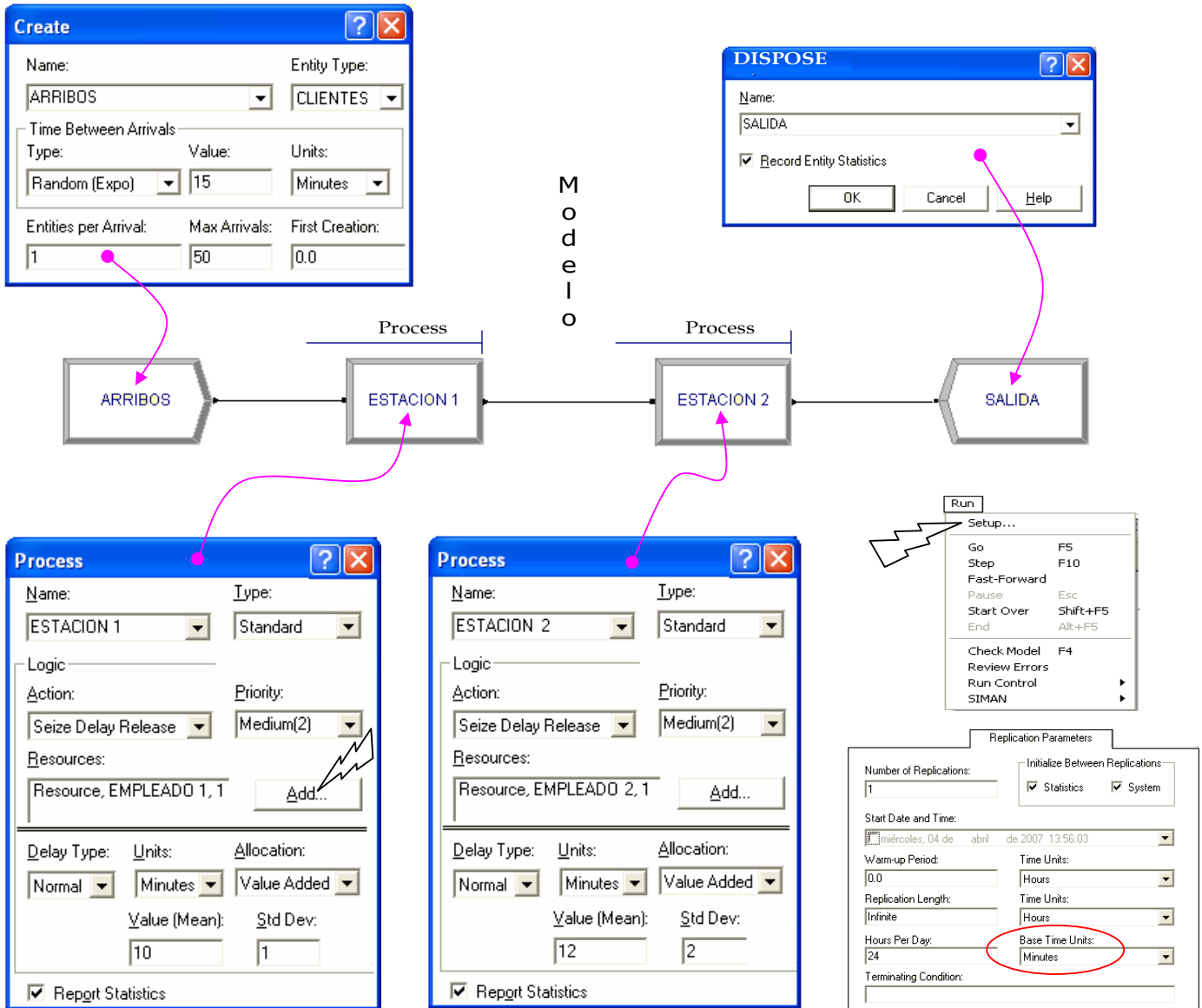


La llegada de los clientes se ajusta a una distribución de probabilidad exponencial con una media de 15 minutos entre llegadas; por lo general llegan a la Embajada muchos clientes, pero hay directivas de dejar pasar y atender solamente a los primeros 50. Existen dos estaciones de trabajo organizadas en serie. Cada cliente debe pasar por ambas estaciones para concluir su gestión. El tiempo de atención en la Estación 1 se ajusta a una distribución Normal con una media de 10 minutos y una desviación estándar de 1 minuto. Todo cliente que termina de ser atendido en la primera estación debe pasar a la cola de la Estación 2, cuyo tiempo de atención es una Normal con media de 12 y desviación de 2 minutos. El horario de atención comienza a las 8 a.m.; cuando el cliente termina de ser atendido en la Estación 2, este finaliza su gestión y se retira de la Embajada. Se pide:

1. Modelar el sistema descrito y simular hasta que se atiendan todos los clientes.
2. Determinar el número promedio de personas en la Embajada: Work in Process.
3. Determinar el tiempo promedio que permanece un cliente en la Embajada.
4. Supóngase que el 35% desapruueba el trámite en la Estación 2. Realizar los cambios en el modelo y determinar cuántos aprobaron y cuántos desaprobaron.
5. Respecto de la pregunta 1, suponga que ya no se podrá atender a 50 clientes, pues solo se atenderá hasta las 4:00 p.m. Los clientes que salgan después de las 3:00 p.m. lo harán por una puerta auxiliar. ¿Cuántos clientes salen por la puerta auxiliar?
6. Respecto de la pregunta 1, suponga que se permitirá el ingreso de todos los clientes que lleguen a la Embajada, pero se atenderá solo a 17 personas. Hacer un balance In→Out.

## Solución

### 1. Formulación del modelo de simulación:



### Indicadores de desempeño del sistema:

Entity	
Number In	Value
CLIENTES	50.0000
Number Out	Value
CLIENTES	50.0000
WIP	Average
CLIENTES	1.4204

**Work in Process**

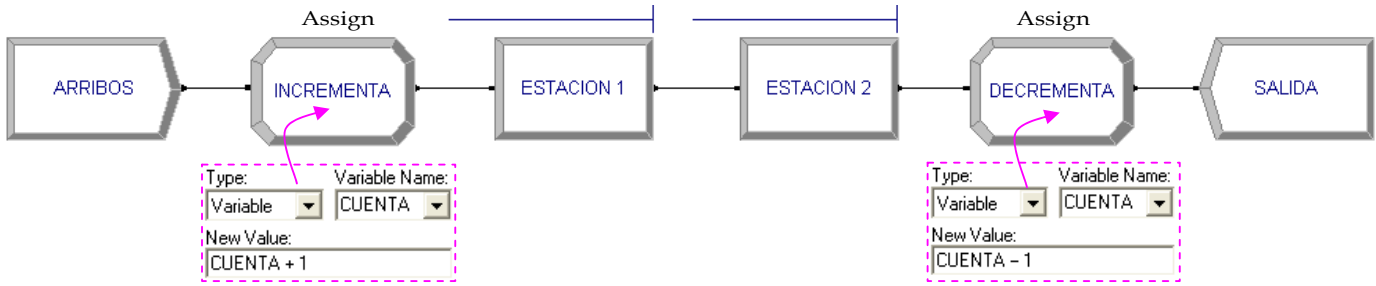
  

Queue			
Waiting Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
ESTACION 1.Queue	4.4685	0.00	18.4213
ESTACION 2.Queue	2.4568	0.00	11.7150
Number Waiting	Average	Minimum Value	Maximum Value
ESTACION 1.Queue	0.2191	0.00	2.0000
ESTACION 2.Queue	0.1205	0.00	1.0000

Resource	
Instantaneous Utilization	Average
EMPLEADO1	0.4961
EMPLEADO2	0.5847
Total Number Seized	Value
EMPLEADO1	50.0000
EMPLEADO2	50.0000

2. Agregaremos la variable Cuenta para que cargue y descargue el número actual de entidades en el sistema:



Variable - Basic Process

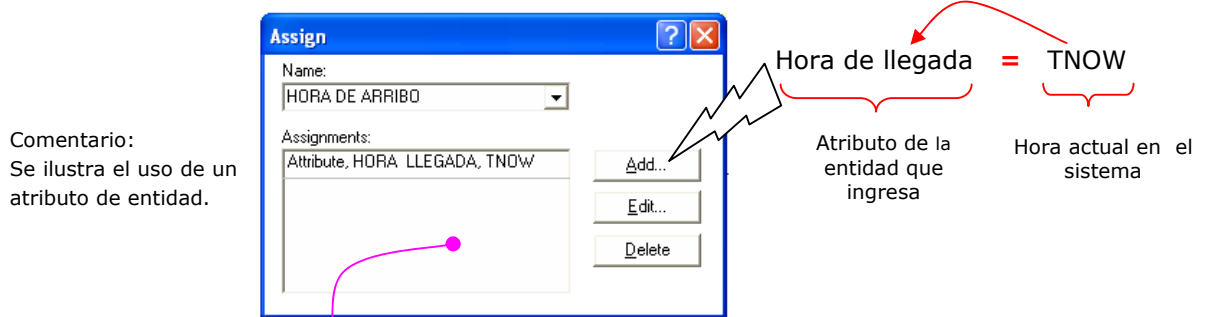
	Name	Rows	Columns	Clear Option	Initial Values	Report Statistics
1	CUENTA			System	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

User Specified

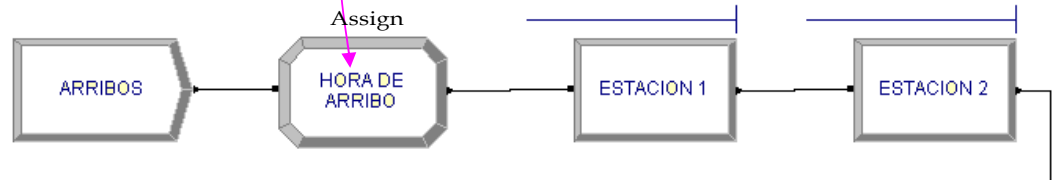
Variable	Average	Minimum Value	Maximum Value
CUENTA	1.4204	0.00	5.0000

Comentario: El valor promedio de la variable 1.4204 significa el número promedio de clientes en la Embajada durante la simulación. Se llegó a un máximo de 5 clientes y en algún momento estuvo vacío.

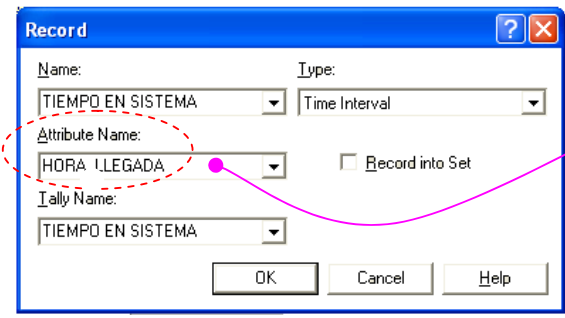
3. Determinación del tiempo promedio de permanencia en el sistema de las entidades:



Comentario: Se ilustra el uso de un atributo de entidad.



**Tiempo en sistema = Hora entrada - Hora salida**

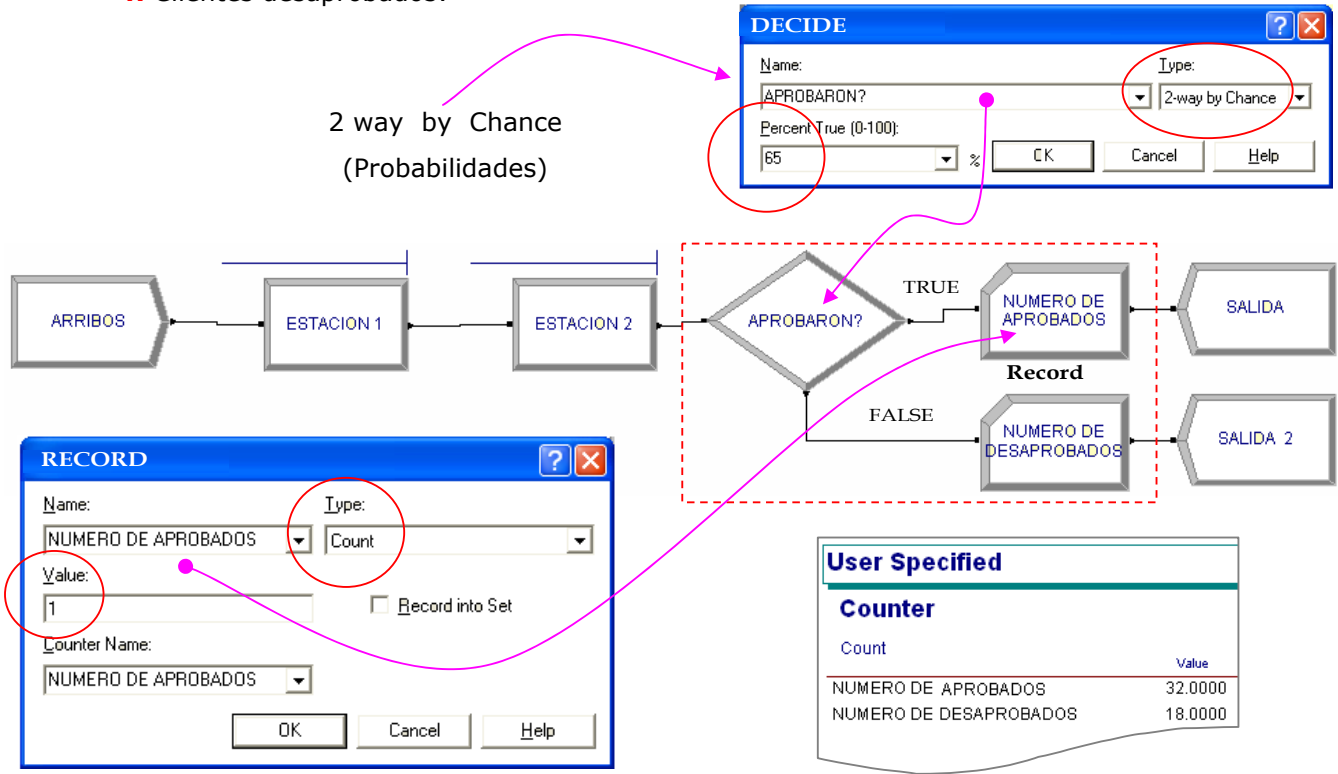


User Specified

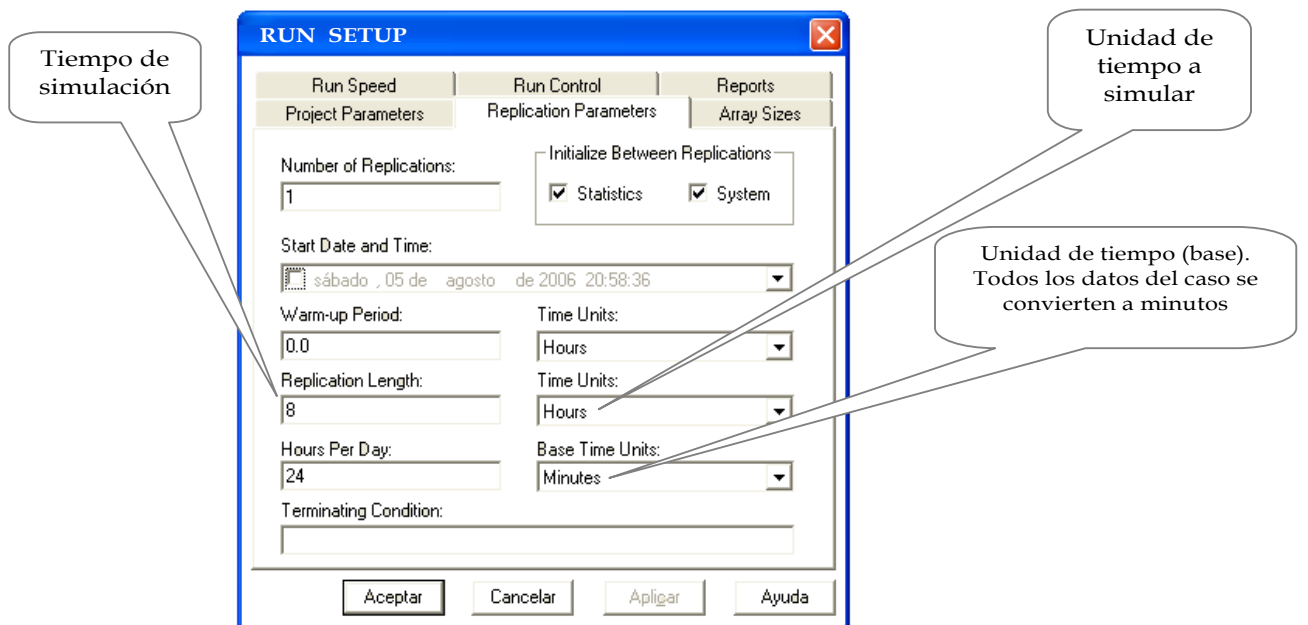
Interval	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO EN SISTEMA	28.9632	17.2010	51.3258

Comentario: El tiempo promedio que los clientes permanecen en la embajada es de 28.96 minutos. Este incluye los tiempos en cola y en servicio. La persona que se demoró más permaneció 51.3258 minutos.

4. Clientes desaprobados:

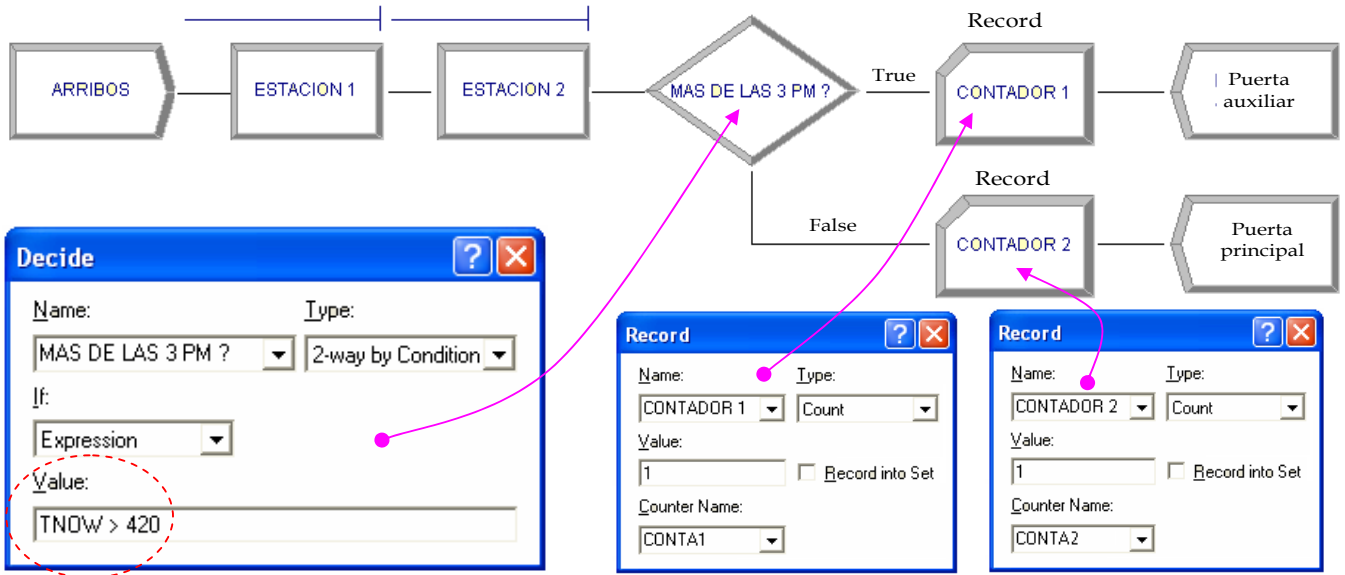


5. Clientes atendidos en 8 horas: 8:00 a.m.– 4:00 p.m.



Comentario:

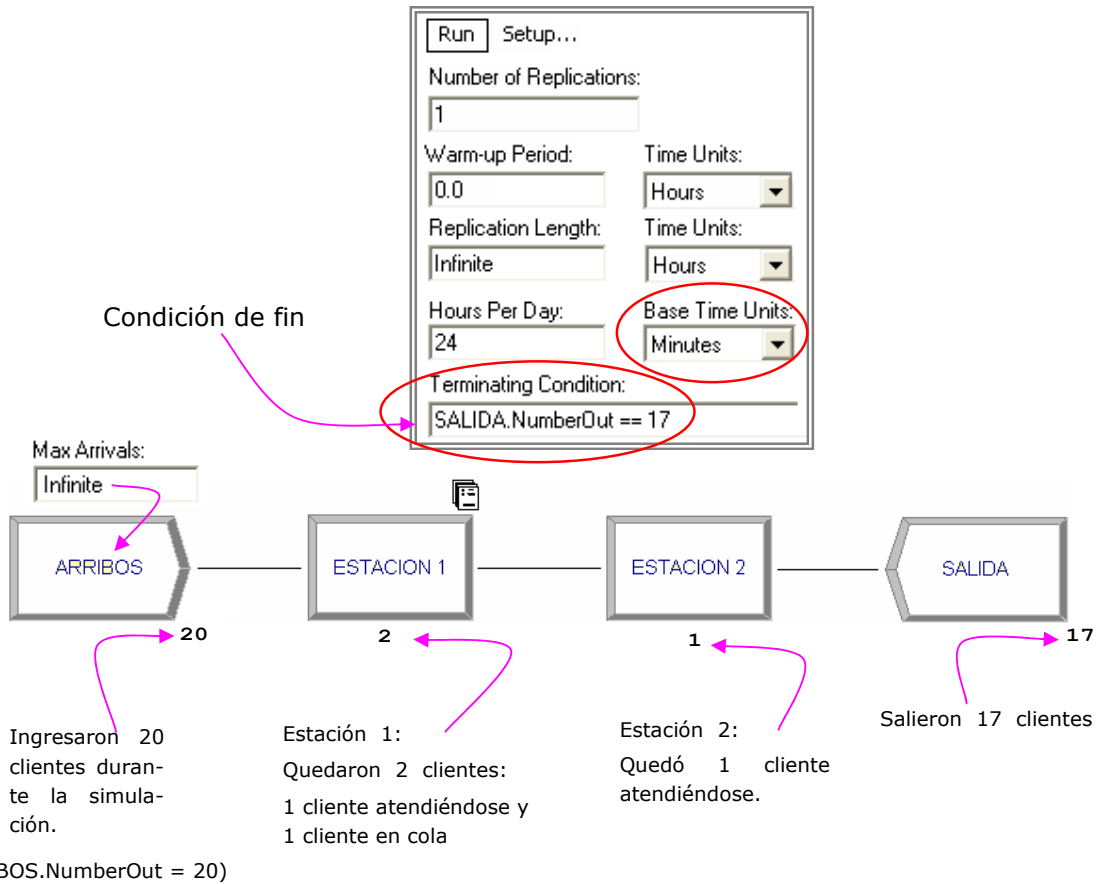
La finalización de la simulación se producirá cuando hayan transcurrido 8 horas. En el módulo Create borrar el valor 50 (Max. Arrivals).



Comentario: El número de personas que salió por la puerta principal fue 22. Durante la última hora de la jornada solo 5 personas salieron por la puerta auxiliar.

User Specified	
Count	Value
CONTA1	5.0000
CONTA2	22.0000

6. Cambiar Create y colocar Condición de finalización en Run Setup:

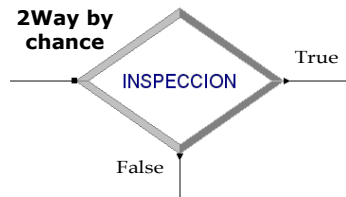


## 6. MÓDULO DECIDE

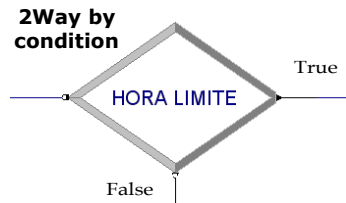
Este módulo se utiliza en los procesos de toma de decisiones en el sistema. Incluye opciones para tomar decisiones basadas en una o más condiciones o en una o más probabilidades. Las condiciones pueden basarse en valores de tributos, valores de variables, tipos de entidad o expresiones.

El módulo Decide posee una entrada y dos salidas. Si la expresión evaluada es verdadera (True) entonces la entidad sale hacia la derecha; de lo contrario, sale hacia abajo (False).

*Ejemplo 1:* El 85% aprueba la inspección.



*Ejemplo 2:* Evalúa si alcanzó hora límite.

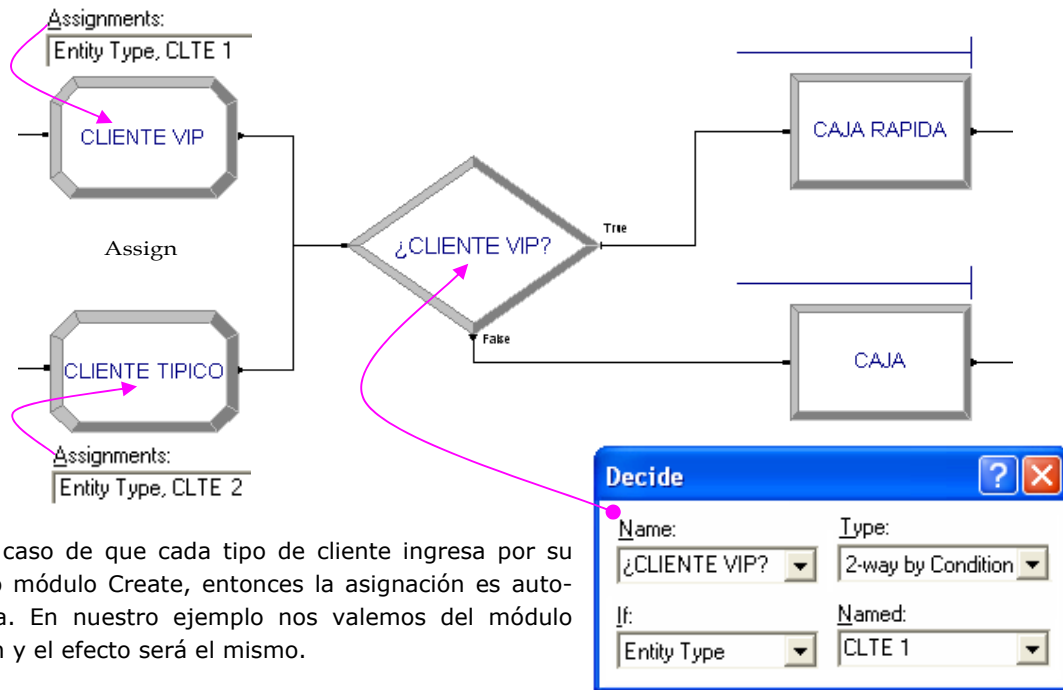


*Ejemplo 3:* Expresión con operador lógico.

Suponga que en un supermercado se dispone de una caja temporal, que se activa en las horas de mayor congestión, definidas entre las 8 a.m. y las 10 a.m., y después de las 12 m. Así, la expresión planteada en el módulo Decide será verdadera si una de las dos condiciones es verdadera. En algunas situaciones es necesario el uso de operadores lógicos como .AND. (&&) y/o .OR. (||).

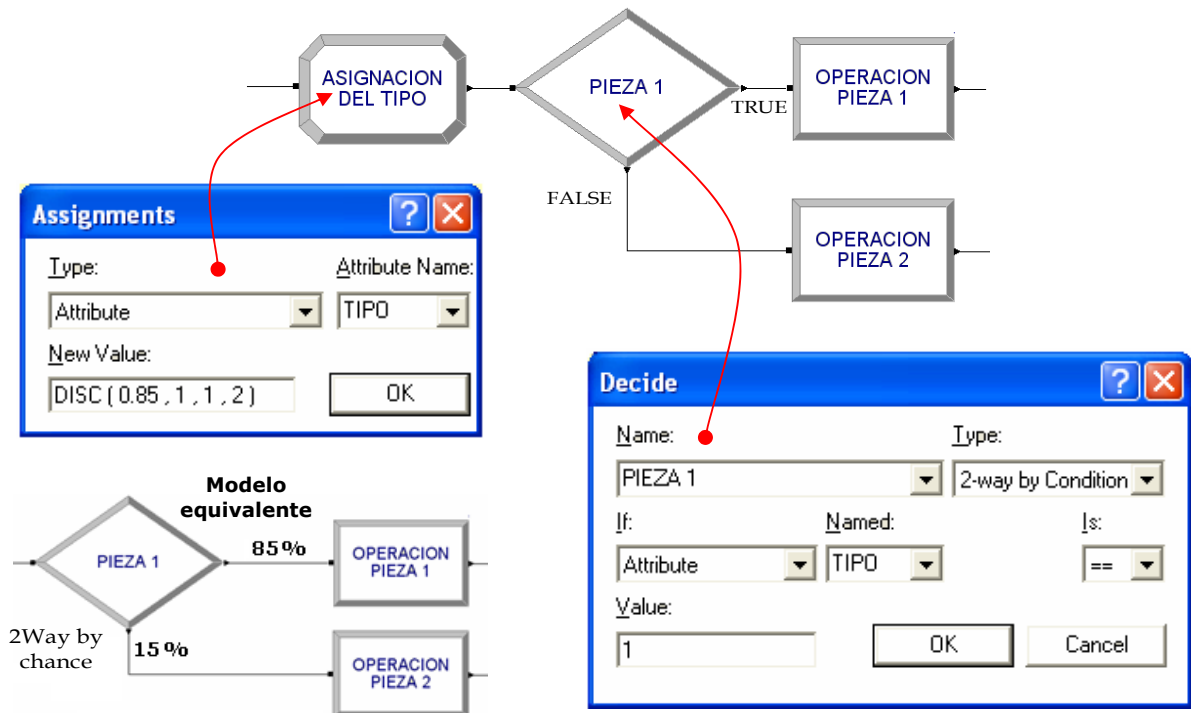


Ejemplo 4: Evalúa el tipo de la entidad.



En el caso de que cada tipo de cliente ingresa por su propio módulo Create, entonces la asignación es automática. En nuestro ejemplo nos valemos del módulo Assign y el efecto será el mismo.

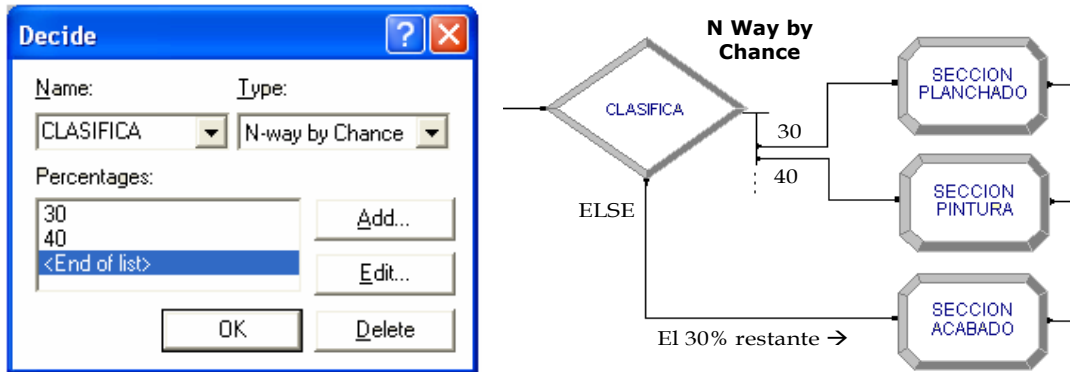
Ejemplo 5: Evalúa tipo de la entidad.



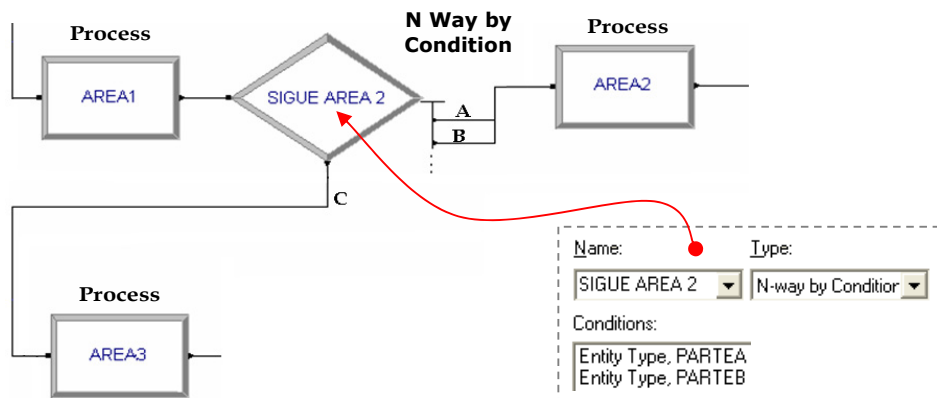
La función Disc asigna, en forma aleatoria, un valor a un atributo de acuerdo con la probabilidad especificada. Para el ejemplo, se asigna el valor 1 o 2 al atributo Tipo, proporcionalmente según un 85% y 15%, respectivamente. Sintaxis:

Disc(Prob1, Tipo1, Prob1+Prob2, Tipo2,..... , Prob. acumulada, TIPOi)

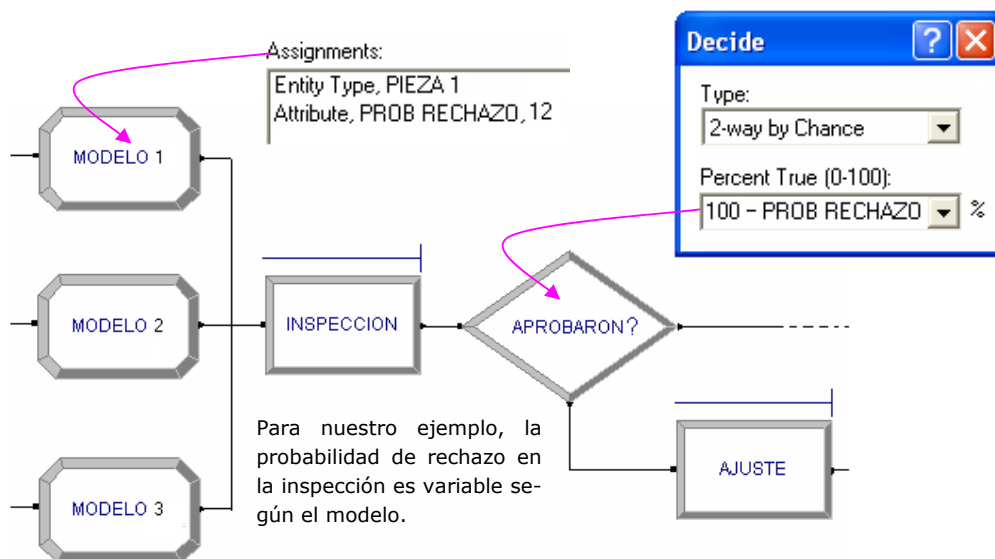
Ejemplo 6: Ruteo múltiple probabilístico de entidades.



Ejemplo 7: Distribución múltiple condicional de entidades.

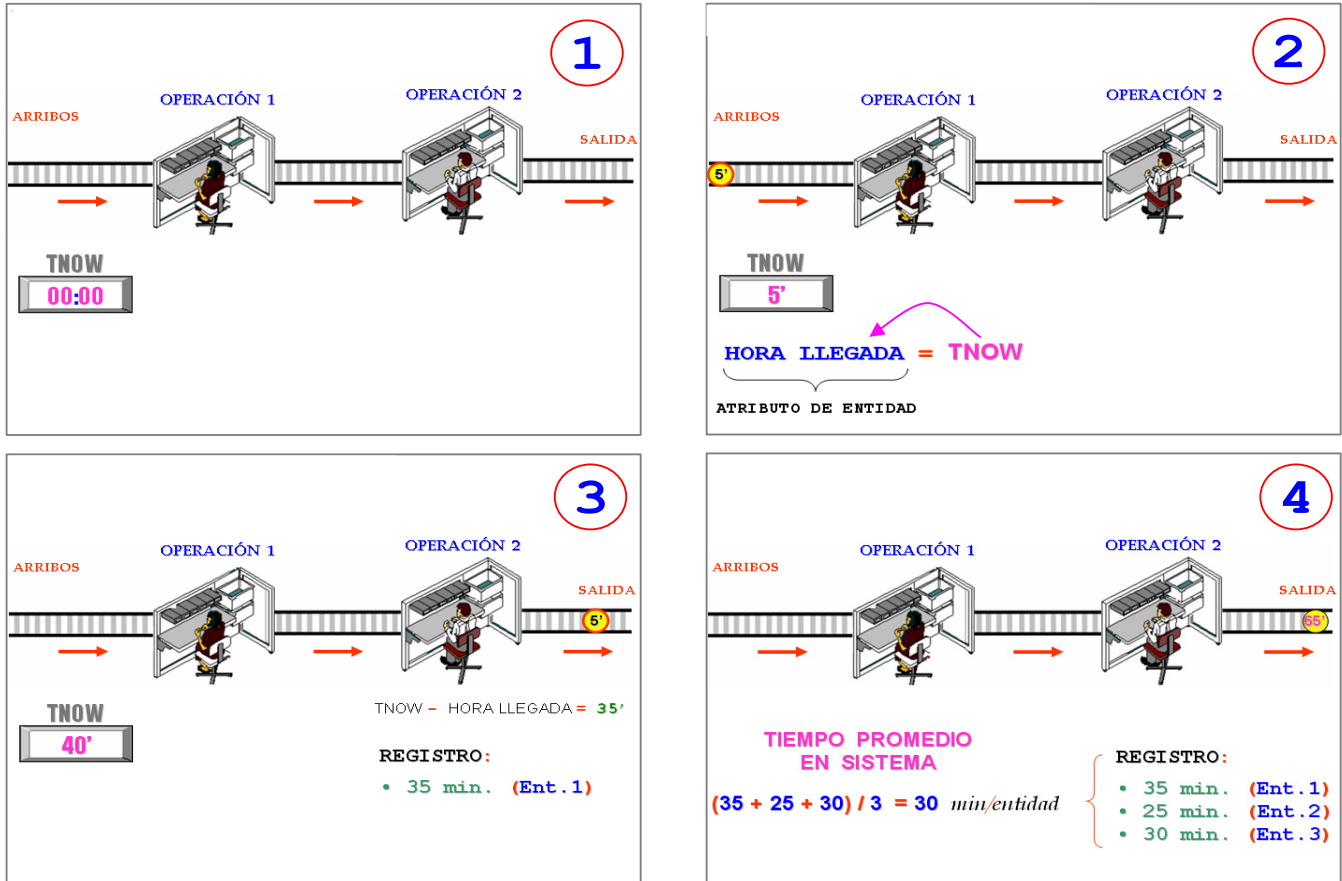


Ejemplo 8: Probabilidad variable.



**Indicador de desempeño: Tiempo promedio en sistema**

Una parte muy importante en el experimento de simulación consiste en la medición de indicadores de desempeño del sistema. El software Arena dispone de ciertas herramientas que ayudan al registro de información y al cálculo de estadísticas, como el módulo básico Record y el módulo de datos avanzado Statistic. A continuación se muestra una secuencia en la que analizaremos cómo es el registro de datos y, finalmente, cómo se determina el tiempo promedio que una entidad permanece en el sistema.

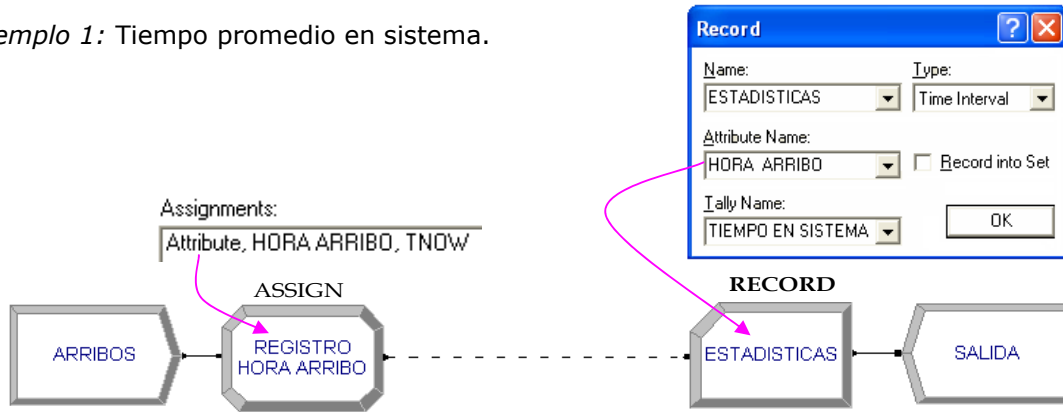


## 7. MÓDULO RECORD

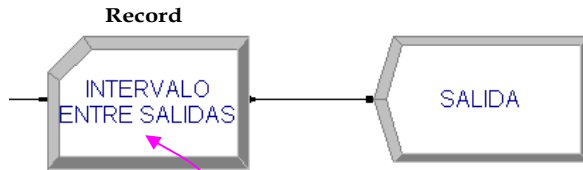
Este módulo se utiliza en la recolección de estadísticas en el reporte de resultados del modelo simulado. Proporciona diversos tipos de estadísticas, incluyendo el tiempo de permanencia en el sistema (Tally-Time Interval), el tiempo entre arribos (Tally-Time Between), Conteo de Entidades (Count) y Estadísticas de Tiempo y Costo (Entity Statistic: VA Cost, NVA Cost, Wait Cost, Transfer Cost, Total Cost, VA Time, NVA Time, Wait Time, Transfer Time and Total Time).

Al activar la opción Record Into Set brinda la posibilidad de obtener estadísticas clasificadas de los miembros de un conjunto, es decir, discriminando por tipo de entidad u otro índice. Entonces, es necesario asignar un nombre al conjunto creado (Set Name) y escoger el índice deseado (Set Index). Adicionalmente, se debe abrir el módulo de datos Set (Basic Process) y crear los miembros del conjunto, definido en el módulo Record.

*Ejemplo 1: Tiempo promedio en sistema.*



*Ejemplo 2: Tiempo promedio entre la salida de una entidad y otra.*



User Specified	
Tally	Interval
	Average
TIEMPO EN SISTEMA	8.5580

Para nuestro ejemplo, cada 65.24 minutos sale una entidad del sistema.

**Record**

Name: INTERVALO ENTRE SALIDAS Type: Time Between

Tally Name: INTERVALO ENTRE SALIDAS

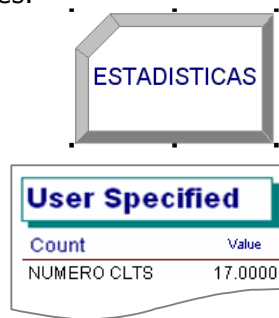
Record into Set

OK

User Specified			
Tally	Between	Average	Minimum Value
			Maximum Value
INTERVALO ENTRE SALIDAS		65.2470	172.20

*Ejemplo 3: Contador de entidades.*

Cada vez que una entidad pasa por el módulo Record se incrementa el contador NUMERO CLTS en 1.



**Record**

Name: ESTADISTICAS Type: Count

Value: 1

Counter Name: NUMERO CLTS

Record into Set

OK

*Ejemplo 4: Uso de atributos de Arena*

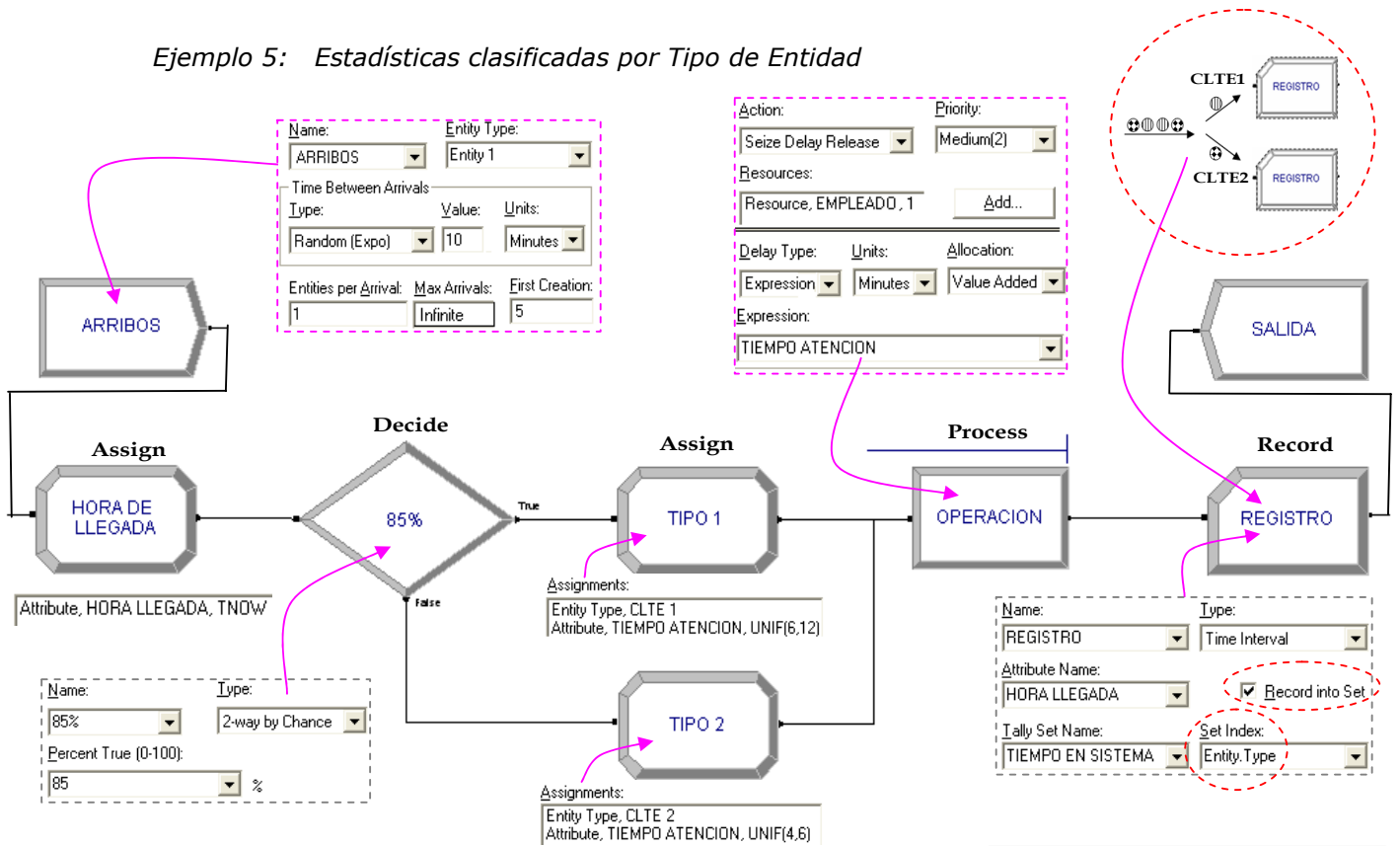
Según el ejemplo de la derecha, el módulo Record realiza un conteo de aquellas entidades cuyo atributo **Entity.WaitTime** es igual a 0, es decir aquellas que no han tenido tiempos de espera.

Type: Count

Value: Entity.WaitTime == 0

Record into Set

Ejemplo 5: Estadísticas clasificadas por Tipo de Entidad



Módulos de datos:



Name	Type	Capacity
1 EMPLEADO	Fixed Capacity	2



Set - Basic Process			
Name	Type	Members	
1 TIEMPO EN SISTEMA	Tally	[2 rows]	

Members	
Tally Name	
1 TIEMPO EN SISTEMA 1	
2 TIEMPO EN SISTEMA 2	

User Specified Usage	
	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	9.1263
TIEMPO EN SISTEMA 2	4.8637

Run Setup...

Number of Replications: 1

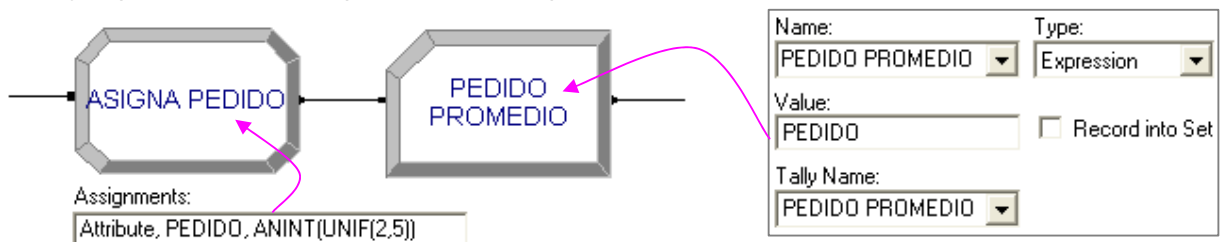
Warm-up Period: 0.0 Time Units: Hours

Replication Length: Infinite Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

Terminating Condition: SALIDA.NUMBEROUT == 100

Ejemplo 6: Uso de la opción Record/Expression.



Al utilizar la distribución uniforme esta es continua y genera números reales, con intervalo abierto en el extremo derecho, tal que:  $2.0 \leq X < 5.0$ , entonces, al anteponer la función AINT, el efecto que produce es redondear dicho número real al próximo valor entero. El módulo Record registra los pedidos y al final proporciona el promedio.

## 2

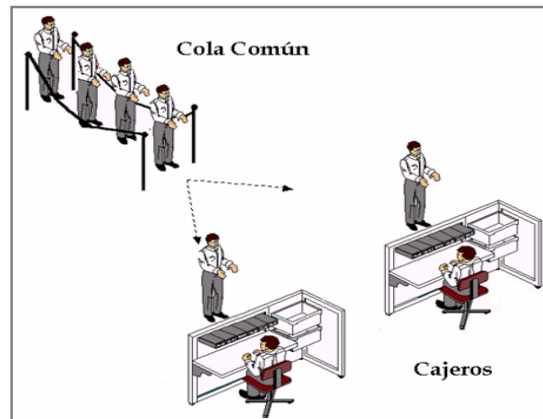
## Caso de estudio

**Estaciones de servicio en paralelo<sup>1</sup>**

## Objetivos:

- o Variables de entidad: Atributos y Entity Type. Función discreta Disc.
- o Módulos básicos: Decide, Assign, Process y Record.
- o Opción Record into Set: Tally (Time Interval, Count).
- o Aplicación de Members Set, para discriminar estadísticas, por tipo de entidad.

Una agencia bancaria recibe a los clientes, quienes realizan diversas transacciones en dos cajeros y una cola común. El tiempo de servicio de cada cajero con un cliente sigue una distribución uniforme entre 6 y 12 minutos. Los clientes llegan a la agencia con un tiempo entre arribos distribuido exponencialmente con una media de 10 minutos, a las horas de mayor congestión. Deseamos simular el comportamiento del sistema para esas horas. Considerar también que el primer cliente llega al minuto 5 del experimento de simulación.



1. Simular el sistema hasta que 100 clientes hayan sido atendidos. Determinar el tiempo promedio que los clientes permanecen en la agencia bancaria.

**Escenario**

Suponga que existen dos tipos de clientes, el 85% de los arribos corresponde a clientes típicos y el 15% restante a clientes importantes (VIP), cuyo tiempo de atención es una Uniforme entre 4 y 6 minutos y lo realiza un cajero exclusivo. Para los clientes típicos se mantiene el tiempo de atención de la pregunta 1 y continúan los dos cajeros.

2. Determinar el tiempo promedio en sistema, por tipo de cliente.

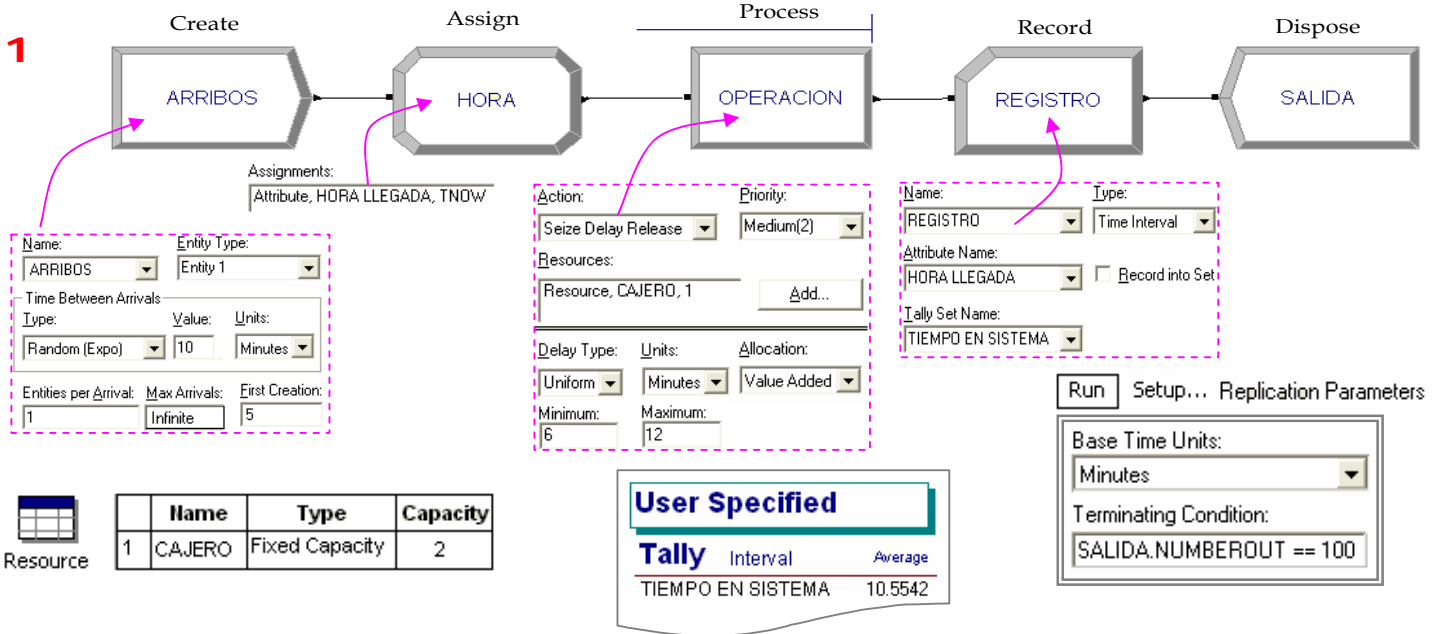
3. Suponga que se desactiva el cajero VIP y solo quedan los dos cajeros iniciales. Los clientes VIP utilizarán también dichos cajeros pero su tiempo de atención se mantiene (Uniforme (4,6) minutos). Determinar el tiempo en sistema por tipo de cliente.

4. Respecto a la pregunta anterior, ¿cuántos clientes se atendieron de cada tipo?

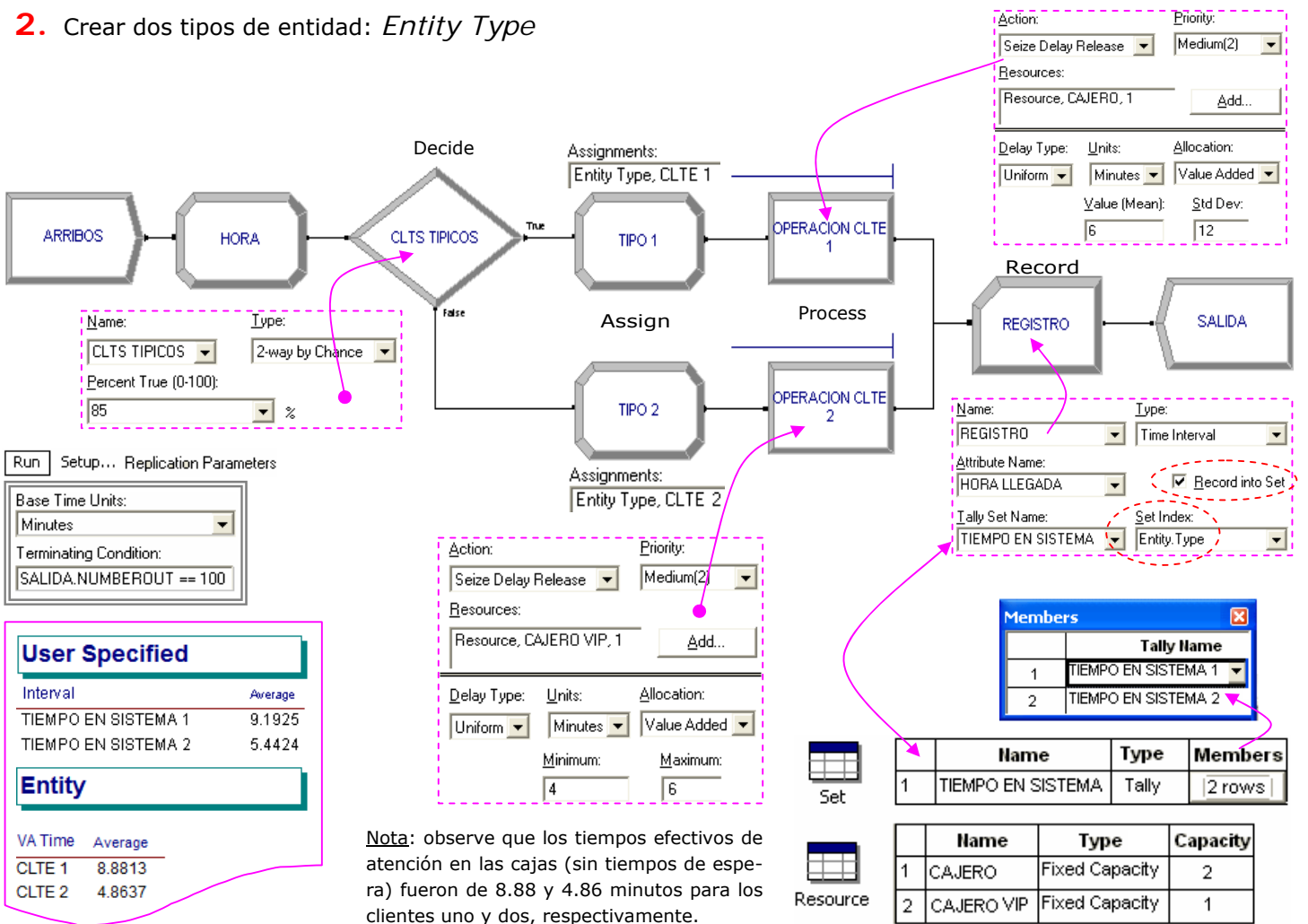
<sup>1</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, 1999.

## Solución

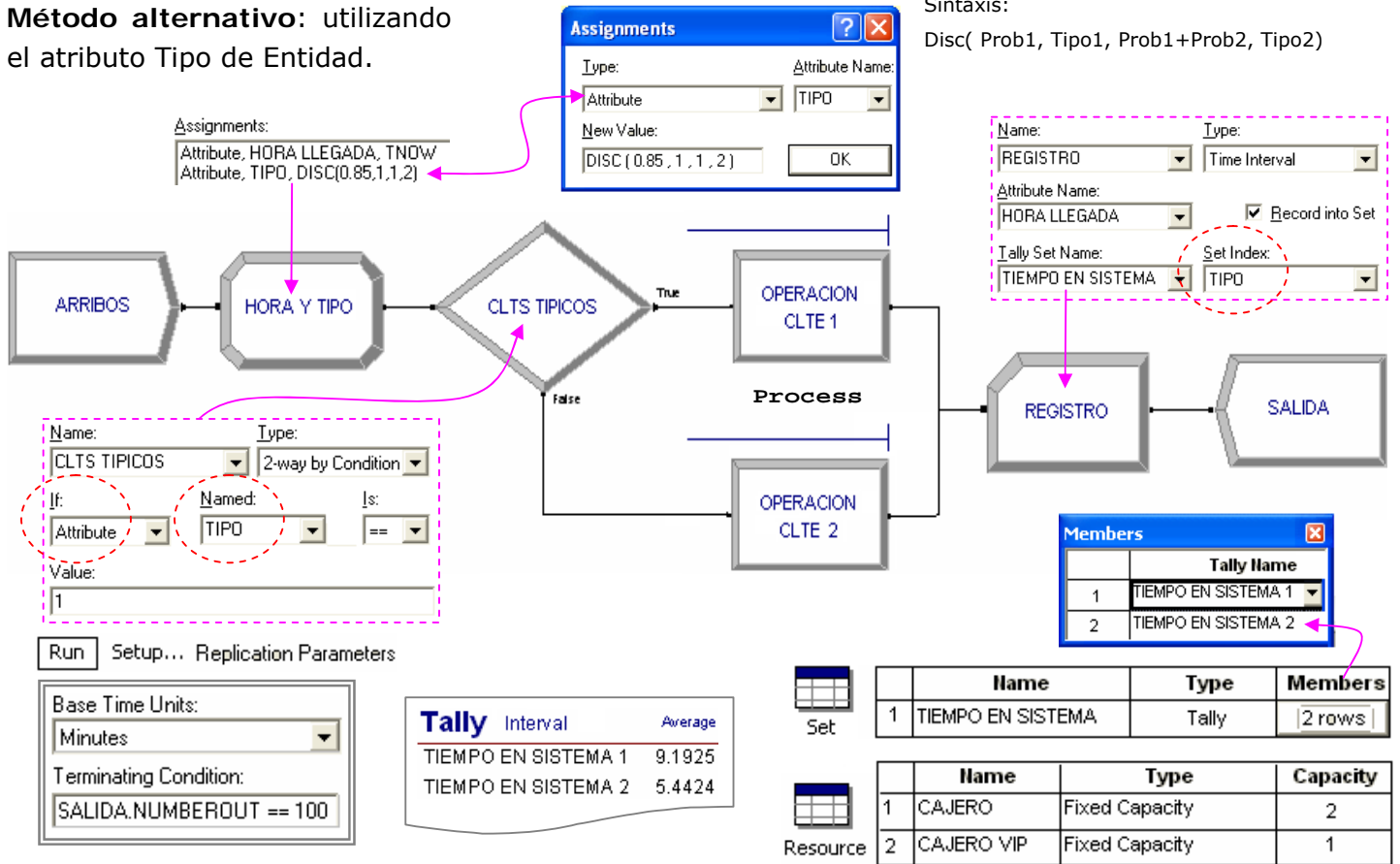
1



## 2. Crear dos tipos de entidad: *Entity Type*

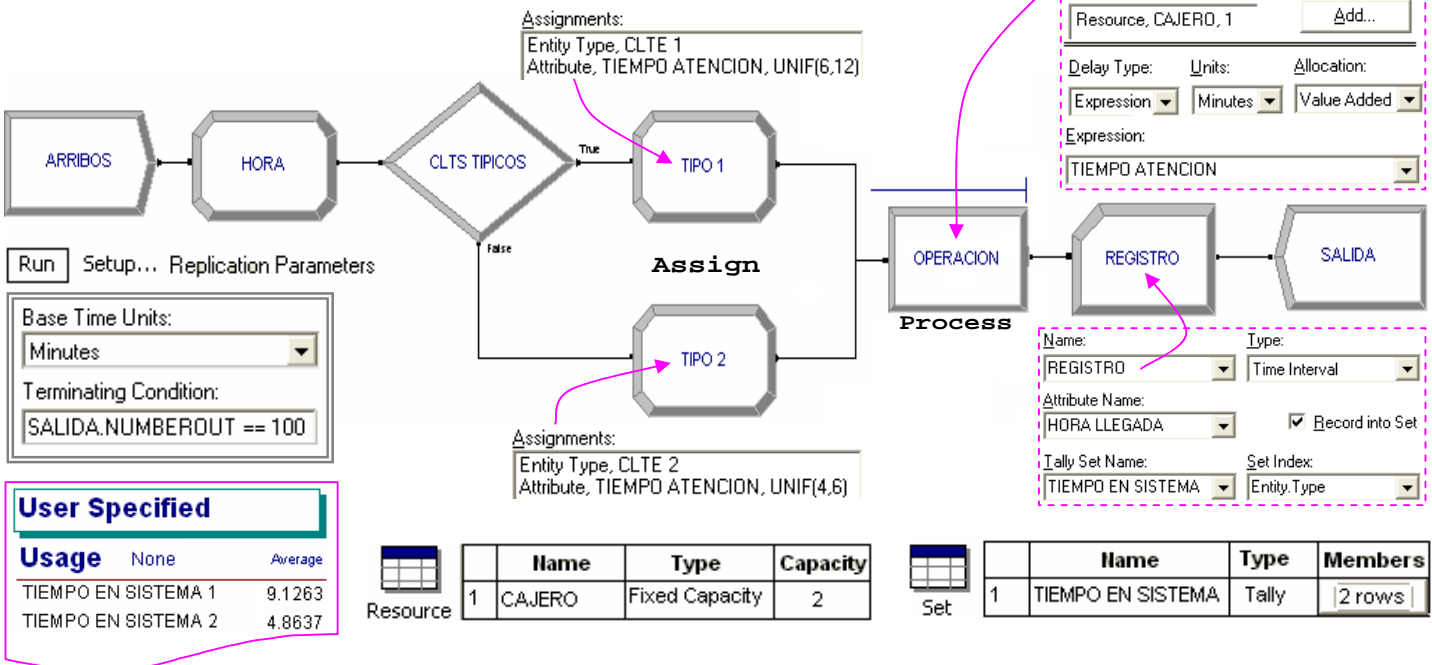


**Método alternativo:** utilizando el atributo Tipo de Entidad.



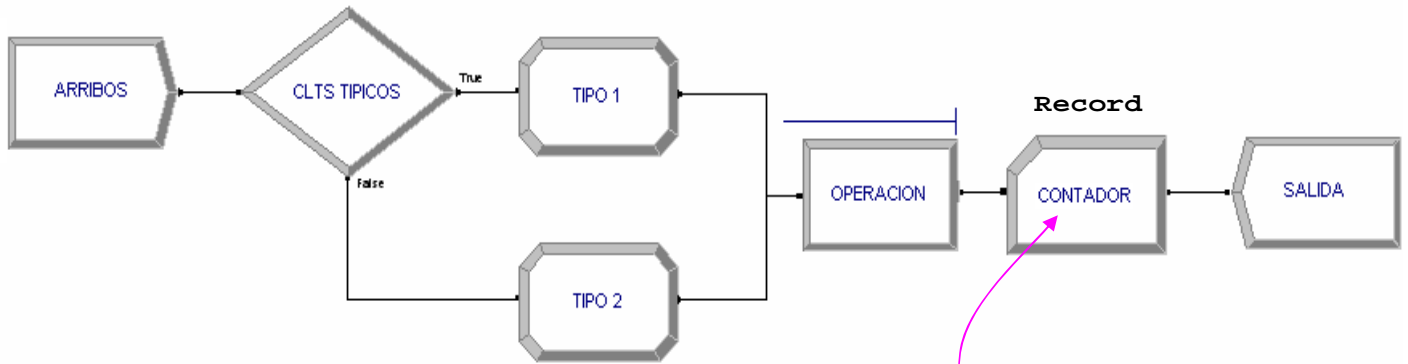
Sintaxis:  
 Disc( Prob1, Tipo1, Prob1+Prob2, Tipo2)

**3. Eliminar cajero VIP**





#### 4. Número de clientes atendidos (clasificados por tipo)



Run Setup... Replication Parameters

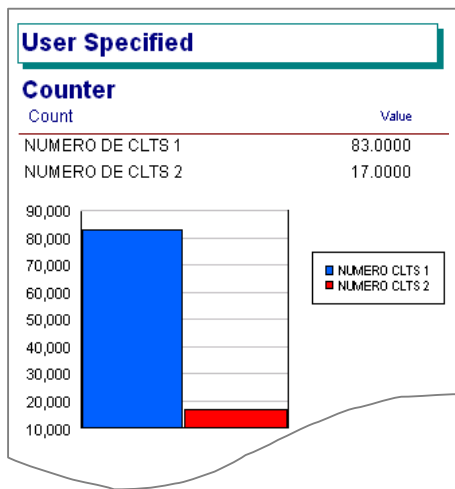
Base Time Units:  
Minutes

Terminating Condition:  
SALIDA.NUMBEROUT == 100

Name: CONTADOR Type: Count

Value: 1  Record into Set

Counter Set Name: NUMERO CLTS Set Index: Entity.Type



	Name	Type	Members
1	NUMERO CLTS	Counter	2 rows

**Members**

	Counter Name
1	NUMERO CLTS 1
2	NUMERO CLTS 2

3

Caso de estudio

**Estaciones de trabajo en serie<sup>2</sup>**

Objetivos:

- o Variables de entidad: Atributos.
- o Módulos: Decide, Assign, Process y Record.
- o Record: Tally (Time Interval, Time Between, Count).
- o Variable NQ: proporciona el número de entidades en cola.

Al departamento de servicios de una empresa industrial llegan las piezas de un producto. Cada pieza debe pasar por cada estación de trabajo; es decir, se deben ejecutar dos operaciones secuenciales (en serie), tal como se muestra en el siguiente esquema que describe el proceso:

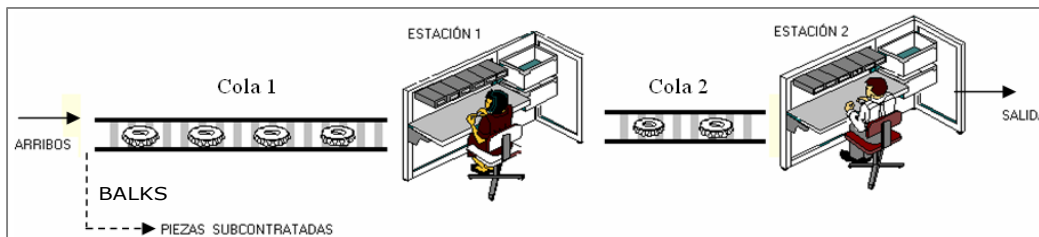


Las piezas arriban al sistema de acuerdo con una distribución de probabilidad exponencial con una media de 0.4 minutos. Cada estación de trabajo posee un operario que procesa una pieza a la vez y frecuentemente se forman colas antes de cada estación. Los tiempos de servicio en cada estación también están exponencialmente distribuidos con una media de 0.25 *minutos* para la primera estación y 0.5 minutos para la segunda.

Se desea determinar el tiempo de ciclo; es decir, el tiempo promedio para procesar una pieza (desde que ingresa al sistema hasta que sale). Simular el comportamiento del sistema durante 300 minutos.

**Escenario**

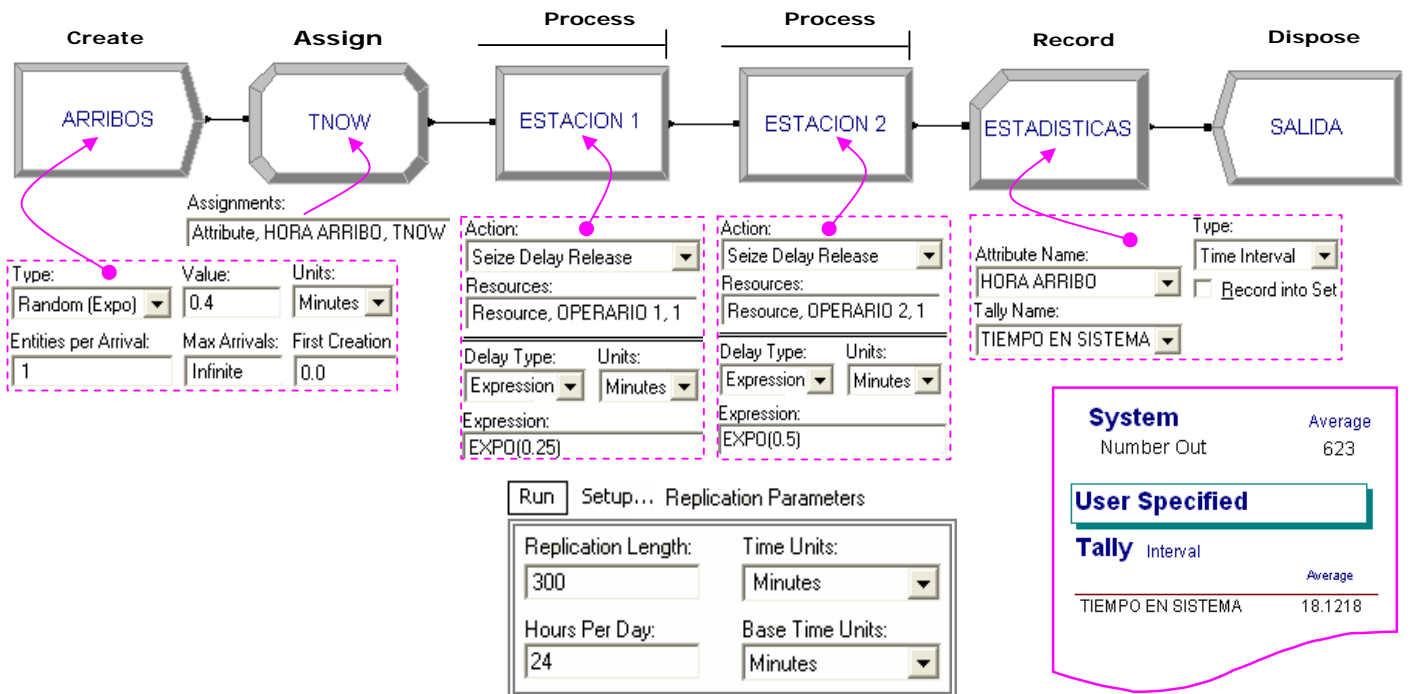
Suponga que la cola 1 tiene una capacidad de cuatro piezas. La política de la empresa es subcontratar todo el servicio solo en el caso de que las piezas no puedan ingresar al sistema debido a que la cola está al tope de su capacidad.



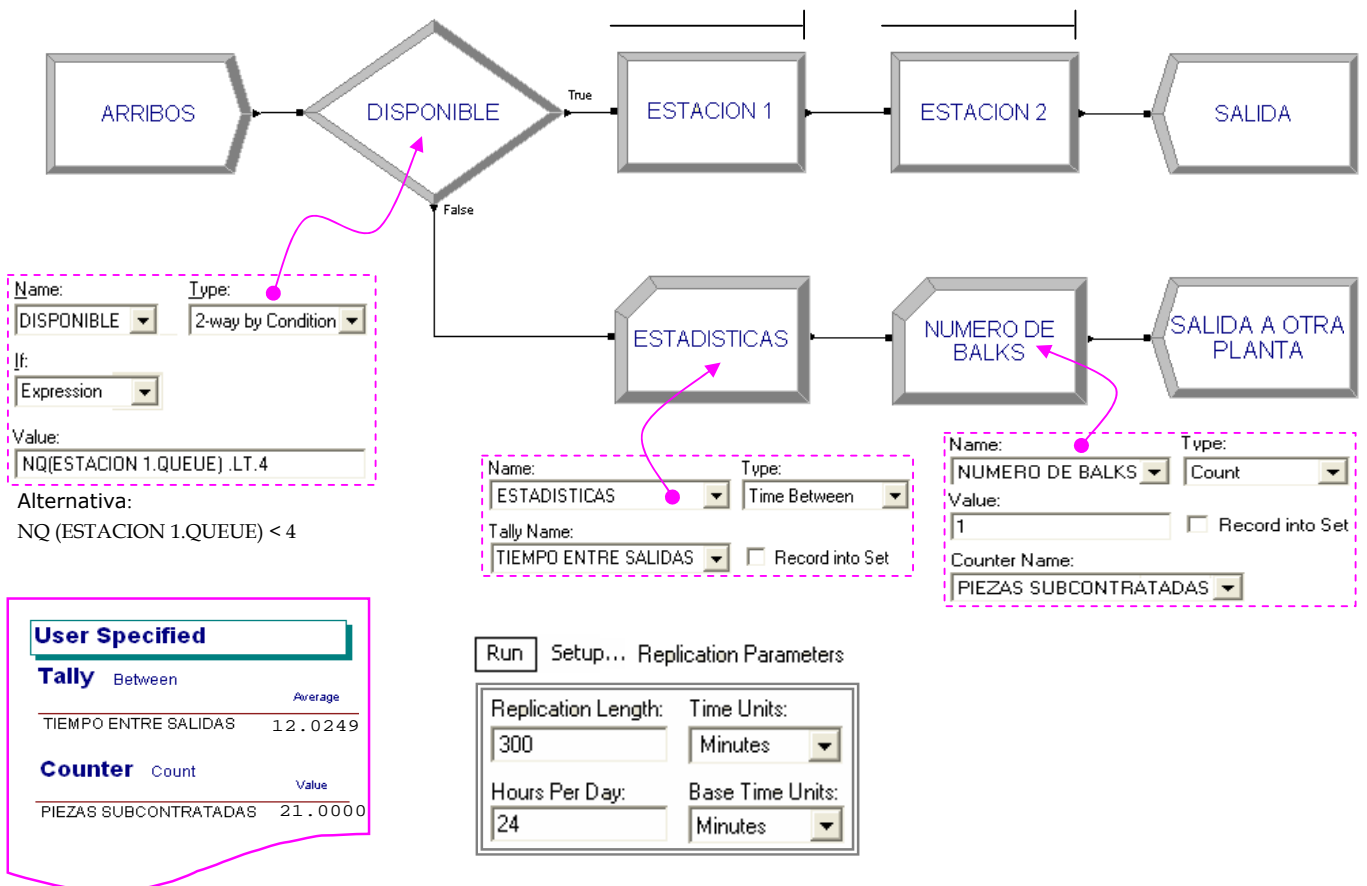
- Determinar el número de piezas que se subcontrata.
- Determinar cada cuánto tiempo en promedio se envía una pieza para subcontratación.

<sup>2</sup> *Ibídem.*

### Solución



### Escenario



4

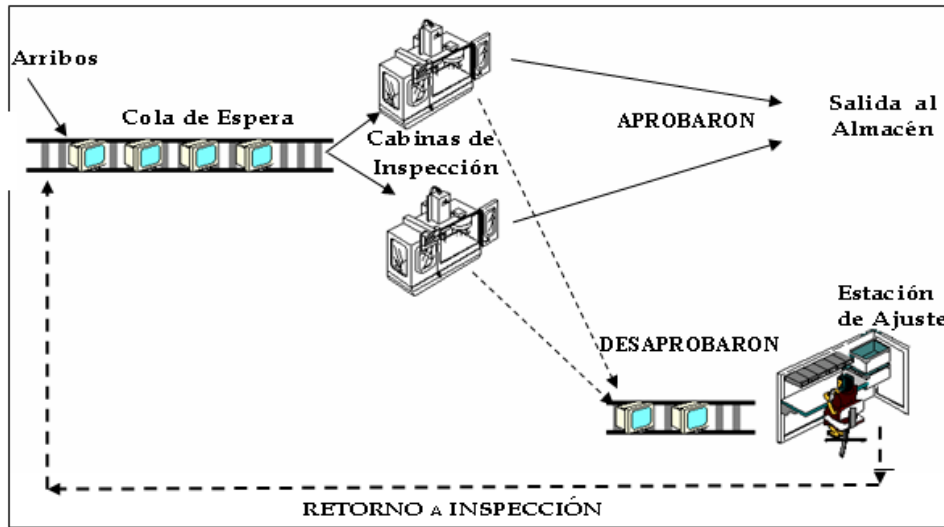
Caso de estudio

**Línea de producción con estaciones de inspección y ajuste<sup>3</sup>**

Objetivos:

- o Variables de Entidad: Atributos y Entity Type.
- o Módulos Decide, Assign, Process y Record.
- o Prioridad en cola, módulo de datos Queue (Highest Attribute Value).
- o Estadísticas discriminadas por atributo (Record into Set: Time Interval, Time Between), módulo de datos Set (Members Set).

Tres tipos de monitores de computadoras son desplazados hacia dos cabinas de Inspección en la etapa final de su producción; si pasan la prueba, entonces estos salen hacia el Almacén, de lo contrario, pasan a la Estación de Ajuste.



El tiempo entre arribos al sistema de los monitores está uniformemente distribuido entre 3.5 y 7.5 minutos. El 45% de los arribos corresponde al Tipo A, el 35% al B y el 20% al C. Existen dos inspectores; si hubiere alguna cabina disponible el monitor ingresa directamente a esta, de lo contrario, es ubicado en una cola común de espera. El tiempo requerido para inspeccionar un monitor en cualquier cabina y la probabilidad de que sea rechazado se muestran a continuación:

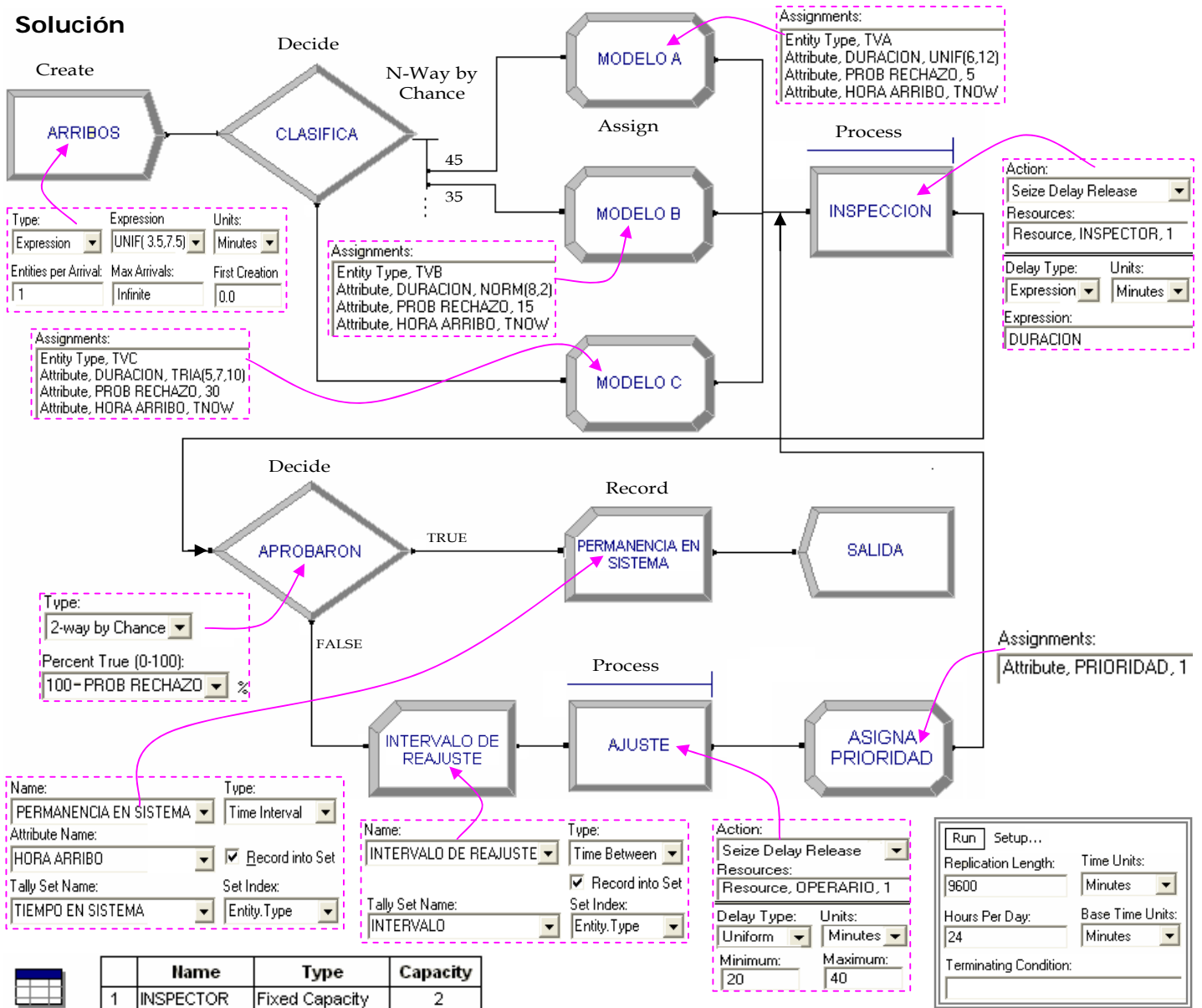
TIPO	DURACIÓN	PROBABILIDAD DE RECHAZO
TVA	UNIF(6,12)	5%
TVB	NORM(8,2)	15%
TVC	TRIA(5,7,10)	30%

Los monitores que aprueban la inspección continúan hacia el Almacén Central, los rechazados se envían a la Estación de Ajuste, donde se forma una cola para que el monitor sea reajustado; esta operación la realiza un solo operario y le toma un tiempo uniformemente distribuido entre 20 y 40 minutos, para cualquier tipo de monitor. Una vez reajustado, el monitor se envía de regreso a la cola de las Cabinas de Inspección, con una prioridad mayor para ser atendida. Se pide:

1. Formular un modelo y simular el comportamiento del sistema durante 9.600 minutos.
2. Determinar el tiempo en sistema y cada cuánto tiempo se reajusta un monitor. Discriminar las estadísticas por tipo de monitor.
3. Determinar el tiempo en sistema global (considerando los tres tipos de monitores).

<sup>3</sup> Ibídem

**Solución**



Resource	Name	Type	Capacity
1	INSPECTOR	Fixed Capacity	2
2	OPERARIO	Fixed Capacity	1

Queue	Name	Type	Attribute Name
1	INSPECCION.Queue	Highest Attribute Value	PRIORIDAD
2	AJUSTE.Queue	First In First Out	

**2. Estadísticas:**

Set	Name	Type	Members
1	TIEMPO EN SISTEMA	Tally	3 rows
2	INTERVALO	Tally	3 rows

MEMBERS	
1	INTERVALO A
2	INTERVALO B
3	INTERVALO C

**3. Tiempo en sistema global:**

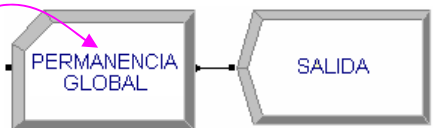
Name:	Type:
PERMANENCIA GLOBAL	Time Interval

Attribute Name:	Record into Set:
HORA ARRIBO	<input type="checkbox"/>

Tally Name:
PERMANENCIA GLOBAL



**Interpretación del reporte:**

- Cada 36.34 minutos un monitor Tipo A es enviado a reproceso. Cada 30.44 minutos para B y cada 33.12 minutos para C, aproximadamente.
- El tiempo promedio que permanecieron en la planta los modelos A, B y C, respectivamente, fue de 16.59, 36.32 y 66.32 minutos, aproximadamente.
- El tiempo promedio en planta global fue de 33.18 minutos, aproximadamente.

User Specified	
None	Average
INTERVALO A	36.3490
INTERVALO B	30.4408
INTERVALO C	33.1203
TIEMPO EN SISTEMA A	16.5931
TIEMPO EN SISTEMA B	36.3232
TIEMPO EN SISTEMA C	66.3266
Interval	Average
PERMANENCIA GLOBAL	33.1850



Caso de estudio

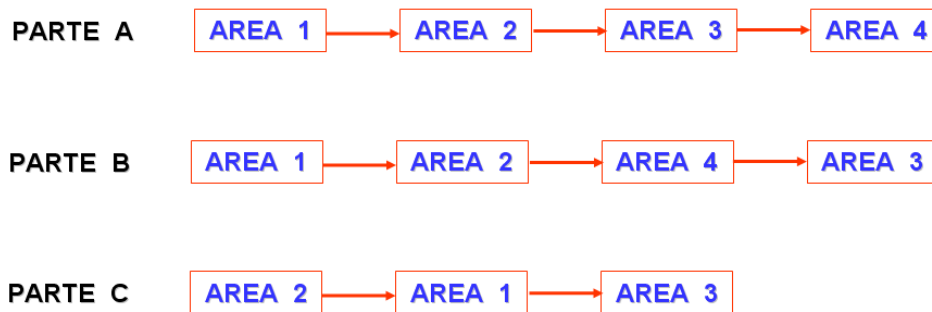
**Secuencia de operaciones de un proceso<sup>4</sup>**

Objetivos:

- o Variables de entidad: Atributos, Entity Type.
- o Módulos Decide, Assign, Process y Record.
- o Estadísticas discriminadas por atributo (Record Into Set: Time Interval, Count), módulo de datos Set (Members Set).

En una planta de producción se realizan 4 operaciones distintas, cada una en un área exclusiva. Al sistema llegan tres tipos de partes: Parte A, Parte B y Parte C, las cuales seguirán una secuencia preestablecida de operaciones; los tiempos entre llegadas de las partes corresponde a una distribución de probabilidad exponencial con una media de 13 minutos. En el siguiente esquema se muestra la secuencia de operaciones que sigue cada una de las partes:

**SECUENCIA DE OPERACIONES**



En la tabla siguiente se muestran los tiempos de actividad en cada una de las áreas, que corresponden a una distribución de probabilidad triangular:

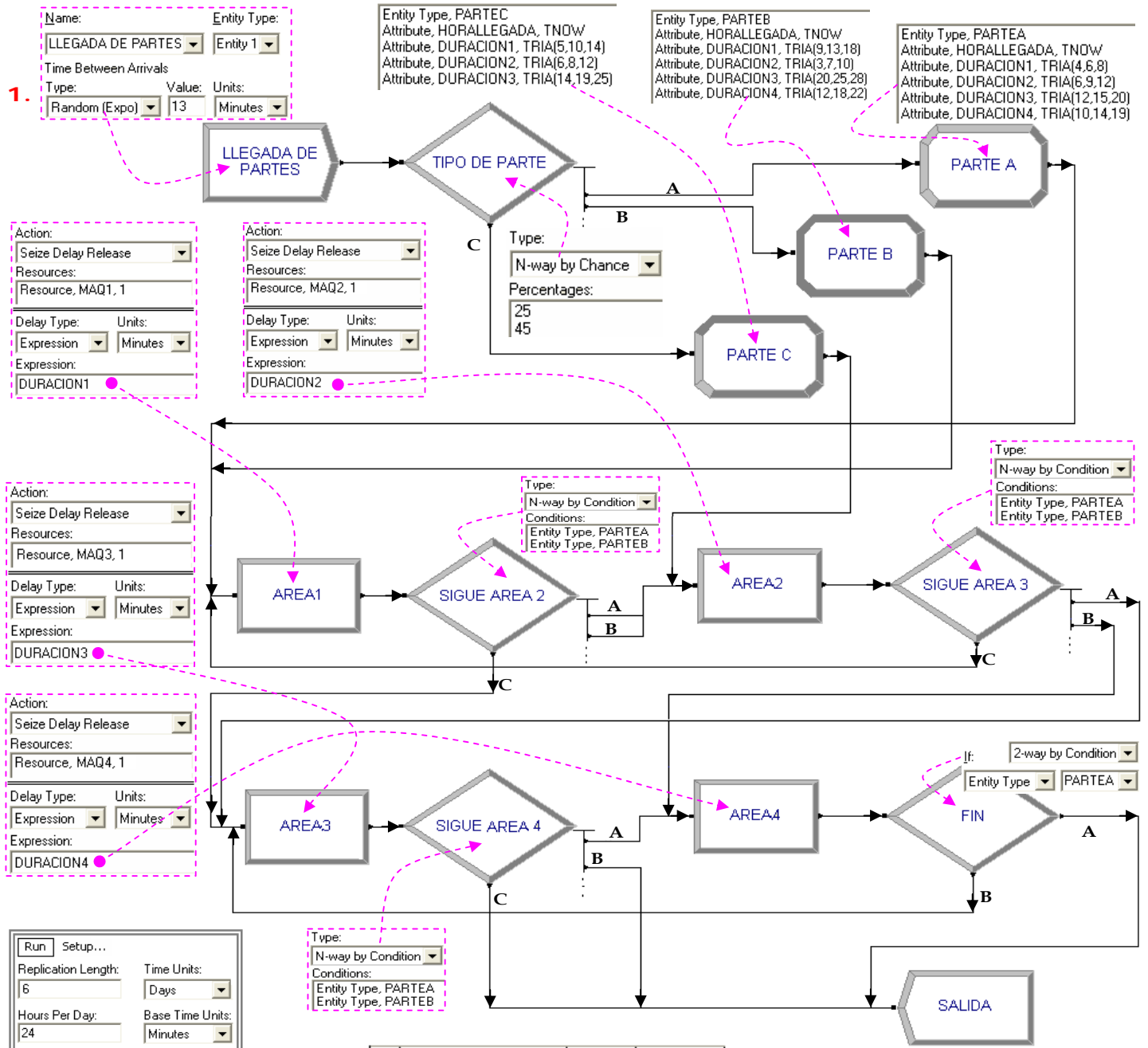
	Tiempos de actividad (minutos)			
	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
<b>Parte A</b>	4 , 6 , 8	6 , 9 , 12	12 , 15 , 20	10 , 14 , 19
<b>Parte B</b>	9 , 13 , 18	3 , 7 10	20 , 25 , 28	12 , 18 , 22
<b>Parte C</b>	5 , 10 , 14	6 , 8 , 12	14 , 19 , 25	

Existen dos máquinas disponibles por cada área. Durante los arribos de las partes, la probabilidad de que sea la Parte A es 25%; la Parte B, 45% y la Parte C, 30%. Se pide:

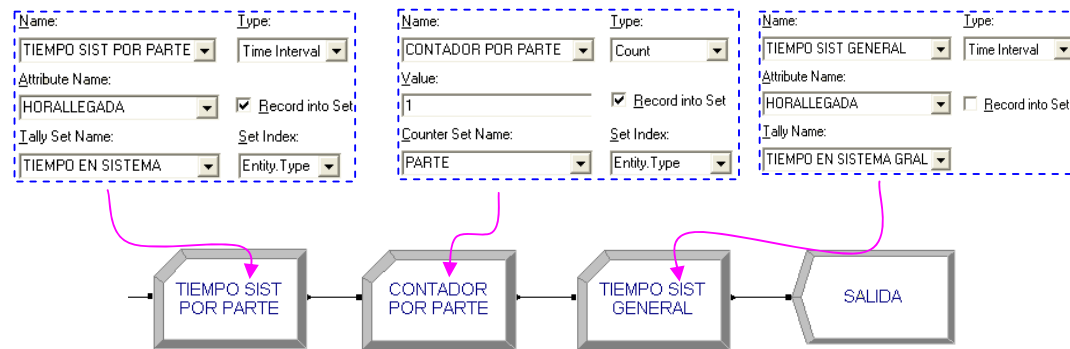
1. Formular un modelo de simulación adecuado a la situación descrita y simularlo durante 6 días (24 horas/día).
2. Obtener las estadísticas sobre tiempo en sistema por tipo de parte y general, así también como número de unidades procesadas por cada tipo de parte.

<sup>4</sup> Ibídem.

**Solución**



**2. Estadísticas:**



	Name	Type	Members
1	TIEMPO EN SISTEMA	Tally	3 rows
2	PARTE	Counter	3 rows

Tally		Interval	Average
TIEMPO EN SISTEMA GRAL			66.3226
Other			
None		Interval	Average
TIEMPO EN SISTEMA A			62.7269
TIEMPO EN SISTEMA B			77.3402
TIEMPO EN SISTEMA C			52.7534
Counter		Count	Value
PARTE A			156.00
PARTE B			296.00
PARTE C			199.00

## 6

## Caso de estudio

**Evaluación de créditos hipotecarios<sup>5</sup>**

## Objetivos:

- o Variables de entidad: Atributos, Entity Type.
- o Módulos Decide, Assign, Process y Record. Asignación de prioridad en cola.
- o Análisis de los costos de los recursos, asignados a la entidad (V. A. Cost) y asignados a la capacidad ociosa de estos.

Las solicitudes para obtener créditos hipotecarios llegan al área de evaluación de un banco, donde un analista las evalúa y emite el informe respectivo. De acuerdo con datos históricos, solo el 88% de las solicitudes son aprobadas, pues cumplen con todos los requisitos.

Las solicitudes llegan al Área de Evaluación según una EXPO(2) horas. La duración para evaluar cada solicitud es una TRIA(1, 1.75, 3) horas. Se estima un costo de \$12/hora para el analista, este se contabiliza solo para el tiempo de actividad. Simular el funcionamiento del sistema durante 20 días y determinar lo siguiente:

1. Tiempo promedio que permanece una solicitud en el Banco.
2. Intervalo entre rechazos de solicitudes.
3. Máximo tiempo que una solicitud permanece en espera por la evaluación.
4. Máximo número de solicitudes esperando ser revisadas.
5. Utilización promedio del analista.
6. Costo promedio de evaluación por solicitud.

**Escenario 1**

Se desea adicionar un proceso previo de selección de las solicitudes antes de que sean evaluadas; se estima una duración que se ajusta a una TRIA (15, 20, 45) minutos. Por falta de algunos datos en las solicitudes, el 8% son rechazadas y el 92% son enviadas a la evaluación. Este proceso reducirá en un 10% el tiempo para su posterior evaluación y elevará el porcentaje de solicitudes aprobadas de 88% a 94%. Este nuevo proceso será atendido por una recepcionista cuyo pago es de \$6.75/hora. Considerar que tanto el analista como la recepcionista ejecutan también otras labores, cuando están desocupados. Evaluar el costo asociado a los tiempos de inactividad (capacidad ociosa). Obtenga los mismos indicadores pedidos para el escenario original.

**Escenario 2**

Respecto al escenario original, suponga que las solicitudes se clasifican en tres tipos. El monto solicitado y el tiempo para su evaluación son los siguientes:

Tipo de solicitud	Probabilidad de arribo	Monto (\$)	Tiempo (horas)
1	40%	50000	TRIA(0.5,1,1.5)
2	50%	35000	TRIA(0.3,0.45,1)
3	10%	70000	UNIF(1,3)

Simular para 20 días, 10 horas por día. La unidad base debe ser la hora. Se pide:

- Presupuesto del que se debe disponer para otorgar los créditos hipotecarios.
- Tiempo promedio en aceptar una solicitud; discriminar por tipo.

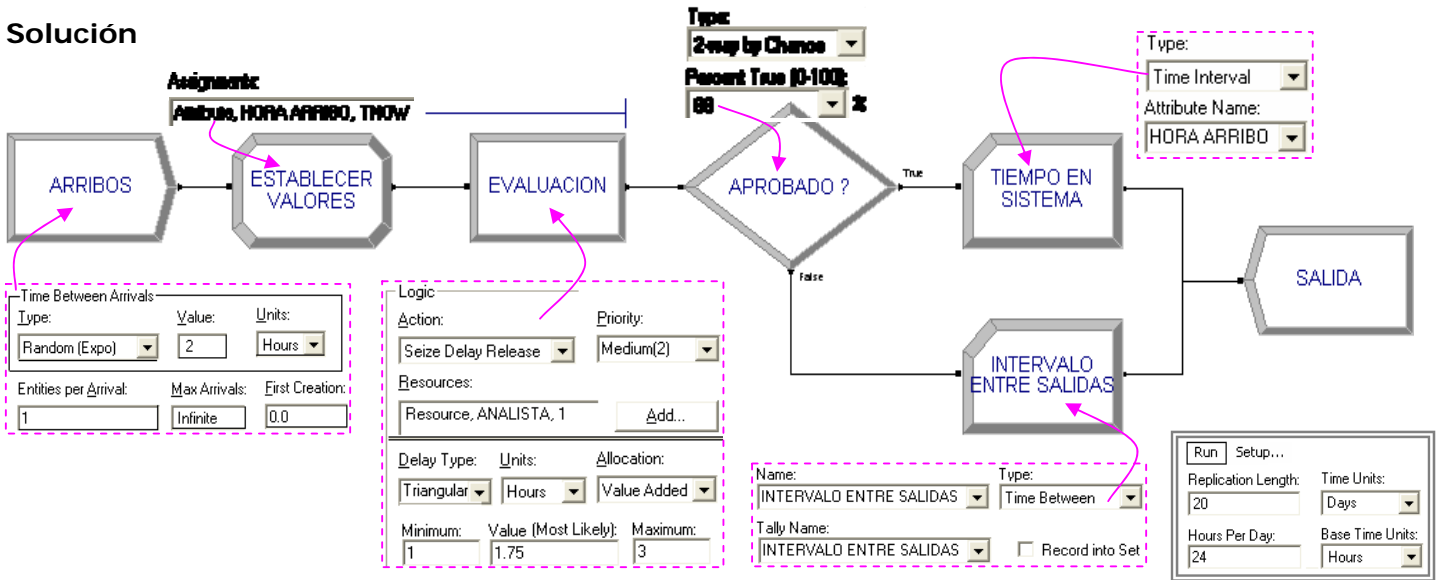
**Escenario 3**

Respecto al Escenario 2, suponga que las solicitudes que se rechazan se corrigen inmediatamente y regresan a la cola para una nueva evaluación, pero con mayor prioridad. ¿Cuántos desaprobaron en total y cuántos desaprobaron más de una vez?

<sup>5</sup> Enunciado tomado de KELTON, W. D.; SADIWSJU, R. P. y D. T. Sturrock. Simulation with Arena, 2004.



**Solución**



**User Specified**

Tally	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO EN SISTEMA	16.2955	1.4216	33.4522
INTERVALO ENTRE SALIDAS	14.8655	1.7684	64.5570

**Resource Usage**

Instantaneous Utilization	Average
ANALISTA	0.9654

**Queue**

Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
EVALUACION.Queue	14.6615	0.00	31.3134

**Other**

Number Waiting	Average	Minimum Value	Maximum Value
EVALUACION.Queue	8.0177	0.00	21.0000

**Project Parameters**

Project Title: Unnamed Project  
 Analyst Name:  
 Project Description:

**Statistics Collection**

- Costing
- Queues
- Transporters
- Entities
- Processes
- Conveyors
- Resources
- Stations
- Activity Areas
- Tanks

**System**

	Average
Total Cost	5,541
Number Out	241

**All Entities**

	Average
Non-Value Added Cost	0
Other Cost	0
Transfer Cost	0
Value Added Cost	5,541
Wait Cost	0
Total Cost	5,541

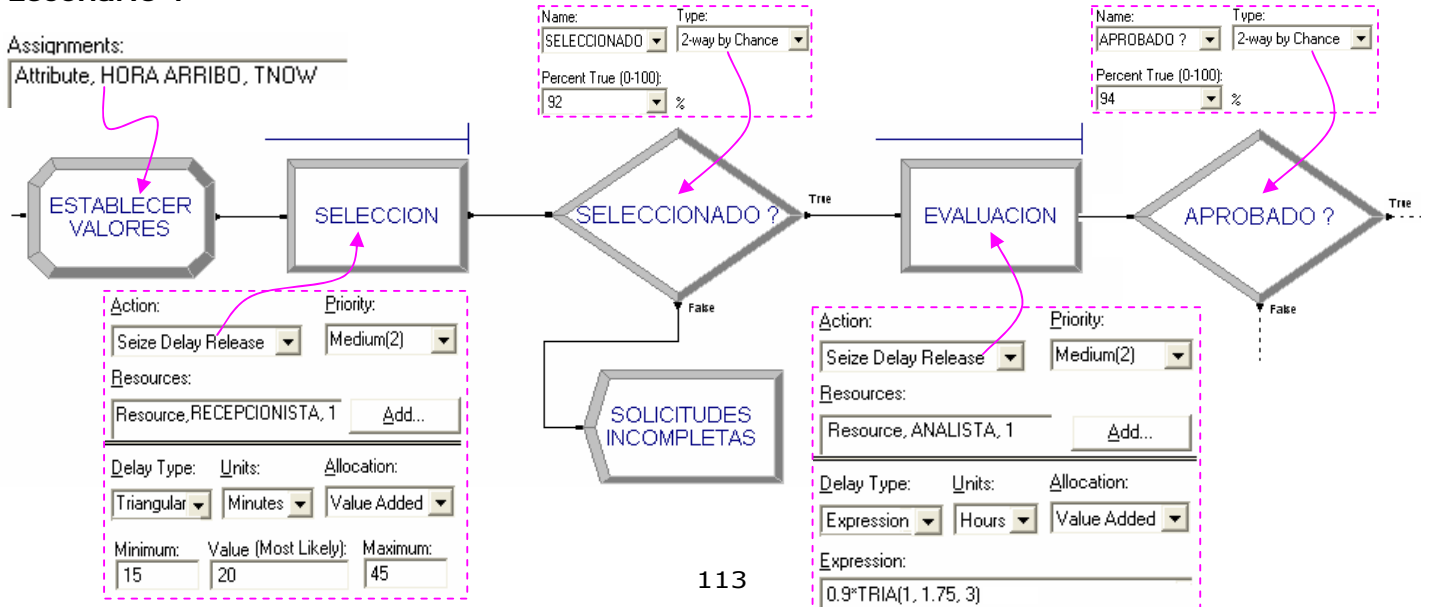
**Entity Cost**

Entity	VA Cost	Average
Entity 1	22.9923	$\frac{5541}{241}$

**Resource**

Name	Type	Capacity	Busy / Hour
1 ANALISTA	Fixed Capacity	1	12

**Escenario 1**



**Indicadores:**

- Tiempo en sistema 5.4496 horas
- Intervalo entre salidas 29.205 horas
- Máximo tiempo de espera 14.355 horas (Evaluación)  
1.0940 horas (Selección)
- Máximo tamaño de cola 9 solíc. (Evaluación)  
3 solíc. (Selección)
- Utilización del analista 78.50%
- Utilización del recepcionista 22.77%



	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour
1	ANALISTA	Fixed Capacity	1	12	12
2	RECEPCIONISTA	Fixed Capacity	1	6.75	6.75

	Busy Cost	Idle Cost	Total
<b>Analista</b>	4505.35	1238.43	<b>5743.78</b>
<b>Recepcionista</b>	737.62	2502.38	<b>3240.00</b>
<b>Total</b>	<b>5242.97</b>	<b>3740.81</b>	<b>8983.78</b>

**All Entities**

	Average
Non-Value Added Cost	0
Other Cost	0
Transfer Cost	0
Value Added Cost	5,243
Wait Cost	0
Total Cost	5,243

**All Resources**

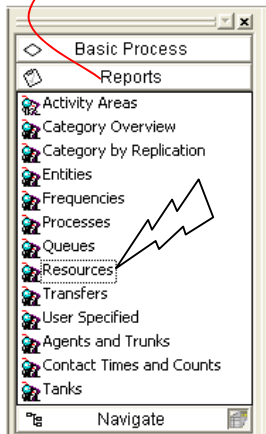
	Average
Busy Cost	5,243
Idle Cost	3,741
Total Cost	8,984

**System**

	Average
Total Cost	8,984
Number Out	241

**Entity**

Cost	Average
VA Cost	21.7135
Entity 1	21.7135
≅ $\frac{5242.97}{241}$	



Costos por utilizar los recursos. (Se carga a la entidad)

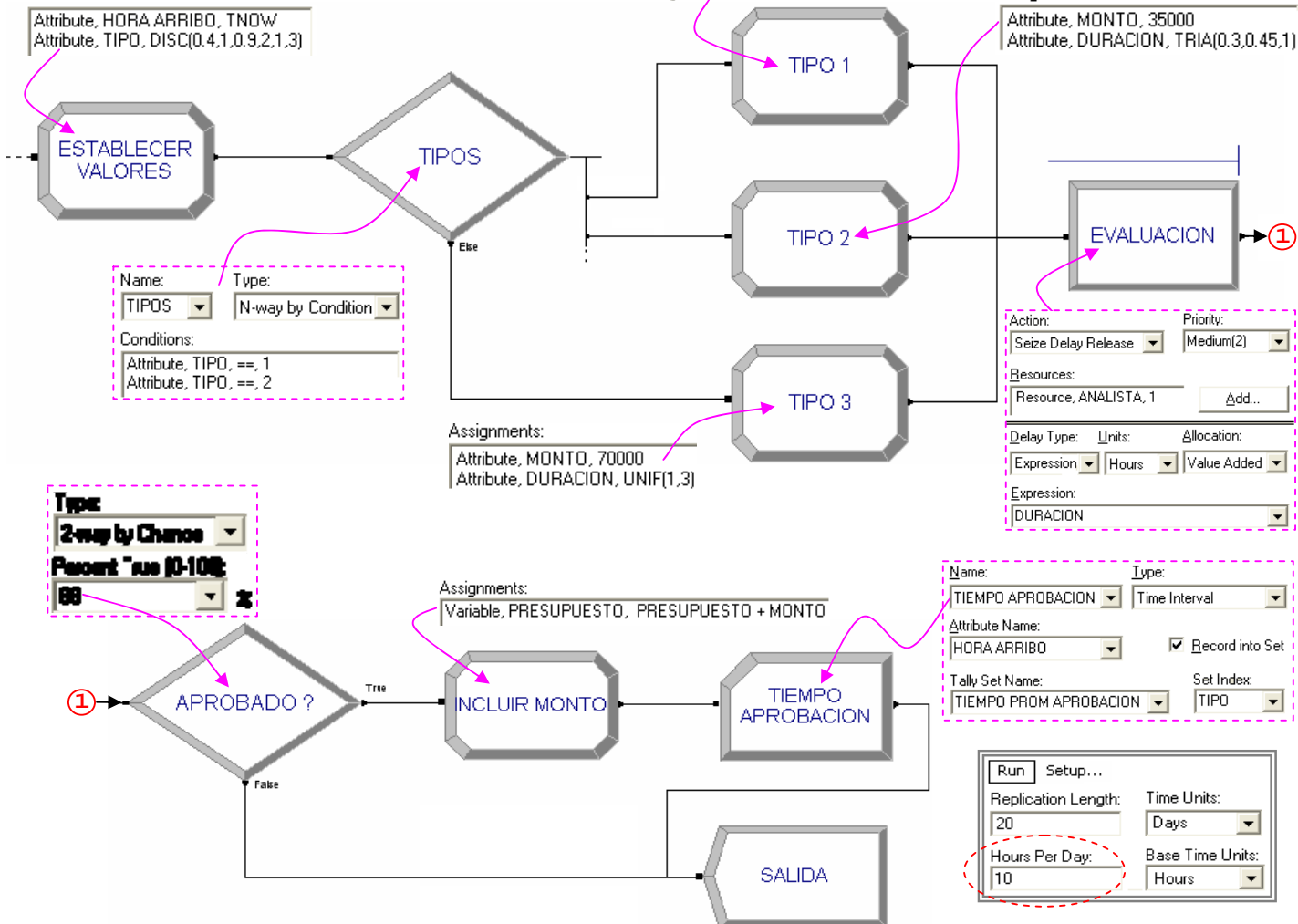
Costos por estado desocupado del recurso. (Capacidad ociosa)

Run Setup...

Replication Length: 20 Time Units: Days

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Hours

**Escenario 2**



Name	Rows	Columns	Clear Option	Initial Values	Report Statistics
1 PRESUPUESTO			System	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Name	Type	Members
1 TIEMPO PROM APROBACION	Tally	3 rows

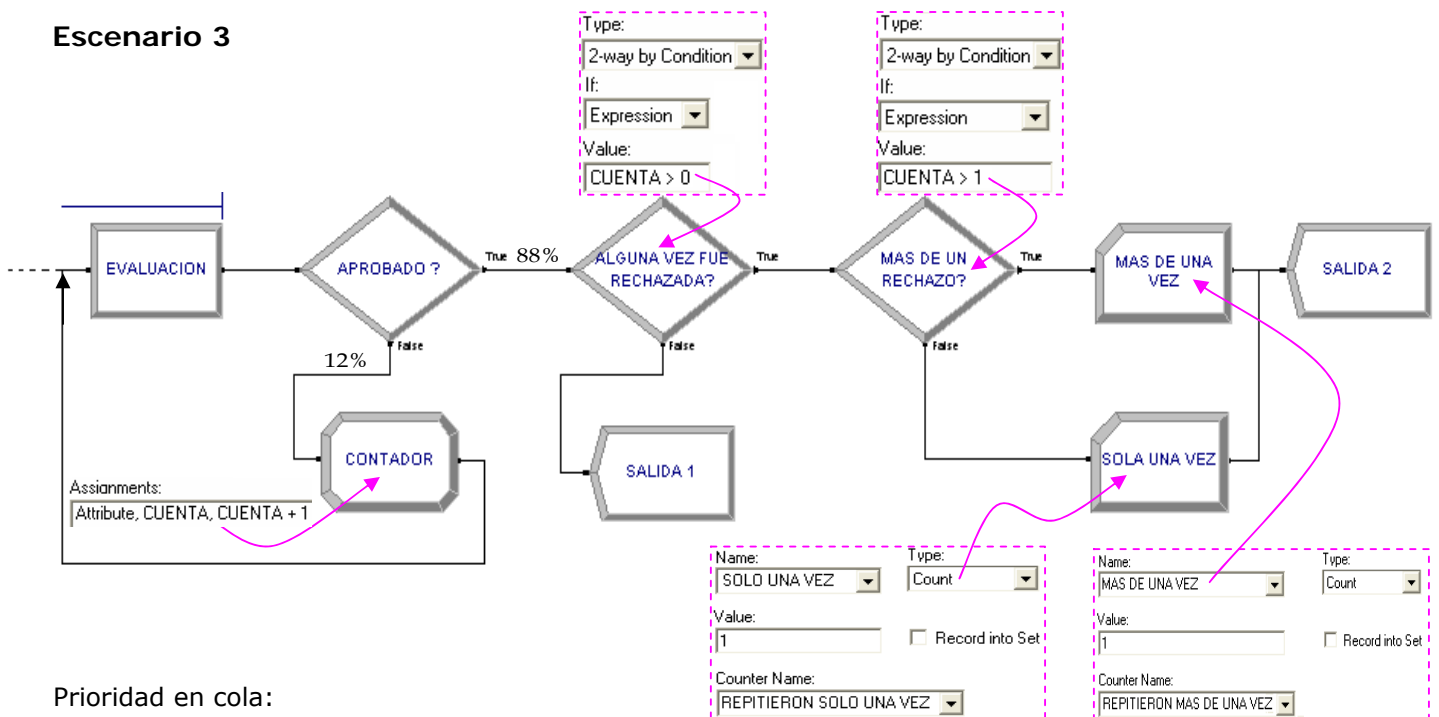
Tally Name
1 TIEMPO PROM APROBACION 1
2 TIEMPO PROM APROBACION 2
3 TIEMPO PROM APROBACION 3

User Specified			
Time Persistent			
Variable	Average	Minimum Value	Maximum Value
PRESUPUESTO	2008303.60	0.00	4145000

Usage			
None	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO PROM APROBACION 1	1.3532	0.6575	3.1810
TIEMPO PROM APROBACION 2	1.2540	0.3122	3.5813
TIEMPO PROM APROBACION 3	2.5229	1.3432	3.8806

**Escenario 3**



**Prioridad en cola:**

Name	Type	Attribute Name
1 EVALUACION.Queue	Highest Attribute Value	CUENTA

Run Setup...

Replication Length: 20 Time Units: Days

Hours Per Day: 10 Base Time Units: Hours

User Specified	
Counter	
Count	Value
REPITIERON SOLO UNA VEZ	5.0000
REPITIERON MAS DE UNA VEZ	3.0000



## Caso de estudio

De compras<sup>6</sup>

## Objetivos:

- o Módulo avanzado Delay.
- o Determinación del indicador Work In Process (WIP).
- o Función discreta DISC.

Una tienda tiene dos puertas de acceso para el ingreso y salida de los clientes; dentro de la tienda hay tres secciones, una para cada tipo de mercadería; cada sección cuenta con una caja de pago.

Los clientes que ingresan a la tienda de ventas por la Puerta 1 lo hacen de acuerdo con una  $\text{Expo}(3)$  minutos y los que lo hacen por la Puerta 2 en intervalos de tiempo según una  $\text{Expo}(3.5)$  minutos. El número de secciones que visita cada cliente y el número de prendas que compra se muestran a continuación:

Número secciones a visitar	Probabilidad	Número de prendas	Probabilidad
1	25%	1	40%
2	45%	2	30%
3	30%	3	30%

Las personas que visitan una sola sección solo visitan la Sección 1. Las que visitan dos secciones visitan las secciones 1 y 2, en ese orden. Quienes visitan las 3 secciones lo hacen en el orden 1, 2 y 3. Considerar que el número de prendas que se compra en una sección se determina en la misma sección.

En cada sección, antes de determinar cuántas prendas comprar, el cliente se pasea por ella para elegir; este paseo tiene un tiempo de duración distribuido uniformemente entre 3 y 6 minutos. El tiempo de selección por prenda que se va a comprar corresponde a una  $\text{UNIF}(2,4)$  minutos (para  $n$  prendas el tiempo será  $n \cdot \text{UNIF}(2,4)$ ).

En cada sección hay una caja, pero el cliente paga en la caja de la última sección visitada. El tiempo que demanda pagar es una  $\text{UNIF}(n \cdot 0.5, n \cdot 1.5)$  minutos, donde " $n$ " es el número total de prendas. Después de pagar los clientes abandonan inmediatamente el local. Se pide:

1. Formular el modelo que simule el funcionamiento de la tienda y ejecutarlo para 11 horas de trabajo continuo.
2. Determinar los valores de los siguientes indicadores:
  - Tiempo promedio que un cliente se pasa en la tienda.
  - Número de clientes promedio en la tienda.
  - Utilización de cada caja.
  - Tiempo promedio de espera en cada caja.

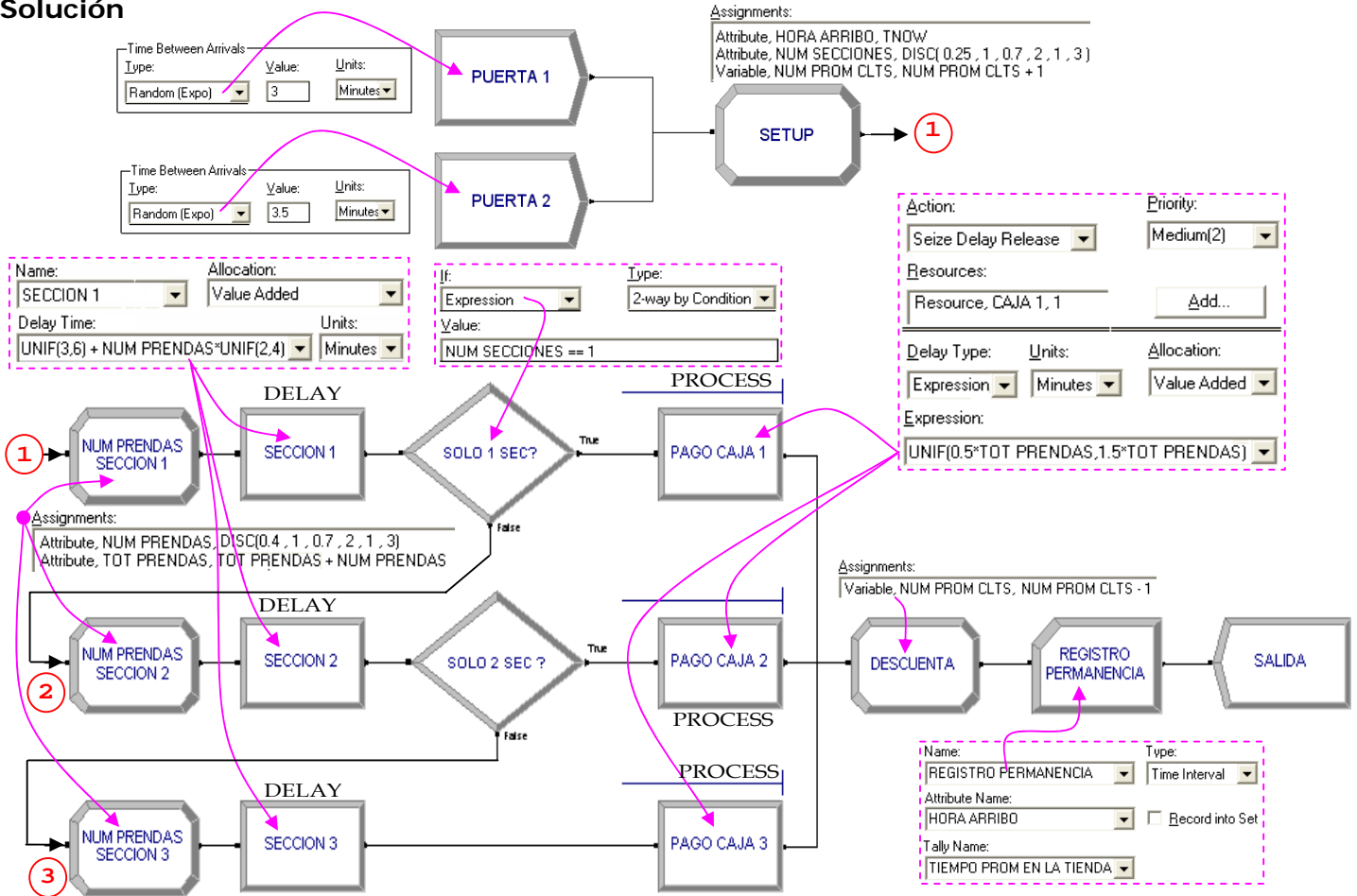
### Escenario

Considerar que los clientes que visitan una sola sección pueden hacerlo a cualquiera de las tres, bajo las siguientes probabilidades: el 45% visita la sección 1, el 10% visita la sección 2 y el resto la sección 3.

Modelar los cambios necesarios y presentar los mismos indicadores del escenario inicial, compararlos y explicar qué problemas podría ocasionar este nuevo comportamiento de los clientes.

<sup>6</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica integrada 2006-2".

**Solución**



Variable	Name	Rows	Columns	Clear Option	Initial Values	Report Statistics
1	NUM PROM CLTS			System	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

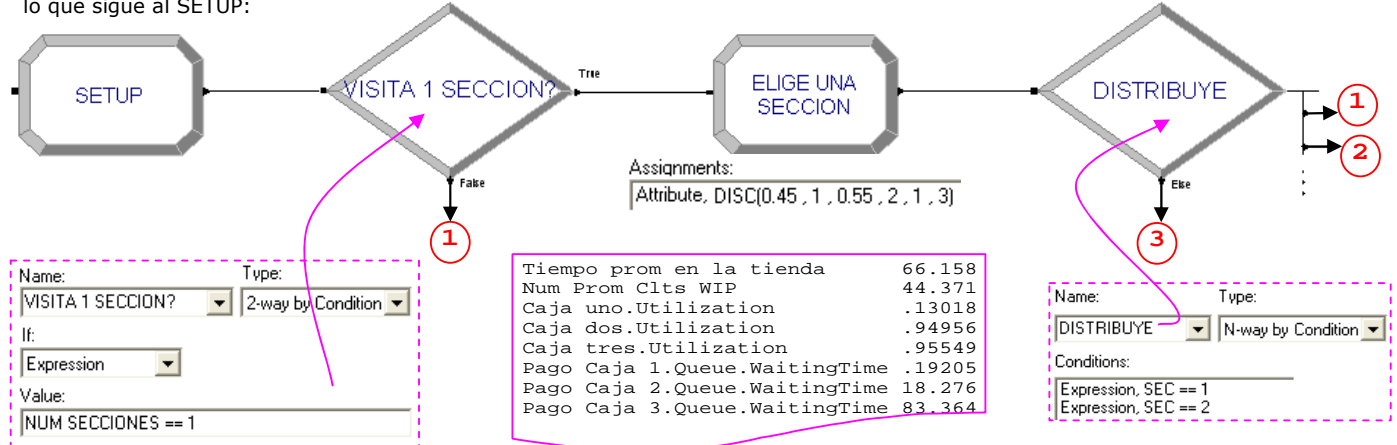
Resource	Name	Type	Capacity
1	CAJA 1	Fixed Capacity	1
2	CAJA 2	Fixed Capacity	1
3	CAJA 3	Fixed Capacity	1

Run Setup...  
 Replication Length: 11 | Time Units: Hours  
 Hours Per Day: 24 | Base Time Units: Minutes

Resource Usage		Queue Time		User Specified	
Instantaneous Utilization	Average	Waiting Time	Average	Interval	Average
CAJA 1	0.2820	PAGO CAJA 1.Queue	0.4778	TIEMPO PROM EN LA TIENDA	44.3376
CAJA 2	0.9365	PAGO CAJA 2.Queue	24.0780	Variable	Average
CAJA 3	0.9419	PAGO CAJA 3.Queue	32.4130	NUM PROM CLTS	27.1486

**Escenario**

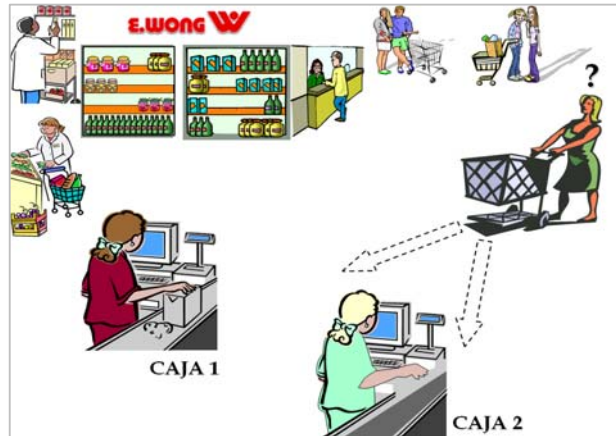
Agregar al modelo original lo que sigue al SETUP:



## 8. MÓDULO DE DATOS: CONJUNTO DE RECURSOS

Las entidades que ingresan a un sistema, por lo general, compiten entre sí para obtener un recurso (personas, máquinas, equipos, etcétera). Una entidad toma un recurso cuando está disponible (Seize) y lo libera cuando termina de utilizarlo (Release). De otro modo, una entidad podría seleccionar un objeto, de un conjunto (Set) de objetos similares; por ejemplo, la selección de una secretaria para un *pool*; cualquiera de sus miembros puede realizar la función, sin embargo se selecciona a una de ellas bajo alguna regla o criterio.

En el esquema adjunto se observa un Set de cajas que posee dos elementos: Caja 1 y Caja 2.



El cliente se dispone a pagar y se encuentra frente a dos cajas disponibles, entonces elige una, bajo alguna regla o criterio.

### 8.1 Criterios de selección de recursos

- *Cyclical.* - Se selecciona el recurso en forma alternada, es decir, se toma al primer recurso disponible comenzando desde el sucesor hasta el último seleccionado. Al terminar la lista, el ciclo se repite.
- *Random.* - La selección del recurso se hace en forma aleatoria, entre los recursos disponibles en ese momento. Todos los recursos son equiprobables de ser elegidos.
- *Preferred Order.* - Se selecciona el recurso sobre la base de un orden de preferencia, establecido al ingresar los miembros del conjunto (módulo de datos Set).
- *Specific Member.* - Selección de un miembro específico del conjunto. Se debe señalar el índice del miembro que se va a seleccionar. Este índice se genera según el orden ingresado de los miembros al conjunto.
- *Largest Remaining Capacity.* - Se selecciona el recurso que tiene la mayor capacidad ociosa, tomando como indicador el número de unidades remanentes (disponibles), en ese momento. *Ejemplo:* Operarios1 (ocupados: 1/3) versus Operarios2 (ocupados 3/4), se selecciona Operarios1 porque tiene 2 unidades remanentes, respecto a Operarios2 que tiene 1 unidad remanente.
- *Smallest Number Busy.* Se selecciona el recurso que se ha sido asignado menos veces, desde el inicio de la simulación, hasta ese momento. *Ejemplo:* Máquina1 (30 veces) versus Máquina2 (28 veces), se selecciona Máquina2 porque ha sido utilizada menos veces (*smallest number busy*).

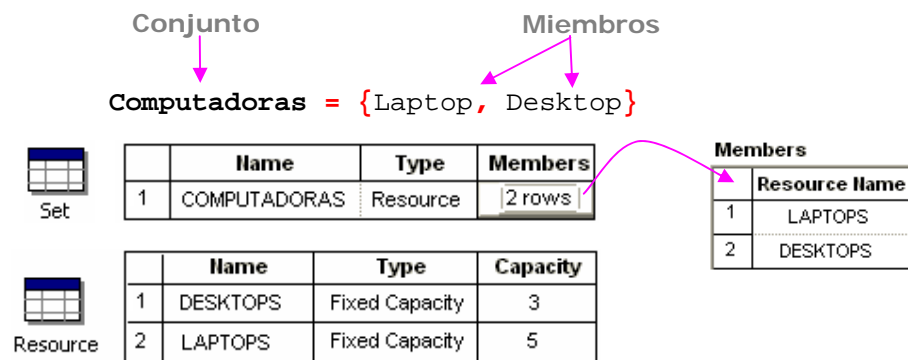
*Ejemplo 1*

- Proceso: Crear documento, NORM(5, 0.5) minutos.
- Requerimientos: 1 computadora (cualquiera)
- Regla de selección: Se prefiere una *laptop*.
- Recursos:

Computadoras	Unidades disponibles
<i>Laptop</i>	5
<i>Desktop</i>	3

**Solución:**

Según el orden de los miembros en el conjunto y ante cualquier requerimiento seleccionará la *laptop* (tiene prioridad porque está ubicada en la primera posición en el conjunto), siempre y cuando esté disponible, de lo contrario seleccionará la *desktop*. Si no existieran unidades disponibles, entonces la entidad permanece en cola de espera hasta que se libere alguna.



The image shows two screenshots from a simulation software interface:

- Process Window:**
  - Name: CREAM DOCUMENTO
  - Type: Standard
  - Logic: Seize Delay Release
  - Priority: Medium(2)
  - Resources: Set, COMPUTADORAS, 1, Preferred Order
  - Delay Type: Normal
  - Units: Minutes
  - Allocation: Value Added
  - Value (Mean): 5
  - Std Dev: 0.5
  - Report Statistics:
- Resources Window:**
  - Type: Set
  - Set Name: COMPUTADORAS
  - Quantity: 1
  - Selection Rule: Preferred Order
  - Save Attribute: (empty)

*Ejemplo 2*

- Proceso: Edición de contratos, TRIA(15, 17, 20) minutos.
- Recursos: Se tiene las siguientes secretarias: Kelly, Vicky y Juanita.
- Requerimientos: Se requiere 1 secretaria (cualquiera puede ejercer la función).
- Prioridad: Los trabajos pueden encargarse a cualquiera de ellas, pero la prioridad es que Vicky sea seleccionada antes que Juanita y Juanita antes que Kelly, siempre y cuando estén disponibles.
- La secretaria elegida quedará disponible cuando finalice otro proceso posterior de firmas, recién entonces se liberará.

**Solución:**

The diagram illustrates the configuration for a process. It consists of several components:

- Set:** A small table icon labeled 'Set'.
- Conjunto (Set Table):** A table with columns 'Name', 'Type', and 'Members'. It contains one row: '1', 'POOL DE SECRETARIAS', 'Resource' with '3 rows' in the 'Members' column.
- Miembros (Members Table):** A table with columns 'Resource Name' and 'Index'. It contains three rows: '1', 'VICKY'; '2', 'JUANITA'; '3', 'KELLY'.
- Process Dialog:** A window titled 'Process' with fields for Name ('EDICION DE CONTRATOS'), Type ('Standard'), Logic ('Seize Delay'), Priority ('Medium(2)'), Resources ('Set, POOL DE SECRETARIAS, 1, Preferred Order, NUM'), Delay Type ('Triangular'), Units ('Minutes'), Allocation ('Value Added'), and Minimum/Maximum values (15, 17, 20).
- Resources Dialog:** A window titled 'Resources' with fields for Type ('Set'), Set Name ('POOL DE SECRETARIAS'), Quantity ('1'), Selection Rule ('Preferred Order'), and Save Attribute ('NUM').

Arrows indicate the following relationships:

- The 'Set' icon points to the 'Conjunto' table.
- The 'Conjunto' table points to the 'Members' table.
- The 'Members' table points to the 'Resources' dialog.
- The 'Resources' dialog points to the 'Process' dialog.

Al ingresar un contrato (entidad) al módulo Process, este solicita un miembro del conjunto denominado *Pool de secretarias*. Dado que la secretaria asignada continuará siendo utilizada, aun después de este proceso, entonces la acción será de tipo: Delay-Release y se graba el índice del recurso asignado en el atributo NUM, para hacer referencia a este al momento de liberarlo (*Specific Member* → *NUM*).

El orden de ingreso de los miembros del conjunto es importante, ya que según ello se realizará el criterio de selección *Preferred Order*, es decir Vicky antes que Juanita y Juanita antes que Kelly. Si el criterio fuera cíclico la selección sería: Vicky-Juanita-Kelly-Vicky-Juanita-Kelly, etcétera, siempre que estén disponibles.

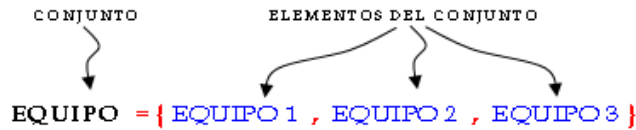


*Ejemplo 3*

- Proceso: Taladrar
- Duración: Normal(2, 0.3) minutos
- Requerimientos: 1 equipo (cualquiera)
- Regla de selección: Alternada, para evitar sesgo de solicitar siempre los equipos nuevos.

Equipo	Núm. de Unid. disponibles	Referencia
Equipo 1	3	Nuevos
Equipo 2	7	Medianos
Equipo 3	4	Antiguos

**Solución**



Set

Set - Basic Process			
	Name	Type	Members
1	EQUIPO	Resource	3 rows

Members

	Resource Name
1	EQUIPO 1
2	EQUIPO 2
3	EQUIPO 3

Resource

Resource - Basic Process			
	Name	Type	Capacity
1	EQUIPO 1	Fixed Capacity	3
2	EQUIPO 2	Fixed Capacity	7
3	EQUIPO 3	Fixed Capacity	4



Process

Name: TALADRAR Type: Standard

Logic

Action: Seize Delay Release Priority: Medium(2)

Resources: Set, EQUIPO, 1, Cyclical

Delay Type: Normal Units: Minutes Allocation: Value Added

Value (Mean): 2 Std Dev: 0.3

Reprpt Statistics

Resources

Type: Set

Set Name: EQUIPO Quantity: 1

Selection Rule: Cyclical Save Attribute:

*Ejemplo 4*

- Proceso: Tarea 1, UNIF(15,20) minutos.
- Requerimientos: 1 operario.
- Recursos: Se dispone de un equipo de 3 operarios (Orden 3→ 1→ 2).
- Regla de selección: El ejecutante será el segundo operario del equipo.

**Solución**

INDICE →

*Ejemplo 5*

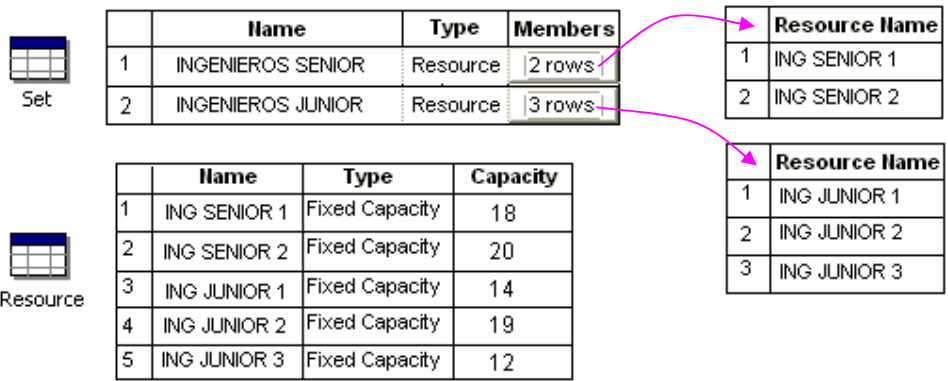
- Proceso: Control; Duración: UNIF(15, 20) minutos.
- Recursos:

Ingenieros <i>senior</i>	Capacidad
Ingeniero <i>senior</i> 1	18
Ingeniero <i>senior</i> 2	20

Ingenieros <i>junior</i>	Capacidad
Ingeniero <i>junior</i> 1	14
Ingeniero <i>junior</i> 2	19
Ingeniero <i>junior</i> 3	12

- Requerimientos:  
2 Ingenieros *senior* (de cualquier grupo, pero ambos del mismo grupo)  
2 Ingenieros *junior* (de cualquier grupo, pero ambos del mismo grupo)
- Regla de selección: Cíclica.

### Solución



**Process**

Name: CONTROL Type: Standard

Logic

Action: Seize Delay Release Priority: Medium(2)

Resources: Set, INGENIEROS SENIOR, 2, Cyclical, Set, INGENIEROS JUNIOR, 2, Cyclical

Delay Type: Uniform Units: Minutes Allocation: Value Added

Minimum: 15 Maximum: 20

Report Statistics

OK Cancel

**Resources**

Type: Set

Set Name: INGENIEROS SENIOR Quantity: 2

Selection Rule: Cyclical Set Index:

**Ingenieros Senior**  
 Se asignará en forma cíclica a cualquiera de los 2 miembros del conjunto (Ing Senior 1 o IngSenior2), siempre y cuando se disponga de la cantidad que se solicita. La asignación siempre se efectúa a un solo miembro del conjunto.

**Resources**

Type: Set

Set Name: INGENIEROS JUNIOR Quantity: 2

Selection Rule: Cyclical Set Index:

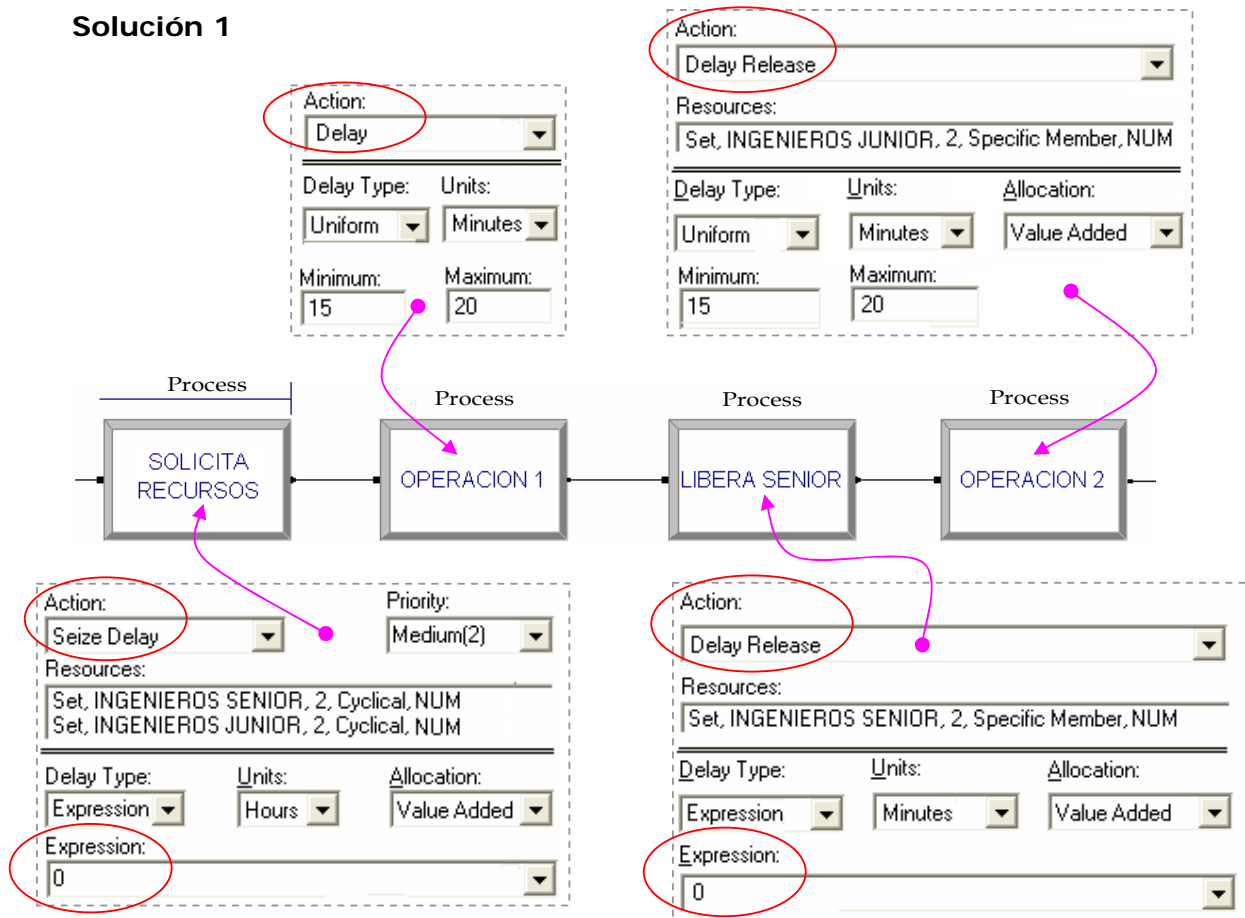
**Ingenieros Junior**  
 El conjunto Ingenieros Junior tiene 3 miembros (Ing Junior 1, Ing Junior 2 e Ing Junior 3), se asignará en forma cíclica a cualquiera de los miembros del conjunto, que disponga de la cantidad que se solicita. La asignación se realiza a uno de los miembros del conjunto.

**Nota:** La regla dentro de cada conjunto es "o"; ejemplo: Ing Junior 1 o Ing Junior 2 o Ing Junior 3. La regla para asignar la lista de recursos es "y"; ejemplo: dos Ing Senior y dos Ing Júnior.

### Escenario

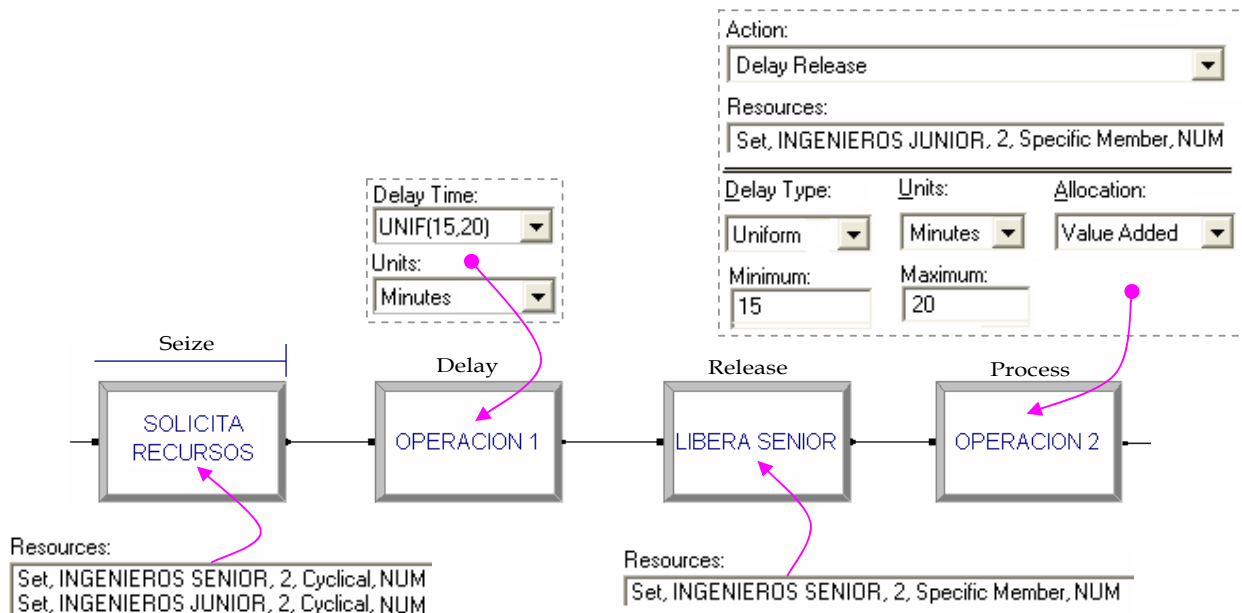
Respecto al Ejemplo 5, supóngase que se requiere la misma lista (2 Senior y 2 Junior) para ejecutar la Operación 1, luego de esta se liberan solo los ingenieros Senior. Los ingenieros Junior continúan y ejecutan la Operación 2, cuya duración es la misma que la Operación 1. Al terminar la Operación 2 se liberan los ingenieros Junior. Se pide presentar el modelo que sigue esta secuencia.

### Solución 1



**Nota:** En el instante en que se asignan recursos de cada conjunto (Seize Delay) se graba en un atributo NUM el índice del recurso asignado. Posteriormente, al momento de liberar el recurso se hace referencia a Especific member → Num.

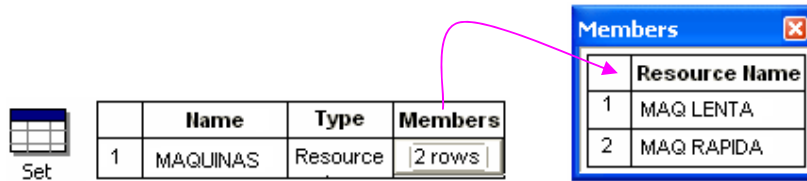
### Solución 2: Utilizando los módulos avanzados Seize, Delay y Release



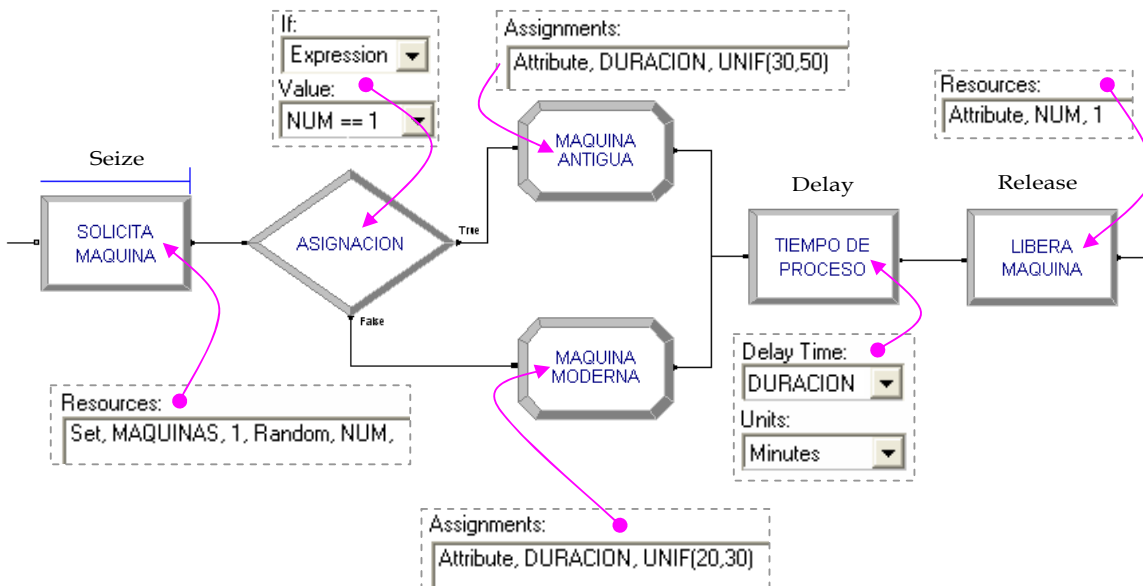
*Ejemplo 6*

- Proceso: Maquinado.
- Recursos: Se dispone de 2 máquinas: una antigua y otra moderna.
- Tiempo de proceso: Máquina antigua → UNIF(30, 50) minutos.  
Máquina moderna → UNIF(20,30) minutos.
- Regla de selección: Aleatorio.

*Solución:*



Utilizando los módulos avanzados Seize-Delay-Release tenemos:



## 8

## Caso de estudio

**Control de ingreso de pasajeros en el aeropuerto<sup>7</sup>**

## Objetivos:

- o Conjunto de recursos: Resource Set.
- o Declaración de un conjunto y sus miembros: módulo de datos Set.
- o Reglas de selección del recurso (módulo Process).
- o Prioridad en la selección del recurso: High, Medium, Low (módulo Process).

En el *counter* de una aerolínea en el aeropuerto, se forman dos colas de pasajeros que esperan por el *check in*. Una de las colas se destina a los pasajeros de primera clase; la otra cola es para pasajeros de segunda clase. En el *counter* se dispone de 6 *agentes* para la atención de los pasajeros. La distribución de los agentes es como sigue:

1. El agente 1 y el agente 2 atienden en forma exclusiva a los pasajeros de primera clase. Al llegar un pasajero al mostrador, y si ambos agentes están disponibles, entonces la prioridad de atención la tiene el agente 2.
2. El agente 3 y el agente 4 atienden en forma exclusiva a los pasajeros de segunda clase. Al llegar un pasajero al mostrador, y si ambos agentes están disponibles, entonces la prioridad de atención la tiene el agente 3.
3. El agente 5 y el agente 6 son comodines; es decir, atienden ambos tipos de pasajeros, pero solo si no existe disponibilidad de los agentes asignados exclusivamente, quienes tienen la prioridad de atención. Dado el caso, se ha convenido que el agente 5 tenga la prioridad de atención (respecto al agente 6).



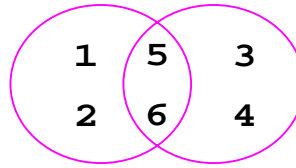
Los pasajeros de primera clase arriban con una distribución exponencial con media entre arribos de 5 minutos. Los pasajeros de segunda clase arriban con una exponencial con media entre arribos de 2 minutos. El tiempo de atención en el mostrador varía según la clase del ticket. Los pasajeros de primera clase tienen un tiempo de atención uniformemente distribuido entre 2 y 20 minutos. Los pasajeros de segunda clase tardan una distribución triangular con una moda de 6 minutos, con valores mínimo y máximo de 3 y 12 minutos. Simular durante 300 minutos.

<sup>7</sup> Enunciado tomado de VENEROS MANRIQUE, H. Op. cit.

**Solución**

	Name	Type	Capacity
1	AGENTE 1	Fixed Capacity	1
2	AGENTE 2	Fixed Capacity	1
3	AGENTE 3	Fixed Capacity	1
4	AGENTE 4	Fixed Capacity	1
5	AGENTE 5	Fixed Capacity	1
6	AGENTE 6	Fixed Capacity	1

EQUIPO 1    EQUIPO 2

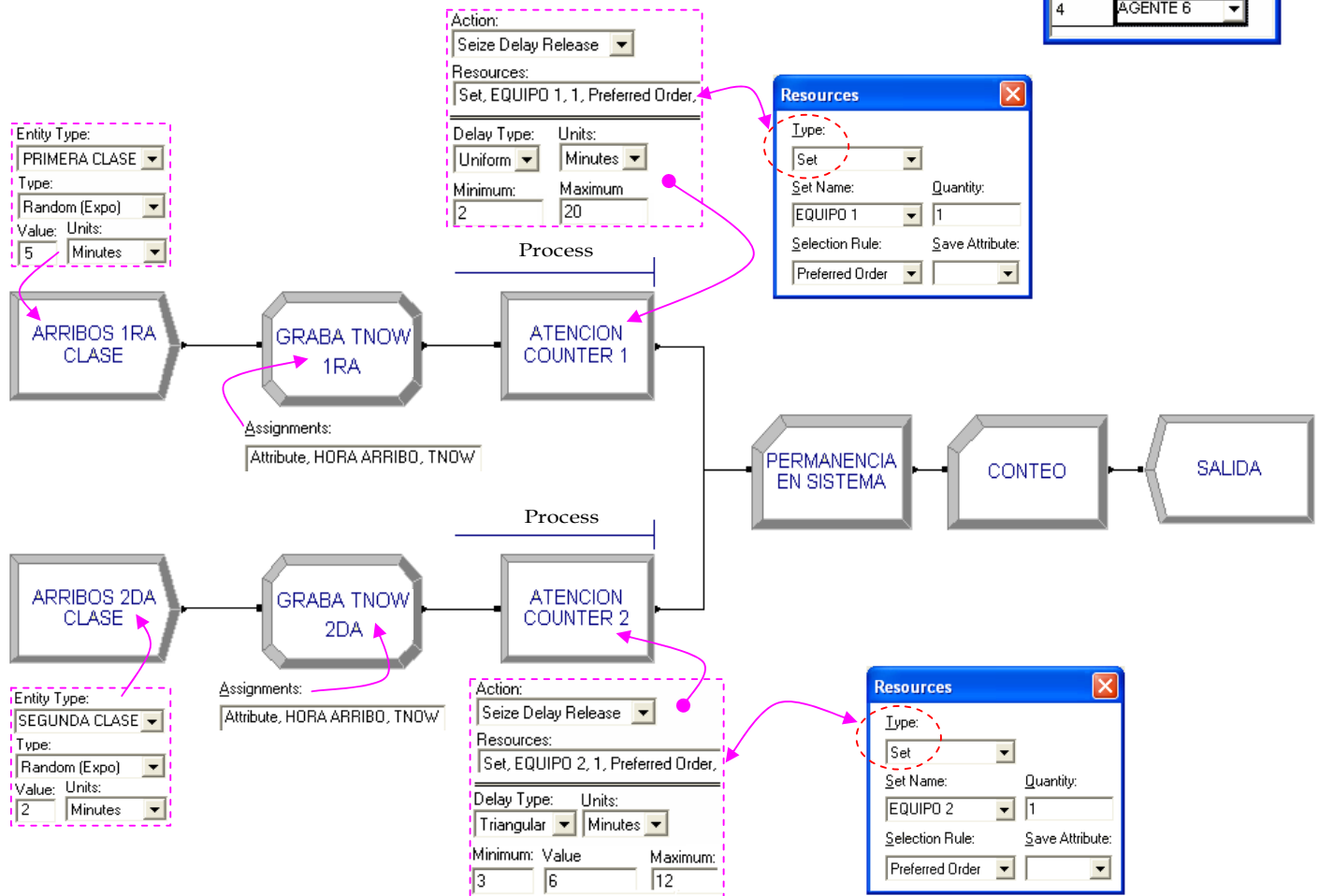


	Name	Type	Members
1	EQUIPO 1	Resource	4 rows
2	EQUIPO 2	Resource	4 rows

	Resource Name
1	AGENTE 2
2	AGENTE 1
3	AGENTE 5
4	AGENTE 6

	Resource Name
1	AGENTE 3
2	AGENTE 4
3	AGENTE 5
4	AGENTE 6

Este módulo se genera en forma automática al ingresar los miembros de los sets.



Run    Setup...

Replication Length: 300    Time Units: Minutes

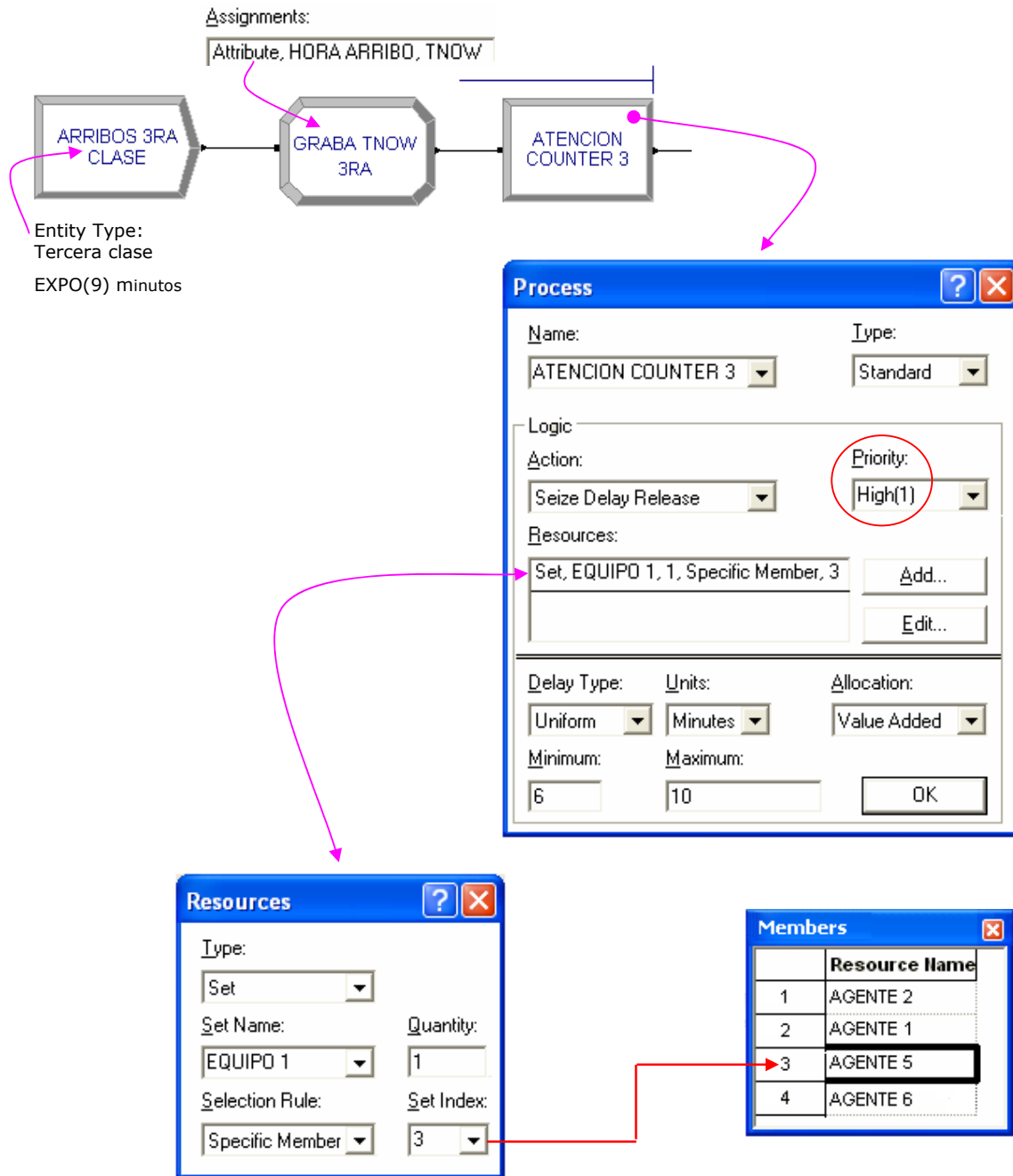
Hours Per Day: 24    Base Time Units: Minutes

Usage		Average
TS PRIMERA CLASE		14.6831
TS SEGUNDA CLASE		15.7203
Counter		Count
NUM PRIMERA CLASE		137.00
NUM SEGUNDA CLASE		53.0000

### Escenario

Suponga que la aerolínea decide crear una categoría adicional y exclusiva para clientes VIP. Se estima que estos llegarán al *counter* de acuerdo con una distribución exponencial con una media de 9 minutos. Se ha dispuesto que estos clientes sean atendidos en forma prioritaria solo por el agente 5. Se ha determinado que el tiempo de atención se ajusta a una distribución de probabilidad uniforme, entre 6 y 10 minutos.

### Solución







## Caso de estudio

**Atención a alumnos en asesoría**

## Objetivos:

- o Estado transitorio de la simulación.
- o Aplicación de los módulos: Decide, Assign, Process y Record.
- o Conjunto de recursos Set Preferred Order.
- o Función discreta Disc.
- o Módulo de Datos Statistic (Advanced Process).

Alumnos de diversas facultades de nuestra universidad llegan a una sala de asesoría para realizar consultas sobre los cursos Investigación de Operaciones (IO) y Simulación de Sistemas. Se desea investigar sobre la cantidad de alumnos que asisten por cada materia y el tiempo promedio que ellos expenden en sus consultas.

Para realizar este estudio se desea tomar una muestra considerando una mañana de 08:00 a 13:00 horas y dos profesores, uno de cada especialidad. Se sabe que los arribos de los alumnos se producen de acuerdo a una EXPO(15) minutos. Los horarios de atención se muestran en la siguiente tabla. A la hora de cierre del horario, el profesor cierra la puerta de su oficina y no recibe a ningún alumno más, pero atiende a todos los alumnos que llegaron en el horario correcto, para luego retirarse.

**Horario de atención de alumnos**

08:00 – 10:00	Profesor de IO
11:00 – 13:00	Profesor de Simulación
12:00 – 13:00	Profesor de IO

Se sabe también que el 60% de los alumnos que asisten a las asesorías realizan consultas sobre el curso IO; el resto lo hace sobre el de Simulación. Si un alumno requiere consultar sobre IO o sobre Simulación en un horario diferente al programado para el curso, entonces encontrará la puerta del profesor correspondiente cerrada y optará por retirarse. Considerar que los alumnos que asisten por consultas de IO emplean un tiempo que se ajusta a una UNIF(10, 12) minutos, mientras que en el caso de Simulación emplean en promedio una UNIF(13, 15) minutos.

1. Formular un modelo adecuado al sistema descrito y simularlo hasta que se haya retirado el último alumno que llegó antes de las 13:00 horas.

**Nota:** Suponga que a las 13:00 horas no se permitirá ingresar a más alumnos, pero los que están en cola serán atendidos. Entonces la simulación terminará cuando salga el último estudiante.

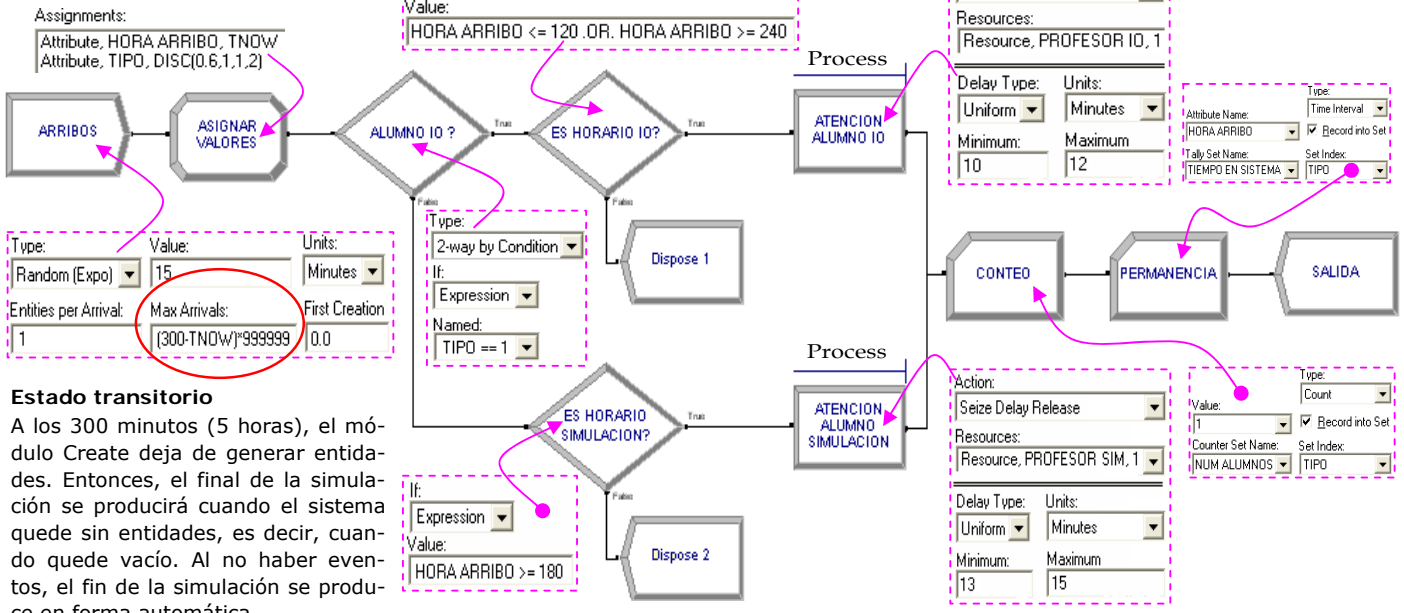
2. Presentar los siguientes indicadores de desempeño:

- Permanencia promedio de los alumnos atendidos en la asesoría.
- Tiempo promedio de espera para ser atendido y tamaño máximo de las colas.
- Número de alumnos atendidos por cada profesor.
- Número de alumnos que se retiran sin ser atendidos.
- ¿A qué hora termina de ser atendido el último alumno?

**Escenario**

Adicionar al caso la siguiente condición. Si un alumno requiere consultar sobre IO y solo se encuentra el profesor de Simulación, entonces podrá hacerle su consulta. En el caso de que se encuentren ambos profesores el alumno podrá atenderse con cualquiera de ellos, pero preferirá al profesor de IO.

### Solución



### Estado transitorio

A los 300 minutos (5 horas), el módulo Create deja de generar entidades. Entonces, el final de la simulación se producirá cuando el sistema quede sin entidades, es decir, cuando quede vacío. Al no haber eventos, el fin de la simulación se produce en forma automática.

Set	Name	Type	Members
1	NUM ALUMNOS	Counter	2 rows
2	TIEMPO EN SISTEMA	Tally	2 rows

Name	Type	Expression
1	Output	DISPOSE 1.NUMBEROUT
2	Output	DISPOSE 2.NUMBEROUT
3	Output	TNOW

Run Setup...

Replication Length: Infinite  
 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24  
 Base Time Units: Minutes

Terminating Condition:

User Specified Usage		Queue	
	Average	Waiting Time	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	11.8231	ATENCION ALUMNO IO.Queue	1.0954
TIEMPO EN SISTEMA 2	16.4351	ATENCION ALUMNO SIMULACION.Queue	2.7865
Count	Value	Number Waiting	Average
NUM ALUMNOS 1	5.0000	ATENCION ALUMNO IO.Queue	0.01564214
NUM ALUMNOS 2	5.0000	ATENCION ALUMNO SIMULACION.Queue	0.03979153
Output	Value		
ALUMNOS SIN ATENDER 1	1.0000		
ALUMNOS SIN ATENDER 2	6.0000		
FIN DE LA SIMULACION	350.13		

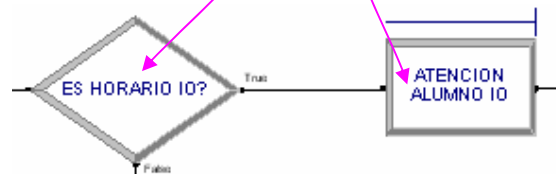
### Escenario

Set	Name	Type	Members
3	PROFESORES	Resource	2 rows

Resource Name
1 PROFESOR IO
2 PROFESOR SIM

**If:**  
 Expression: HORA ARRIBO <= 120 .OR. HORA ARRIBO >= 180

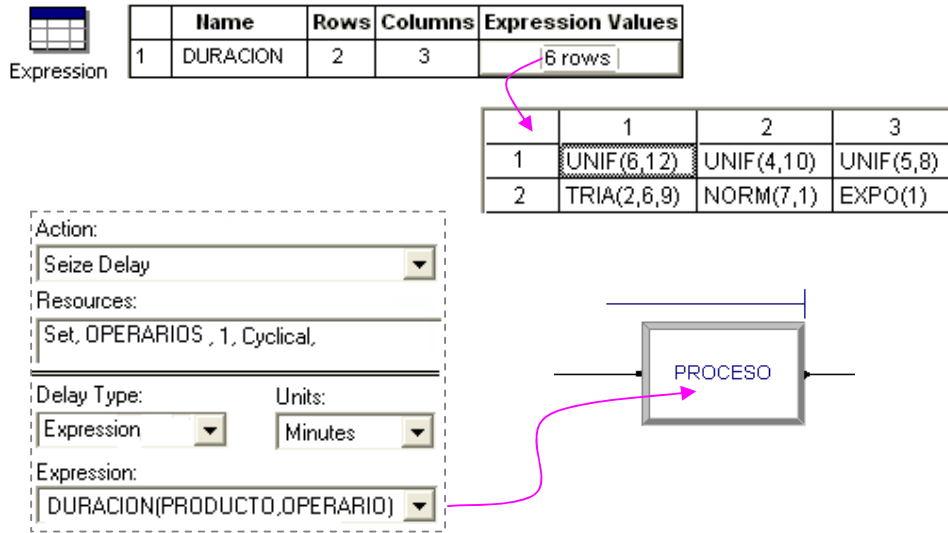
**Action:**  
 Seize Delay Release  
 Resources: Set, PROFESORES, 1, Preferred Order,  
 Delay Type: Uniform  
 Units: Minutes  
 Minimum: 10, Maximum: 12



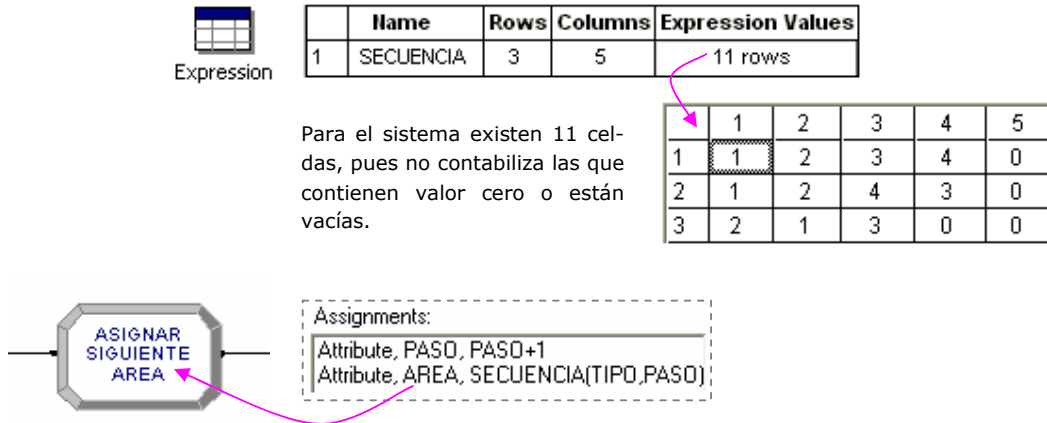
## 9. MÓDULO DE DATOS "EXPRESSION" (ESTRUCTURA DE DATOS)

Una manera eficiente de representar los datos en el modelo es mediante el módulo avanzado de datos Expression. Las expresiones o Expression son estructuras de datos representados mediante arreglos de una y dos dimensiones, que son referenciadas en el modelo mediante el nombre con el que fueron definidas. El valor de una expresión puede ser obtenido mediante la combinación de números enteros o reales, distribuciones estadísticas, paréntesis, operadores, atributos y variables.

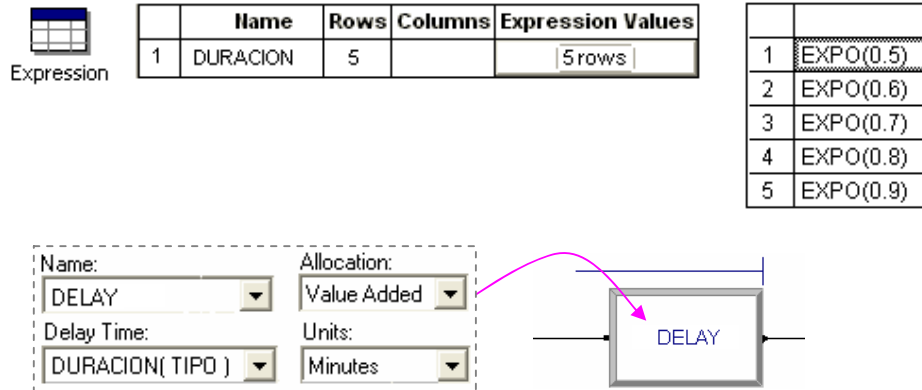
*Ejemplo 1:*



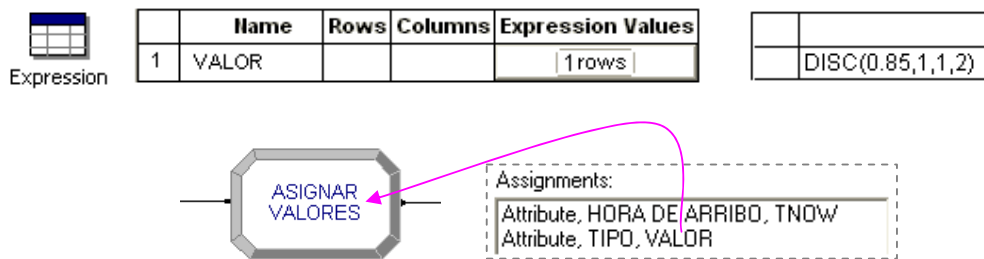
*Ejemplo 2:*



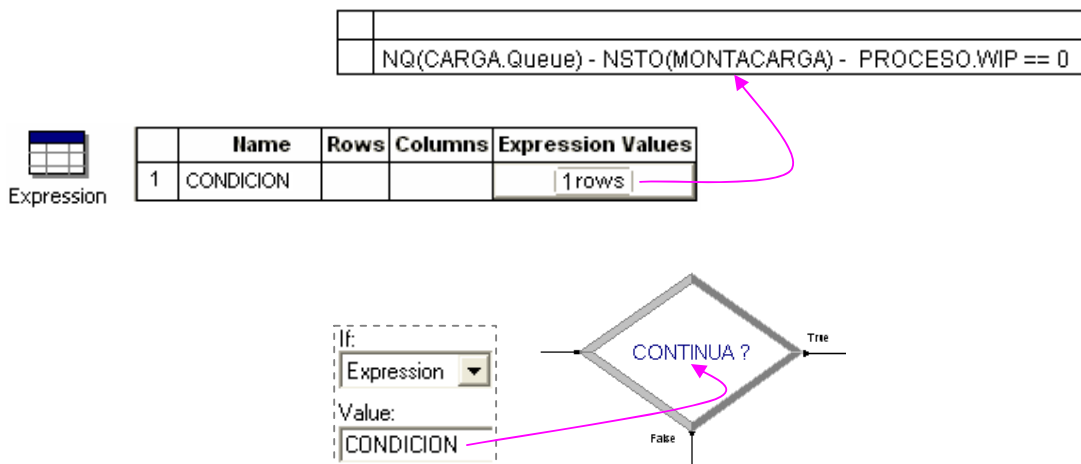
*Ejemplo 3:*



*Ejemplo 4:*

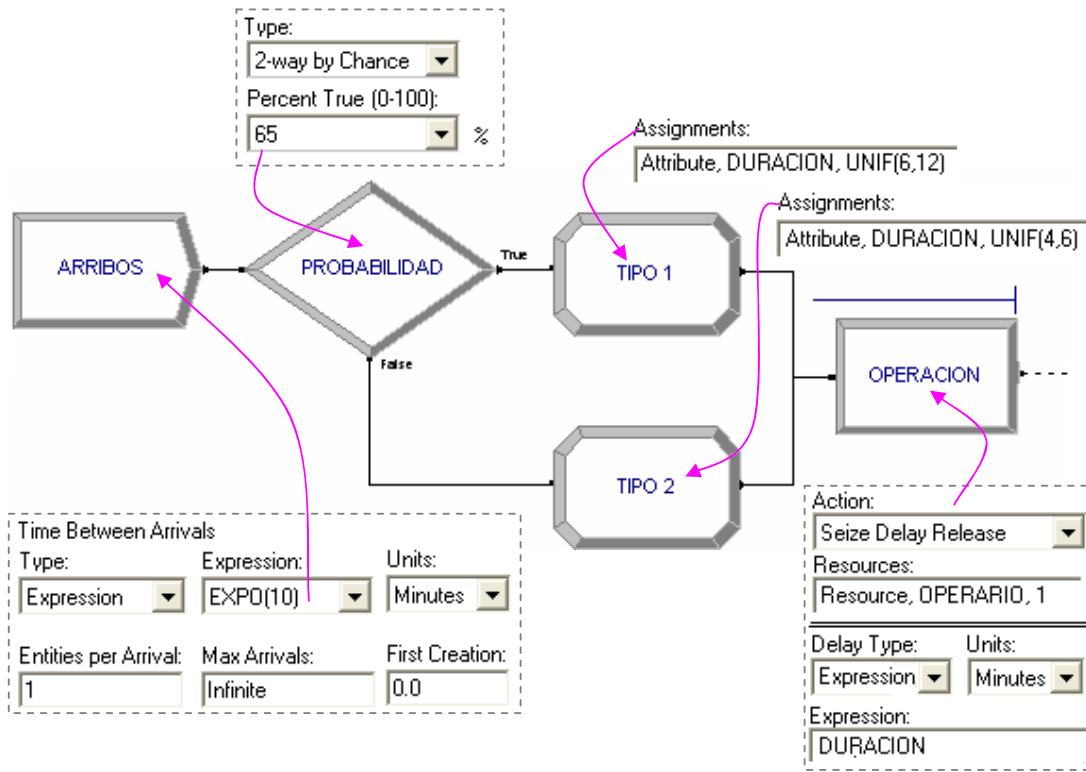


*Ejemplo 5:*

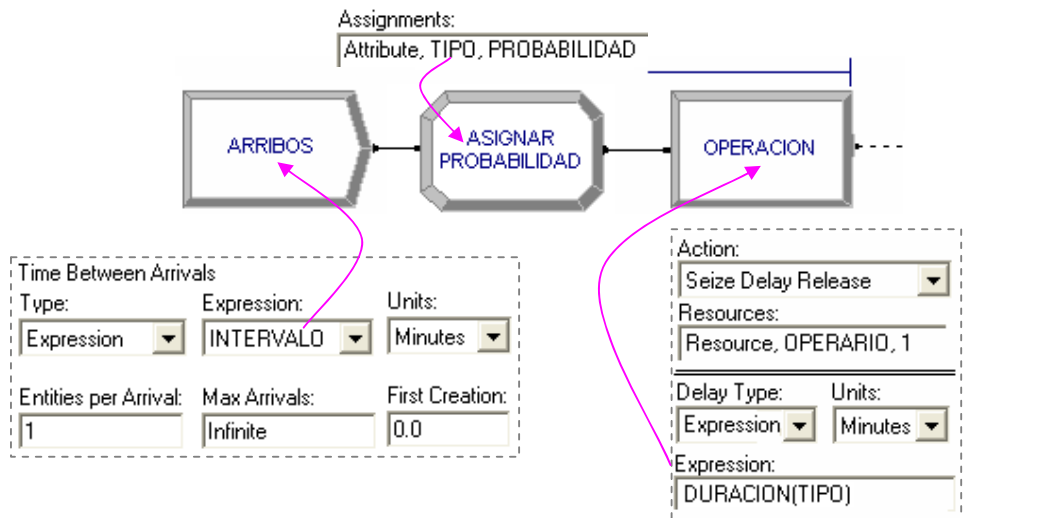


*Ejemplo 6:*

Data dentro del modelo:



Data fuera del modelo:



	Name	Rows	Columns	Expression Values
1	INTERVALO			1 rows
2	PROBABILIDAD			1 rows
3	DURACION	2		2 rows

	EXPO(10)
	DISC(0.65,1,1,2)

1	UNIF(6,12)
2	UNIF(4,6)

**Nota:** Con este enfoque, los datos pueden cambiar pero el modelo no se altera.

Ejemplo 7:

Data:

Expression

	Name	Rows	Columns	Expression Values
1	INTERVALO			1 rows
2	PROBABILIDAD			1 rows
3	TIEMPO	3	2	6 rows

EXPO(60)

DISC(0.4,1,0.7,2,1,3)

Members

	Resource Name
1	MAQ1
2	MAQ2

Set

	Name	Type	Members
1	MAQUINAS	Resource	2 rows

PIEZAS

	MÁQUINAS	
	1	2
1	EXPO(3)	TRIA(2,6,9)
2	UNIF(5,8)	EXPO(3)
3	NORM(12,4)+UNIF(3,6)	UNIF(4,8)

Modelo:

Assignments:  
Attribute, TIPO, PROBABILIDAD

```

    graph LR
        A[LLEGADA DE PIEZAS] --> B[ASIGNAR TIPO]
        B --> C[MAQUINADO]
        C --> D[SALIDA]
    
```

Time Between Arrivals

Type: Expression Expression: INTERVALO Units: Minutes

Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: Infinite First Creation: 0.0

Action: Seize Delay Release

Resources: Set, MAQUINAS, 1, Preferred Order, NUMMAQ

Delay Type: Expression Units: Minutes

Expression: TIEMPO(TIPO, NUMMAQ)

Type: Set

Set Name: MAQUINAS Quantity: 1

Selection Rule: Preferred Order Save Attribute: NUMMAQ

**Nota:**

- El tiempo de proceso de maquinado depende del tipo de pieza y de la máquina que realice la operación.
- En el instante en que se asigna la máquina a la entidad se guarda en un atributo el índice de la máquina asignada.
- Con los atributos Tipo de pieza y número de máquina asignada el tiempo de proceso se representa mediante la expresión: TIEMPO(TIPO, NUMMAQ).

10

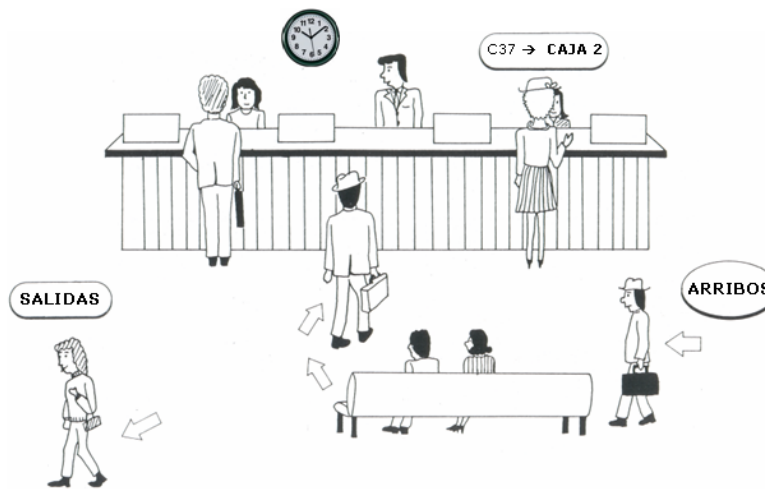
Caso de estudio

**Atención de clientes en un banco**

Objetivos:

- o Modelado de conjuntos: Resource Set, reglas de selección y guardar índice del recurso asignado (Save attribute).
- o Módulos avanzados: Seize - Delay - Release.
- o Aplicación del módulo de datos avanzado Expression.

Una agencia bancaria recibe a los clientes, quienes realizan diversas transacciones en tres cajeros y una cola común. Los tiempos de servicio de los cajeros con un cliente siguen una distribución UNIF(6, 12) minutos para el cajero 1, UNIF(4, 10) minutos para el cajero 2 y una UNIF(5, 8) minutos para el cajero 3. Los clientes llegan a la agencia con un tiempo entre arribos que se ajusta a una EXPO(10) minutos, a las horas de mayor congestión; deseamos simular el comportamiento del sistema para esas horas. Considere que el primer cliente llega al minuto 5 del experimento de simulación.



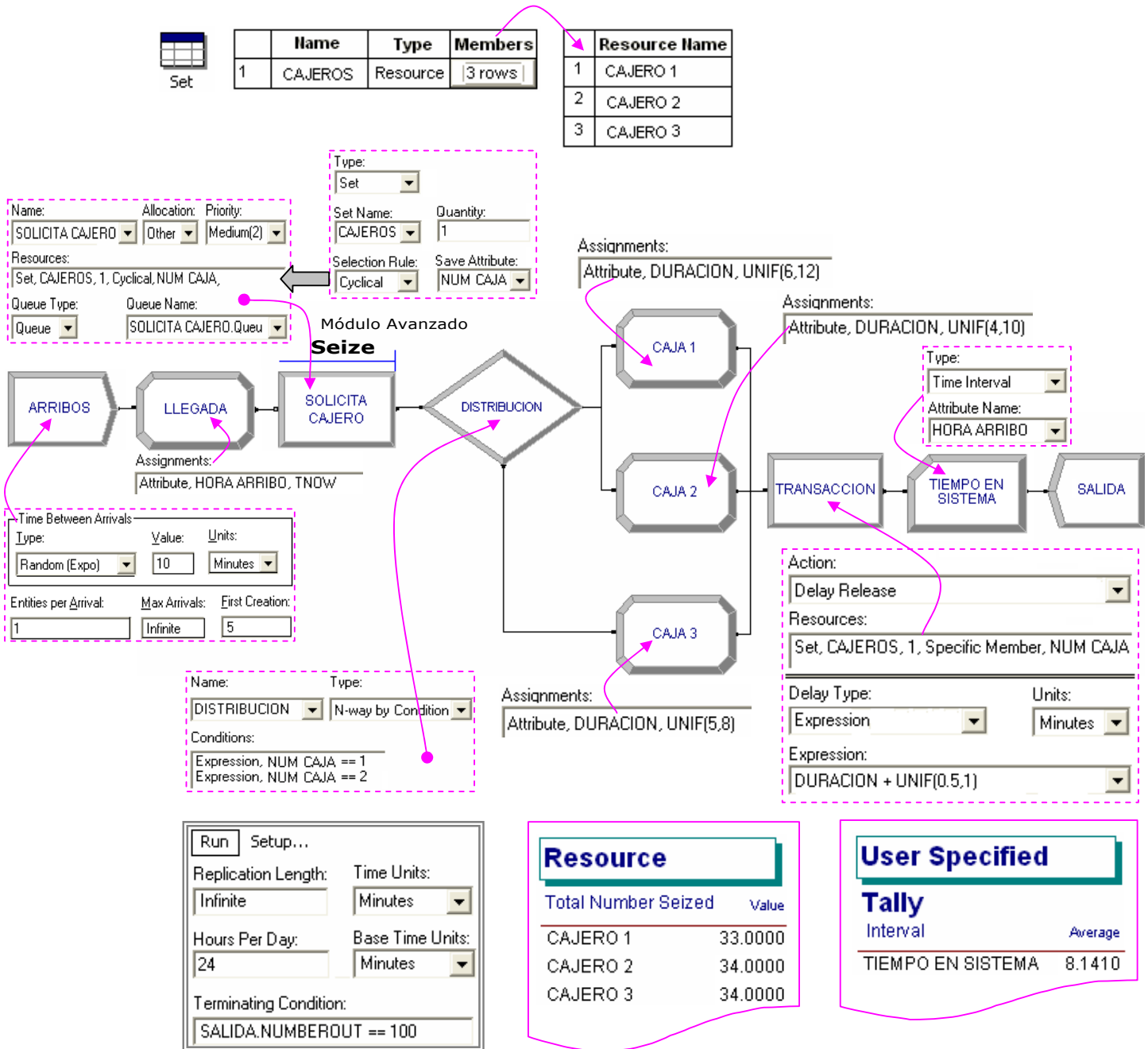
Una vez atendido, el cliente cuenta su dinero, demorando una UNIF(0.5, 1) minutos; recién entonces podrá entrar otro cliente. Existe un tablero electrónico que informa cuál cajero los atenderá; si más de un cajero se encuentra disponible, entonces el criterio que se aplicará para asignar al cajero será cíclico o alternado, es decir que se asignará al siguiente, respecto al último que fue asignado. Suponga que el último que se asignó fue el cajero 1, entonces ahora le toca al cajero 2. Si este estuviera ocupado, entonces le toca al cajero 3 si es que está disponible; de lo contrario, le vuelve a tocar al cajero 1. Simular el sistema hasta que 100 clientes hayan sido atendidos y determinar cuántas veces fue asignado cada cajero y el tiempo promedio que los clientes permanecen en la agencia.

**Escenario 1**

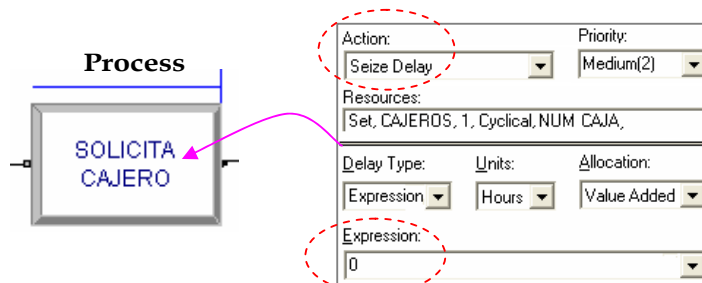
Suponga que se realizan dos tipos de transacciones, cuyas probabilidades de ocurrencia son 40% para el tipo 1 y 60% para el tipo 2. Los tiempos de atención dependen del tipo de transacción y del cajero asignado, véase cuadro:

	<b>Caja 1</b>	<b>Caja 2</b>	<b>Caja 3</b>
<b>Transacción 1</b>	UNIF(6, 12)	UNIF(4, 10)	<b>UNIF(5, 8)</b>
<b>Transacción 2</b>	TRIA(2, 6, 9)	NORM(7, 1)	EXPO(1)

## Solución



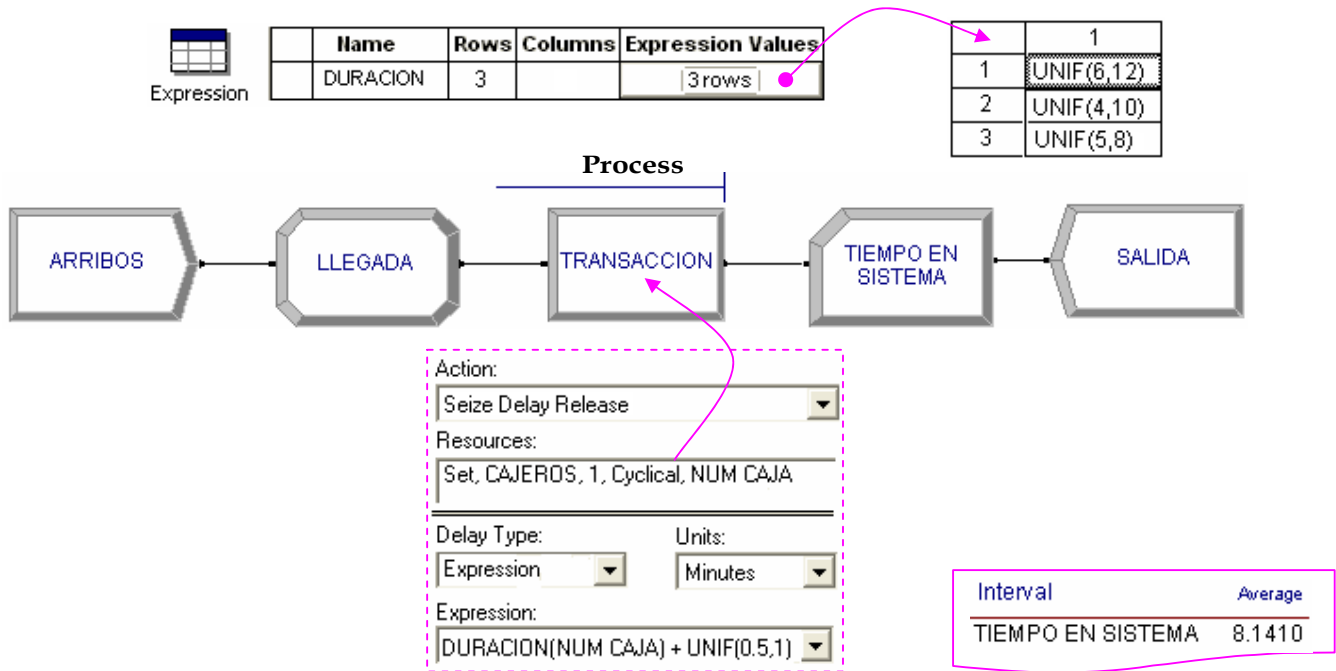
**Nota:** En el modelo se ha incluido el módulo avanzado Seize para solicitar cajero. Veamos su formulación utilizando el módulo básico Process:



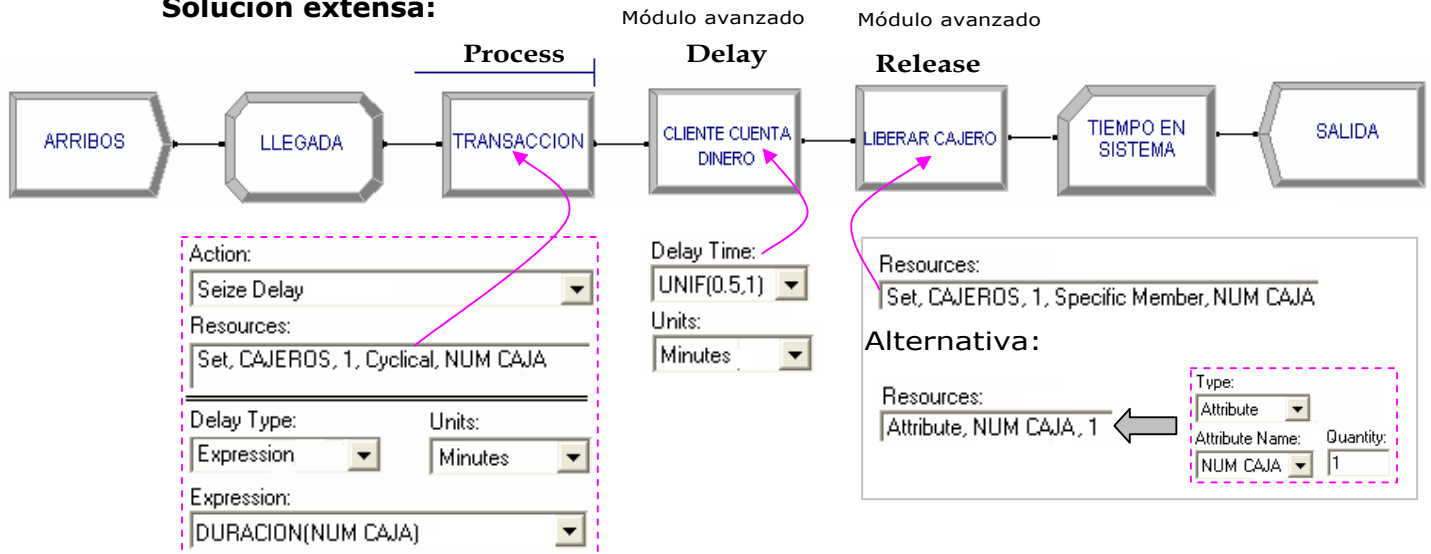


### Solución alternativa: Uso del módulo de datos Expression

(recomendada)

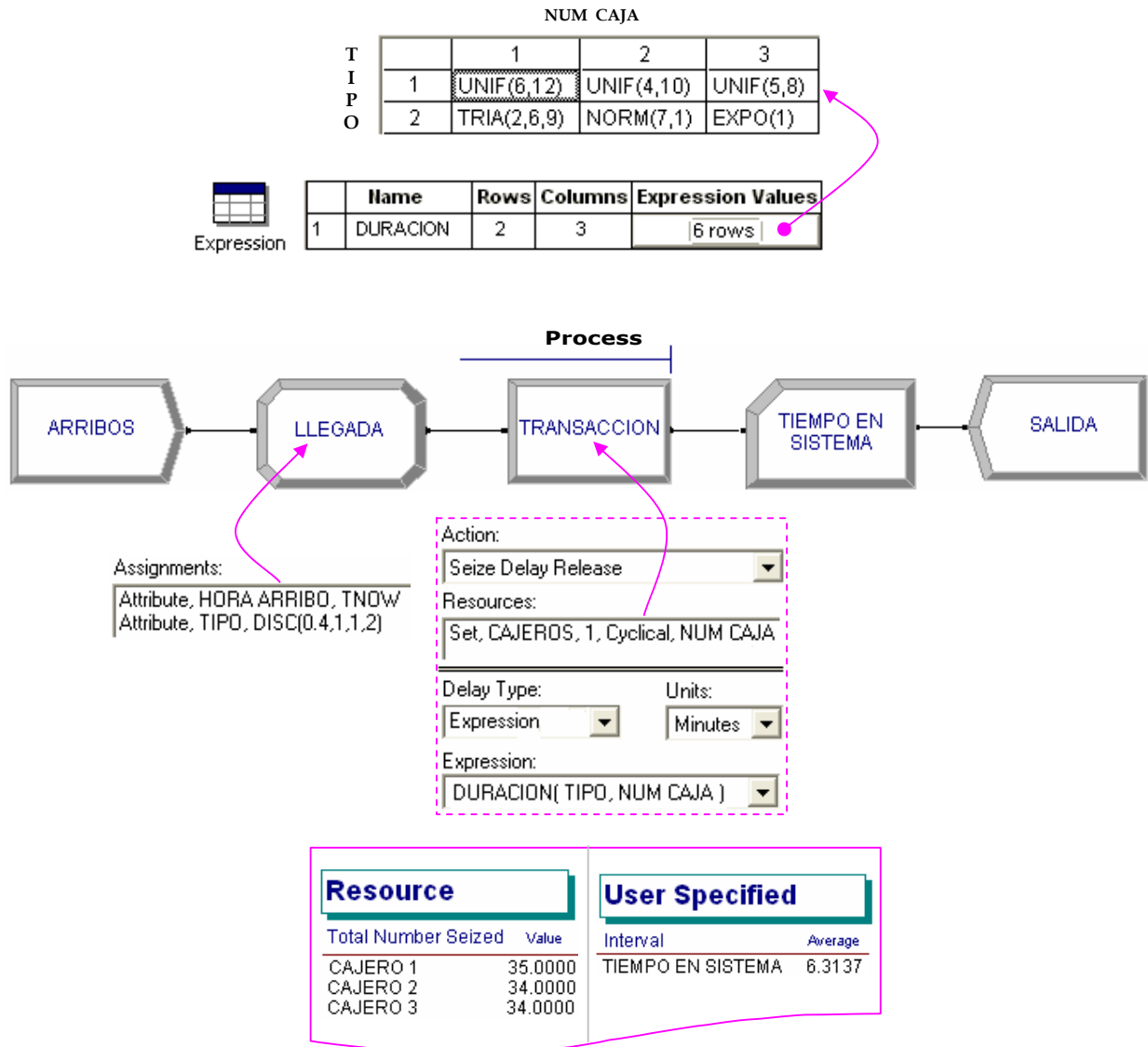


### Solución extensa:



**Nota:** Observe que el tiempo en el que el cliente cuenta su dinero ya no está integrado al módulo Process Transacción, en el cual se liberaba el recurso en forma automática (Seize-Delay-Release). Esta nueva situación obliga a que el recurso se libere posteriormente, mediante el atributo Num caja.

### Escenario 1



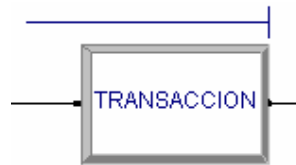
### Escenario 2

Suponga capacidades de 4, 3 y 2 unidades, para los cajeros 1, 2 y 3, respectivamente. Comparar los siguientes criterios de selección del tablero electrónico:

- Selección del cajero en forma aleatoria.
- Selección del recurso que tiene mayor capacidad remanente, en ese instante.
- Selección del recurso que haya sido asignado menos veces, desde el inicio.

**Solución:**

	Name	Type	Capacity
1	CAJERO 1	Fixed Capacity	4
2	CAJERO 2	Fixed Capacity	3
3	CAJERO 3	Fixed Capacity	2



Cambiar regla:

**Resources**

Type: Set

Set Name: CAJEROS    Quantity: 1

Selection Rule: Random    Save Attribute: NUM CAJA

**Resources**

Type: Set

Set Name: CAJEROS    Quantity: 1

Selection Rule: Largest Remaining Capacity    Save Attribute: NUM CAJA

**Resources**

Type: Set

Set Name: CAJEROS    Quantity: 1

Selection Rule: Smallest Number Busy    Save Attribute: NUM CAJA

Total de Asignaciones:	RANDOM	LARGEST REM CAP	SMALLEST NUMBER BUSY	CYCLICAL
CAJERO 1	32	90	62	34
CAJERO 2	31	11	28	34
CAJERO 3	37	0	11	33
<b>Tiempo en Sistema:</b>	8.3723	9.4620	8.8163	8.1683

## 10. REASIGNACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UN RECURSO

Durante el experimento de la simulación, la capacidad de los recursos puede ir cambiando en forma dinámica. Imagínese por un momento, el funcionamiento de los cajeros de un supermercado; en las horas "pico" de mayor afluencia de clientes todas las cajas están trabajando, atendiendo al público. Sin embargo, durante la jornada de trabajo existen horas de baja afluencia de clientes, por ejemplo durante las primeras o las últimas horas de funcionamiento del establecimiento; en estos casos, lo más probable es que la cantidad original de los cajeros disminuya, es decir la capacidad inicial de los recursos se altera.

En Arena, la capacidad del recurso está definida por la variable MR, la cual al momento de crear el recurso tiene una capacidad fija de 1, que puede ser alterada en la cantidad, o alterarse por una capacidad variable que se manifieste durante la simulación. Si bien, es posible modelar esta situación haciendo uso de redes secundarias que alteren la capacidad del recurso, también es posible hacerlo de manera directa, programando las capacidades que tendrán los recursos durante la simulación, esto se logra con el módulo de datos "Schedule".

Veamos algunas de las variables de recursos utilizadas en este tema:

- **MR**(Nombre del Recurso)  
Retorna la capacidad actual del recurso. Ejemplo: **MR**(cajeros)  
Esta capacidad puede ser alterada. Los valores que toma esta variable son enteros.
- **NR**(Nombre del Recurso)  
Retorna el número de recursos ocupados. Ejemplo: **NR**(cajeros)

Nota: Con referencia a este tema véase en este capítulo los casos de estudio: 11, 15, 19-21

### *Ejemplo 1:*

Supongamos que deseamos representar la asistencia de 30 alumnos a una aula de laboratorio equipada con 34 computadoras. La representación planteada es la siguiente:

	Name	Type	Capacity
Resource	1 COMPUTADORAS	Fixed Capacity	34

Capacidad del recurso:  $MR(\text{computadoras}) \rightarrow 34$

Número de unidades utilizadas:  $NR(\text{computadoras}) \rightarrow 30$

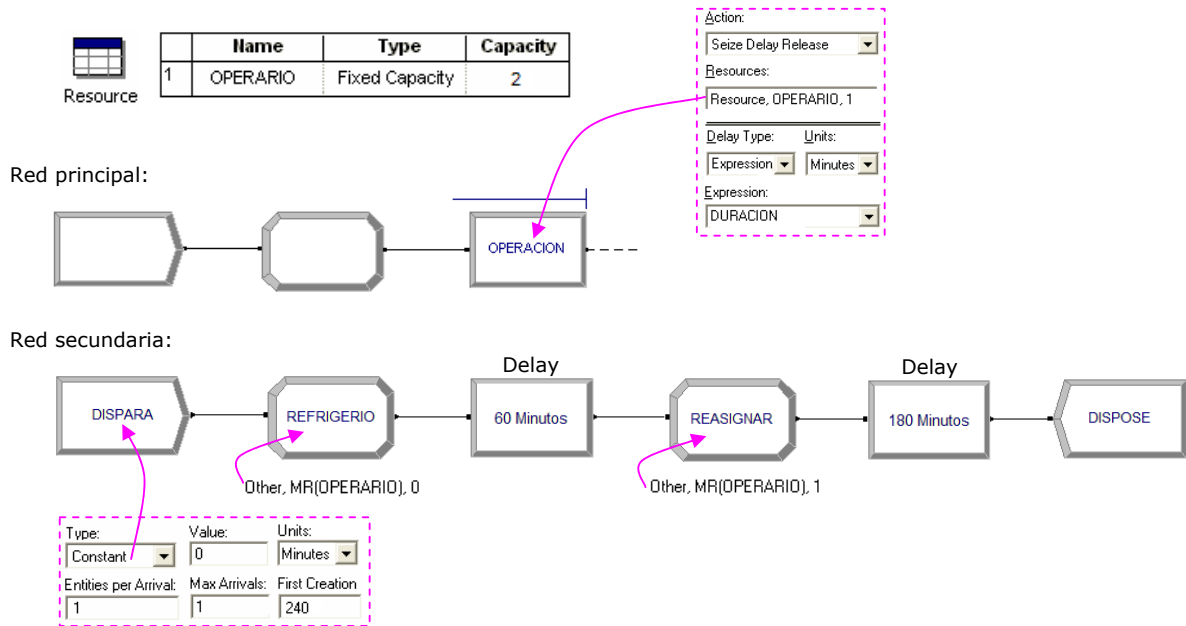
Disponibilidad del recurso:  $MR(\text{computadoras}) - NR(\text{computadoras}) \rightarrow 04$

**Ejemplo 2:**

Se desea realizar una asignación variable para un operario, de acuerdo al siguiente programa:

horario	Tiempo (minutos)	Número de Operarios
9:00 - 1:00	240	2
1:00 - 2:00	60	REFRIGERIO
2:00 - 5:00	180	1

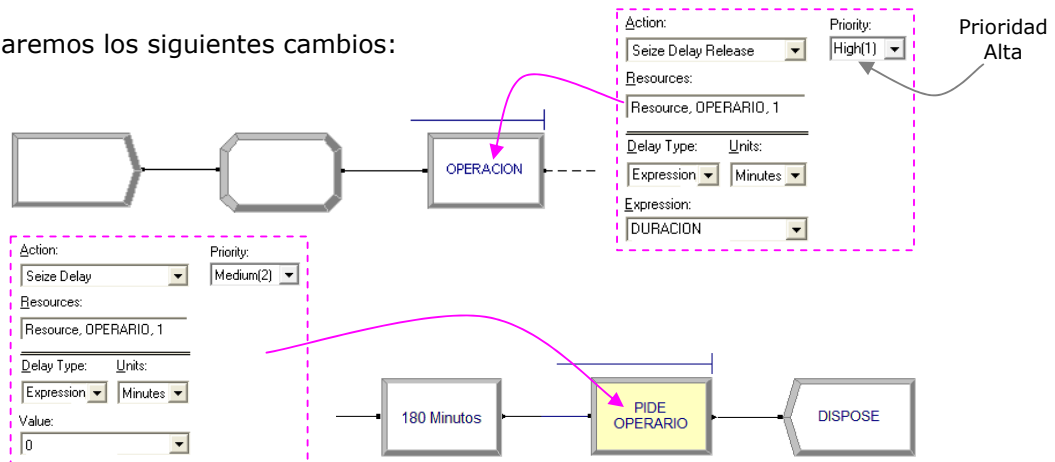
La representación planteada es la siguiente:



**Ejemplo 3:**

Respecto al ejemplo anterior, suponga que al final de la jornada de trabajo (5 pm), el operario se podrá retirar sólo si no tiene entidades por atender.

Realizaremos los siguientes cambios:



11

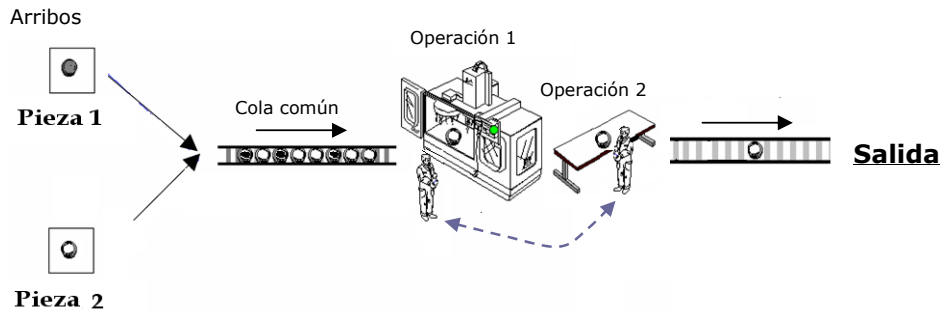
Caso de estudio

**Programación de operarios según Schedule**

Objetivos:

- o Secuencia Seize-Delay / Delay-Release.
- o Módulo de datos: Schedule.
- o Programación de asignación de recursos (reglas Wait, Ignore y Preempt).
- o Programación de arribos de entidades.

En una planta se producen dos tipos de piezas que requieren ser procesadas por dos operaciones comunes y secuenciales, véase esquema:



La pieza 1 está programada para que llegue según una distribución exponencial con una media de 10 minutos; la pieza 2 llega según un tiempo entre arribos igual a una exponencial con una media de 8 minutos. Para realizar ambas operaciones se dispone de una máquina y de un operario. La operación 1 requiere de ambos recursos y la operación 2 solo del operario.

Al llegar las piezas de ambos tipos forman una cola común. El tiempo de servicio de esta operación para la pieza 1 sigue una distribución exponencial con una media de 7 minutos. Para la pieza 2 es una exponencial con una media de 10 minutos.

Al terminar la operación 1 el mismo operario lleva la pieza a una mesa de trabajo y realiza la operación 2. La duración de esta actividad para la pieza 1 es una distribución Normal(6,1) minutos, mientras que para la pieza 2 es una Normal(4,1) minutos por pieza. Al terminar la operación 2, el operario regresa a la máquina, para procesar la siguiente pieza (operación 1). Se pide:

Formular un modelo para simular el sistema descrito durante un día de trabajo (jornada de 8 horas o 480 minutos).

**Escenario 1**

Suponga que se desea cambiar la asignación fija de un operario para toda la jornada por una asignación variable, de acuerdo al siguiente programa:

	Tiempo (minutos)	Número de operarios
9:00 – 1:00	240	2
1:00 – 2:00	60	Refrigerio
2:00 – 5:00	180	1

**Escenario 2**

Respecto al escenario original, programar la llegada de la pieza 1 según lo siguiente: hasta los primeros 300 minutos, los arribos se realizan de acuerdo a una EXPO(10) minutos; luego, el tiempo entre arribos cambia a EXPO(5) minutos y dicho ritmo permanece hasta el final.

### Solución

1.

**Entity Type Configuration:**

- PIEZA 1:** Type: Random (Expo), Value: 10, Units: Minutes.
- PIEZA 2:** Type: Random (Expo), Value: 8, Units: Minutes.

**Action Configuration:**

- Delay Release (at OPERACION 1):** Priority: Medium(2), Expression: 0.
- Seize Delay (at OPERACION 1):** Priority: Medium(2), Expression: DURACION 1.
- Delay Release (at OPERACION 2):** Priority: Medium(2), Expression: DURACION 2.

**Resource Capacity:**

Name	Type	Members
1 TIEMPO EN SISTEMA	Tally	2 rows

Name	Type	Capacity
1 OPERARIO	Fixed Capacity	1
2 MAQUINA	Fixed Capacity	1

**User Specified Report:**

	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	140.04
TIEMPO EN SISTEMA 2	163.61
<b>Number Out</b>	<b>Value</b>
PIEZA 1	12.0000
PIEZA 2	19.0000

### Escenario 1: Programación de operarios

Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1 PROGRAMACION OPERARIO	Duration	Capacity	Minutes	1.0	3 rows



Schedule

**Schedule Configuration Window:**

- Name: PROGRAMACION OPERARIO
- Format Type: Duration
- Type: Capacity
- Time Units: Minutes
- Scale Factor: 1.0
- Durations: 2, 240; 0, 60; 1, 180

**Botón Derecho (Right Click Context Menu):**

- Insert Row
- Delete Row
- Build Expression...
- Edit via Dialog...
- Edit via Spreadsheet...
- Properties...

#### Regla Wait

Si al momento de la variación del recurso este está ocupado, entonces el nuevo programa de asignación espera hasta que termine el programa actual. A partir de ese momento comienza a registrar el tiempo para la nueva asignación.

#### Interpretación del reporte:

Una mejora en el tiempo en sistema es explicable, pues medio día se trabaja con un operario más. Ahora, la máquina es el cuello de botella, porque ahora es compartida. Si a esto le sumamos que no se trabaja una hora por refrigerio, el aumento en las unidades producidas es mínimo.

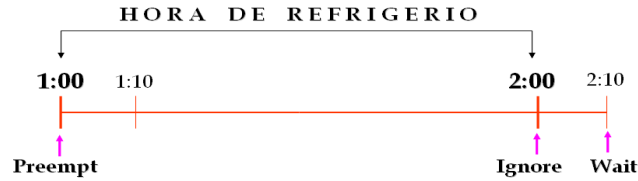
Name	Type	Capacity	Schedule Name	Schedule Rule
1 OPERARIO	Based on Schedule	PROGRAMA	PROGRAMACION OPERARIO	Wait

**User Specified Report:**

	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	119.59
TIEMPO EN SISTEMA 2	138.03
<b>Number Out</b>	<b>Value</b>
PIEZA 1	13.0000
PIEZA 2	19.0000

**Interpretación:** Reglas para el cambio de turno

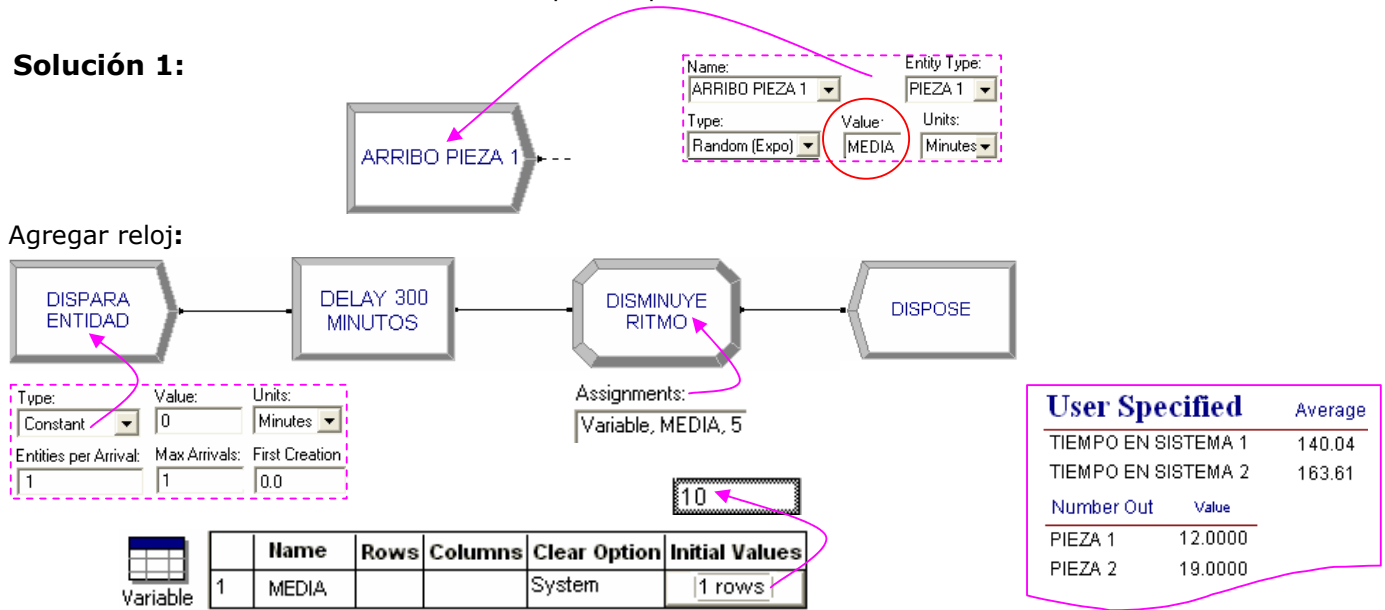
Suponga que a las 12:55 el operario inicia el trabajo de una pieza y termina a la 1:10.



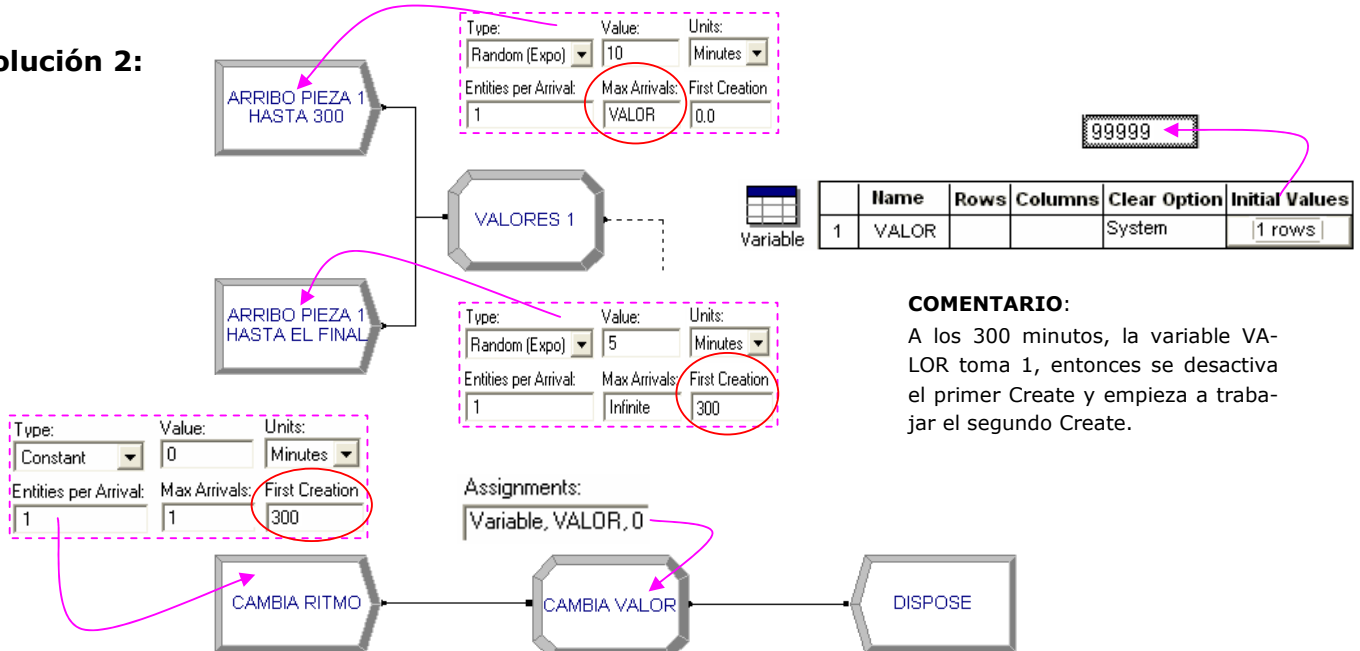
- Con la regla Wait el operario toma la hora completa de refrigerio y regresa a las 2:10.
- Con la regla Ignore el operario toma el tiempo que le queda de refrigerio (50 minutos) y regresa a las 2:00 en punto.
- Con la regla Preempt el operario inicia el trabajo de la pieza a las 12:55 y a la 1:00 en punto deja el trabajo inconcluso y sale de refrigerio. Regresa a las 2:00.

**Escenario 2:** Ritmo variable de arribos para la pieza 1

**Solución 1:**



**Solución 2:**





**Solución 3:** En forma automática, utilizando el módulo de datos Schedule.

Tiempo entre arribos  
(min /piezas)

Tasa  
(piezas /hr.)

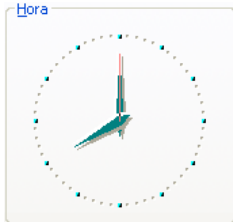
EXPO(10)

$$\frac{piezas}{10 \text{ min.}} * \frac{60 \text{ min.}}{hr.} = 6 \text{ piezas / hr.}$$

EXPO(5)

$$\frac{piezas}{5 \text{ min.}} * \frac{60 \text{ min.}}{hr.} = 12 \text{ piezas / hr.}$$

	Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations	Botón Derecho
1	PROGRA ARRIBOS PIEZA 1	Duration	Arrival	Hours	1.0	2 rows	<ul style="list-style-type: none"> <li>Insert Row</li> <li>Delete Row</li> <li>Build Expression...</li> <li>Edit via Dialog...</li> <li>Edit via Spreadsheet...</li> <li>Properties...</li> </ul>



**Schedule**

Name: PROGRA ARRIBOS PIEZA 1    Format Type: Duration

Type: Arrival

Time Units: Hours    Scale Factor: 1.0

Durations: 6, 5  
12, 3

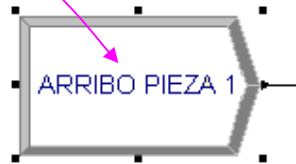
Buttons: Add..., Edit..., Delete

6 piezas/hora (durante 5 horas)  
12 piezas/hora (durante 3 horas)

Name: ARRIBO PIEZA 1    Entity Type: PIEZA 1

Type: Schedule    Schedule Name: PROGRA ARRIBOS PIEZA 1

Entities per Arrival: 1    Max Arrivals: Infinite



Run    Setup...

Replication Length: 480    Time Units: Minutes

Hours Per Day: 8    Base Time Units: Minutes

**User Specified**    Average

TIEMPO EN SISTEMA	187.23
TIEMPO EN SISTEMA	161.18
<b>Number Out</b>	<b>Value</b>
PIEZA 1	15.0000
PIEZA 2	17.0000

La variación que existe en el indicador de desempeño Tiempo en Sistema, respecto a las soluciones anteriores, se minimiza cuando el modelo se ejecuta con múltiples replicas. Así, las tres soluciones tienden a ser iguales.



## Caso de estudio

**Funcionamiento de una agencia bancaria<sup>9</sup>**

## Objetivos:

- o Aplicación de los módulos: Decide, Assign, Process y Record.
- o Aplicación de los módulos de datos Set (Resource).
- o Aplicación de los módulos de datos Schedule (Resource).

Se desea evaluar el funcionamiento de una agencia bancaria que dispone de 4 cajeros en ventanilla, para la atención de sus clientes. Los clientes llegan a esta agencia para ejecutar alguno de los 4 tipos de servicios bancarios. El tipo de servicio bancario necesario depende de una probabilidad; asimismo, su ejecución necesita un tiempo, independiente del cajero. La información se presenta en la siguiente tabla:

Tipo de servicio bancario	Probabilidad	Tiempo de ejecución
Pago de servicios domésticos	35%	Distribución Normal (6 minutos, 1 minuto)
Depósito de dinero	10%	Distribución Uniforme (5 minutos, 10 minutos)
Cobro de cheque	15%	Distribución Uniforme (5 minutos, 12 minutos)
Otros servicios	40%	Distribución Uniforme (3 minutos, 6 minutos)

El administrador de la agencia ha asignado a dos cajeros (Grupo A) para atender el pago de servicios domésticos y otros servicios, y ha asignado a los otros dos cajeros (Grupo B) para depósito de dinero y cobro de cheques. El tiempo entre arribos de los clientes está distribuido exponencialmente con media de 2 minutos. Se desea simular este funcionamiento desde las 9:30 de la mañana hasta las 7:30 de la noche, dejando el sistema con los clientes que tenga en ese momento. Presentar un modelo en Arena que permita simular la situación planteada. Ejecutar la simulación y determinar el valor de los siguientes indicadores:

1. Tiempo de permanencia en la agencia por tipo de cliente.
2. Tiempo máximo de espera para la cola del Grupo A.  
Tiempo promedio de espera para la cola del Grupo B.
3. Diseñar la capacidad que debe tener la cola del Grupo A.
4. Utilización del Grupo B de cajeros.
5. Número promedio de clientes en la agencia.

**Escenario A**

Una agencia cercana del mismo banco ha tenido un percance; por ello, se ha decidido enviar a los clientes de esta agencia a la agencia en estudio. Estos clientes llegan a nuestra agencia según una EXPO(5) minutos y el tiempo que demanda su atención es una TRIA(3, 5, 10) minutos. El administrador considera que estos deben ser atendidos por cualquiera de los cajeros, con mayor prioridad que cualquiera de sus propios clientes. Realice los cambios necesarios al modelo original.

**Escenario B**

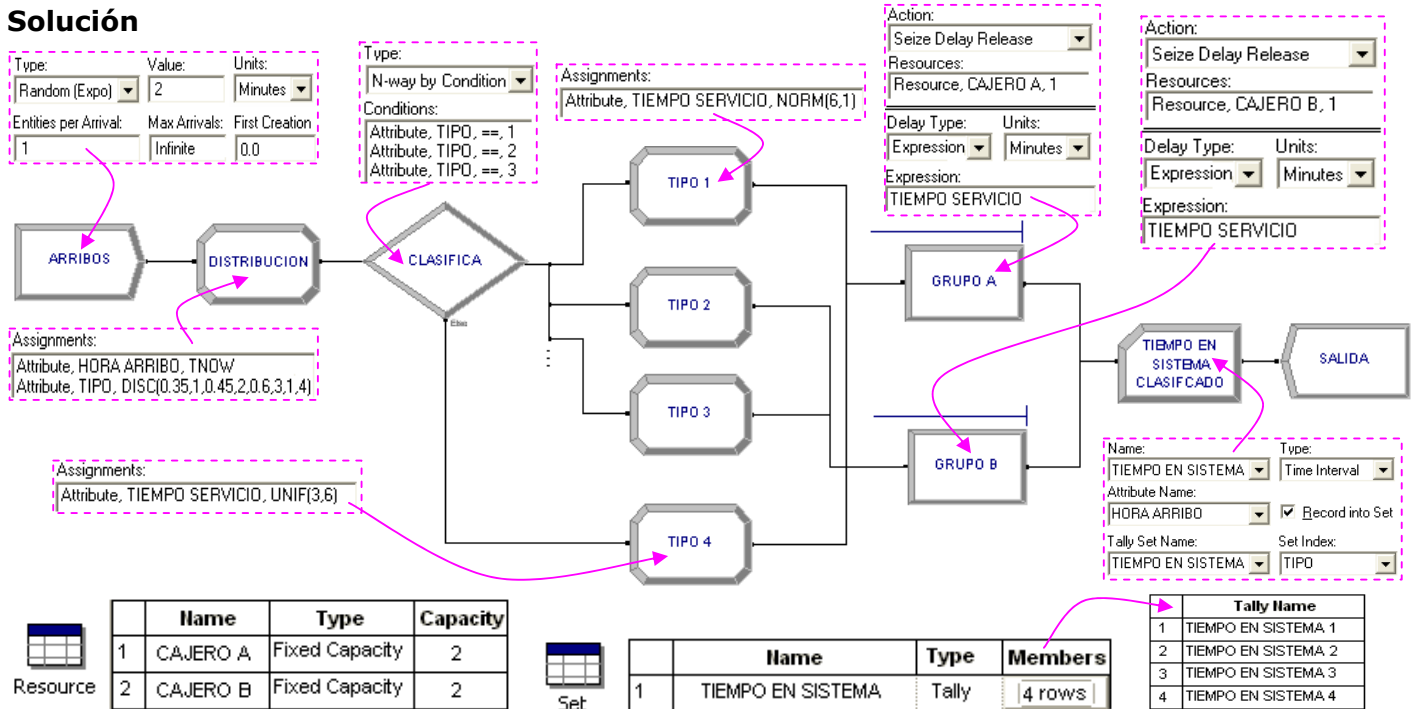
Respecto al caso original, el administrador cree que la cantidad de cajeros que se asigne a cada grupo debe ser variable, así se lograría una mayor eficiencia en el servicio. Por ello dispone que los grupos de cajeros estén conformados por la siguiente cantidad de cajeros en los horarios que se indican:

Cajeros	9:30 - 11:30	11:30 - 13:30	13:30 - 15:30	15:30 - 17:30	17:30 - 19:30
Grupo A	2	3	2	3	2
Grupo B	2	1	2	1	2

Realizar los cambios necesarios al modelo original.

<sup>9</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2007-1".

### Solución



1. User Specified Usage		2. Queue		4. Resource		5. Entity	
	Average	Waiting Time	Average	Instantaneous Utilization	Average	WIP	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	10.5592	GRUPO A.Queue	5.0905	CAJERO A	0.8215	Entity 1	4.2264
TIEMPO EN SISTEMA 2	7.4880	GRUPO B.Queue	0.5028	CAJERO B	0.4354		
TIEMPO EN SISTEMA 3	8.6961	3. Number Waiting Maximum Value					
TIEMPO EN SISTEMA 4	9.6813	GRUPO A.Queue	9.0000				

Run Setup...

Replication Length: 10 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

Action: Seize Delay Release

Resources: Set, CAJEROS, 1, Random.

Delay Type: Expression Units: Minutes

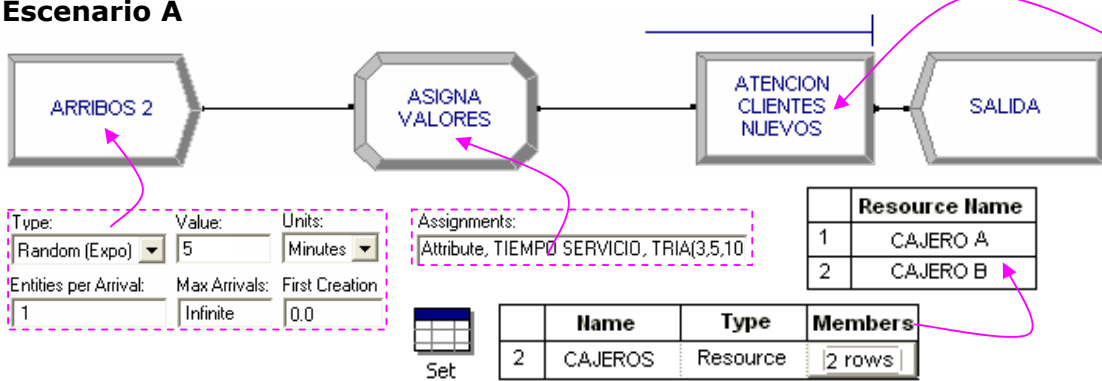
Expression: TIEMPO SERVICIO

Priority: High(1)

**Queue**

Waiting Time	Average
GRUPO A.Queue	55.0704
Number Waiting	Maximum Value
GRUPO A.Queue	47.0000

### Escenario A



Durations:

2.2	Add...	2.2	Add...
2.2		1.2	
3.2	Edit...	2.2	Edit...
2.2		1.2	
3.2	Delete	2.2	Delete
<End of list>		<End of list>	

### Escenario B

**Schedule Table:**

Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
PROGRAMACION CAJEROS A	Duration	Capacity	Hours	1.0	5 rows
PROGRAMACION CAJEROS B	Duration	Capacity	Hours	1.0	5 rows

**Resource Table:**

Name	Type	Schedule Name	Schedule Rule
CAJERO A	Based on Schedule	PROGRAMACION CAJEROS A	Wait
CAJERO B	Based on Schedule	PROGRAMACION CAJEROS B	Wait

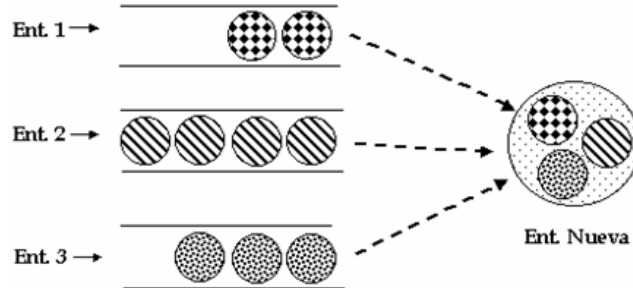
**User Specified**

Interval	Average
PERMANENCIA EN SISTEMA	8.9294

Se logró una disminución en el tiempo de permanencia de los clientes en la agencia en algo menos de un minuto. Lo más importante es que se equilibra la calidad de atención entre todos los clientes. Anteriormente los clientes atendidos por el Grupo A demoraban considerablemente más que los que eran atendidos por el Grupo B (véase los indicadores Espera en colas y Longitudes de cola). La utilización de los cajeros se equilibra. Se puede concluir que se logró mayor eficiencia.

## 11. MODELADO DE ENSAMBLES

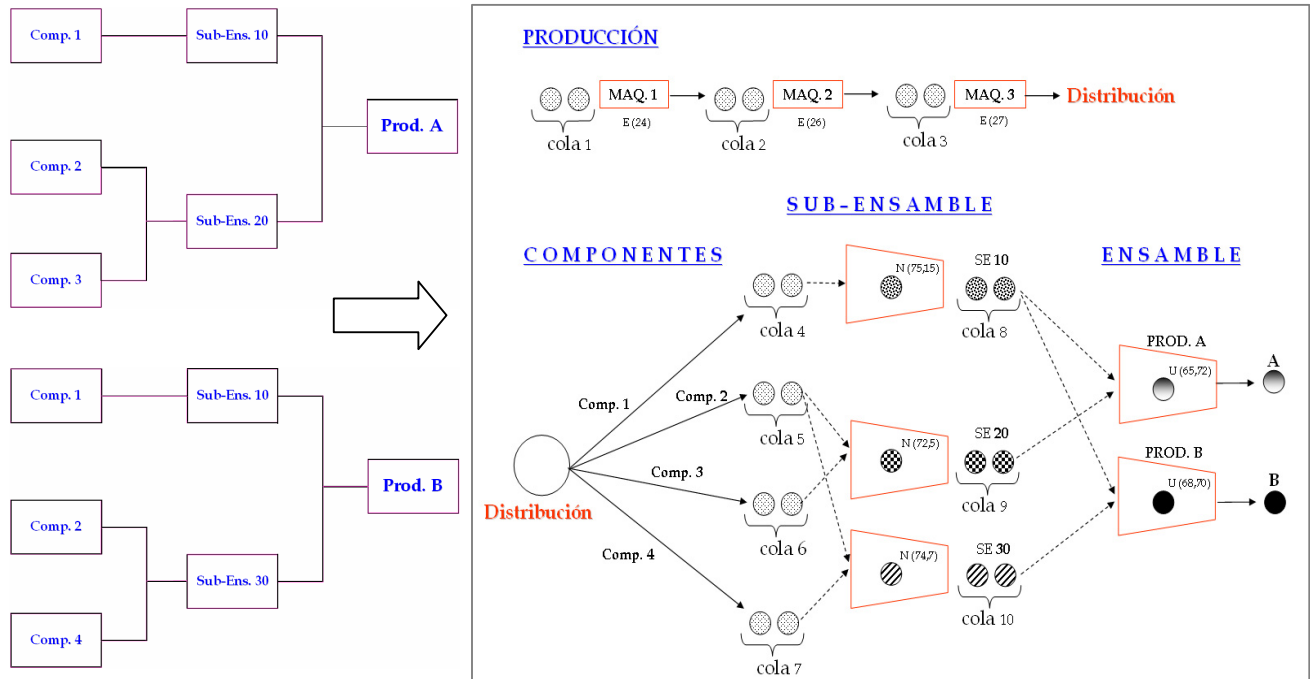
En el contexto del modelado de sistemas, un ensamble es la unión —temporal o permanente— de dos o más entidades, para formar una nueva entidad, cuyos atributos serán los representativos de sus componentes. Muchos sistemas poseen una lógica de operaciones y reglas complejas para ensamblar y desensamblar entidades. En este sentido, el software Arena nos brinda algunas herramientas para poder modelar estos procesos, entre las cuales están los módulos Batch y Separate (procesos básicos) y el módulo Match (procesos avanzados).



*Ejemplos:*

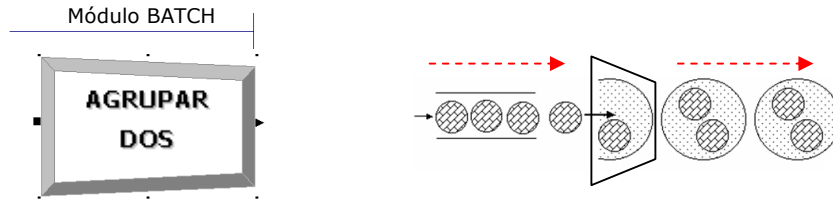
- La operación de colocar el perfume en su estuche.
- Esperar hasta tres personas antes de enviar el ómnibus al aeropuerto.
- Juntar las prendas de un cliente en una lavandería para realizar el despacho.

Ilustración: Requerimiento de materiales y operación de ensamble.



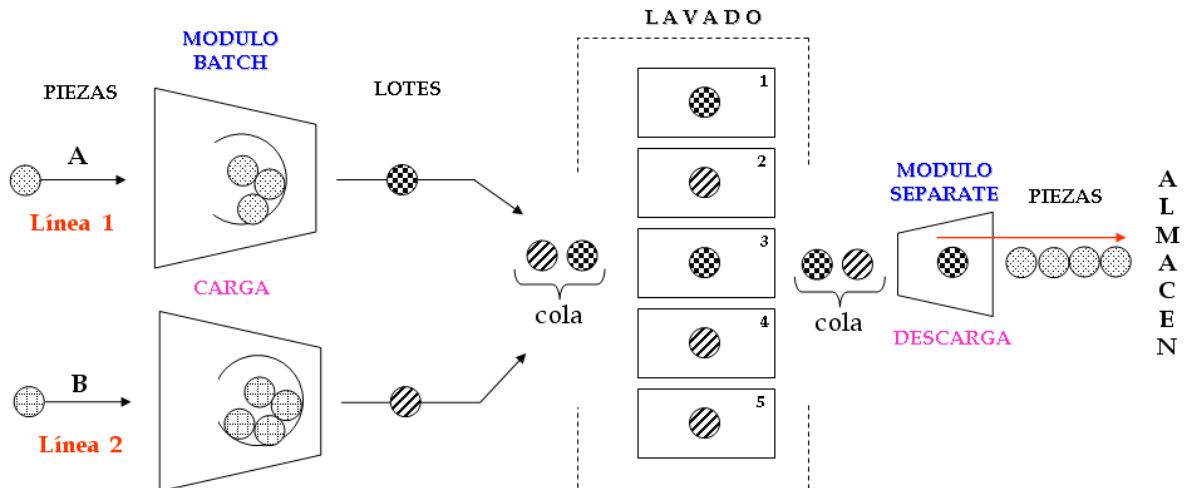
## 11.1 Módulo BATCH

El módulo BATCH se utiliza como un mecanismo de agrupamiento de dos o más entidades, formando una nueva entidad (lote). Esta unión puede ser temporal o permanente; si es temporal entonces en algún momento las entidades unidas se separarán, recuperando su estado inicial, esto se logra mediante el módulo Separate.



El lote se forma de acuerdo con un número específico de entidades. A medida que van ingresando al módulo BATCH se van ubicando y acumulando en una cola hasta que ingrese el número requerido de entidades. Se debe especificar el Entity.Type de la nueva entidad formada, que representará a las integrantes.

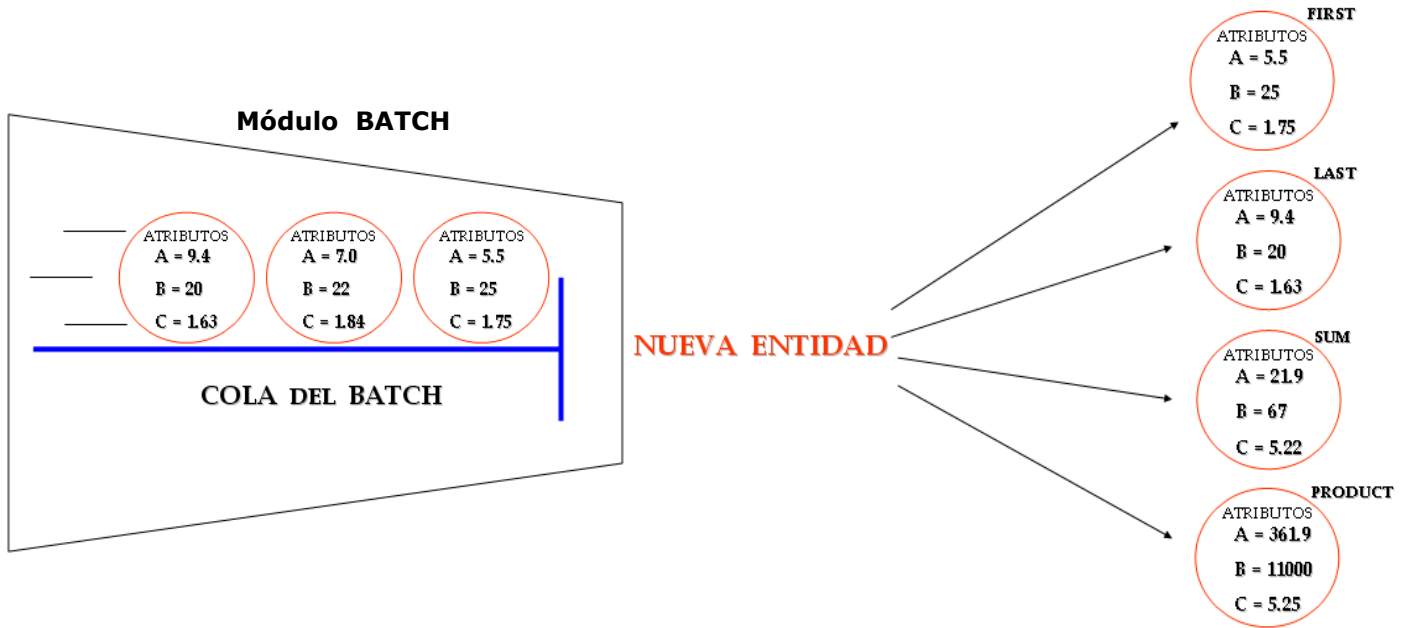
*Ejemplo 1: Agrupamiento temporal.*



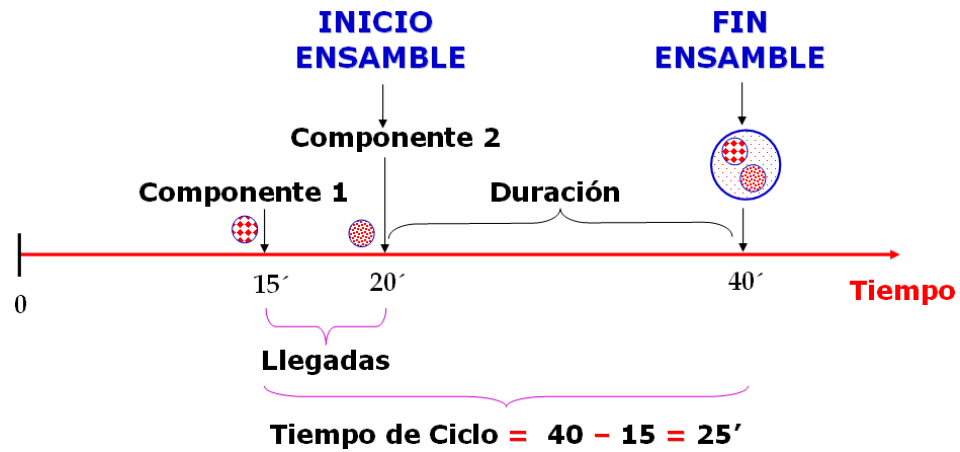
### 11.1.1 Atributos de la nueva entidad (Save Criterion)

Existen cuatro criterios para definir los atributos de la nueva entidad resultante:

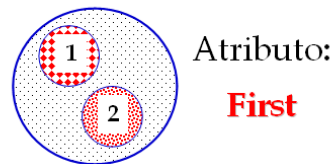
- First: La nueva entidad que se forma toma los atributos de la entidad que ingresó primero a la cola.
- Last: La nueva entidad que se forma toma los atributos de la entidad que ingresó última a la cola.
- Sum: Los atributos de la entidad resultante corresponden a la suma de los atributos numéricos de sus componentes.
- Product: Los atributos de la entidad resultante corresponden a la multiplicación de los atributos numéricos de sus componentes.



Ejemplo 2: Atributos de la nueva entidad (Save Criterion).



**Producto Terminado:**



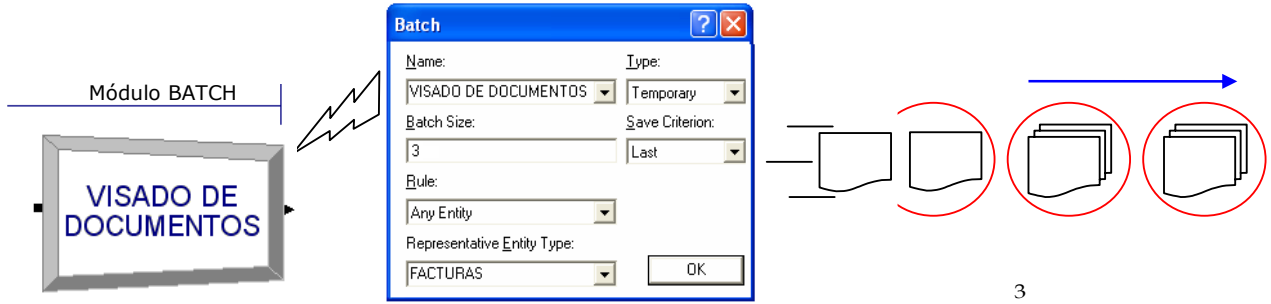
*Interpretación:*

La nueva entidad resultante del ensamble tomará los atributos de la primera entidad que ingresó al BATCH. Esto tiene sentido, ya que para efectos del cálculo del tiempo en sistema, la entidad representativa es la que llegó primero, pues tuvo mayor tiempo de permanencia.

### 11.1.2 Reglas de agrupamiento (Rule)

Se debe especificar la regla de agrupamiento que se va a seguir. Si el criterio de agrupamiento es By Attribute el módulo Batch puede juntar, clasificar y administrar por separado entidades de diferente tipo. En general, múltiples lotes pueden ser acumulados simultáneamente por un único módulo Batch, de acuerdo con el criterio especificado. Se debe especificar el nombre del atributo que clasifica (Attribute Name).

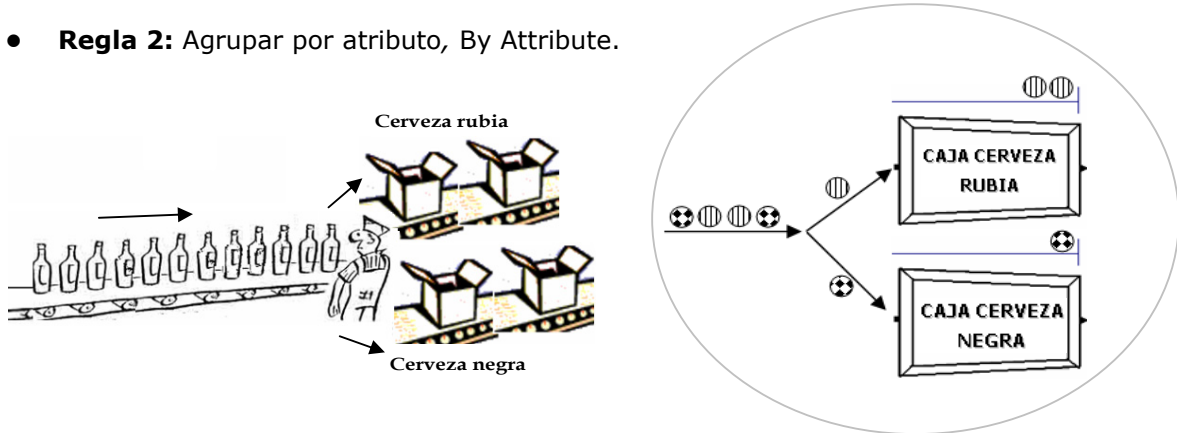
- **Regla 1:** Agrupar cualquier entidad, Any Entity.



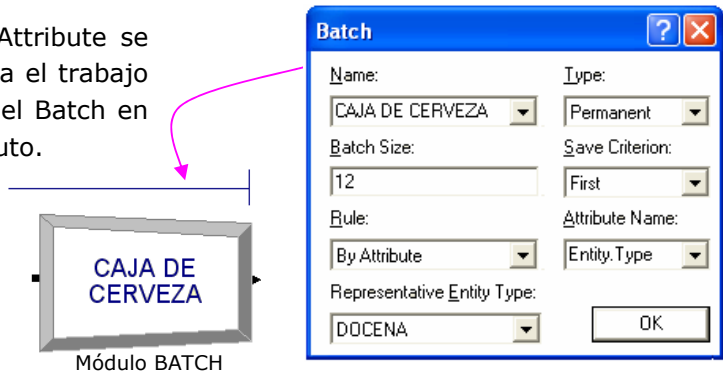
#### Interpretación:

Al llegar una entidad (factura) al módulo Batch se junta y acumula hasta completar 3 unidades (Any Entity). Entonces se origina una nueva entidad representativa. Dado que esta unión es temporal, en algún momento la nueva entidad pasará por el módulo Separate, entonces se dividirá en sus componentes originales y el tipo temporal (Entity.Type) cambiará al tipo original: Facturas. En este caso particular, el criterio de grabación de atributos Save Criterion es irrelevante, porque el agrupamiento es temporal (queda por defecto Last).

- **Regla 2:** Agrupar por atributo, By Attribute.



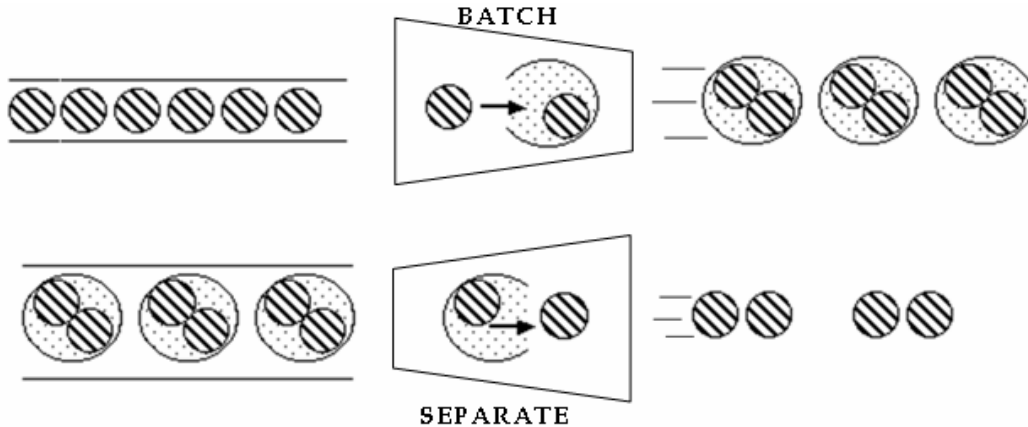
Para el ejemplo, con la regla By Attribute se logra mayor eficiencia, ya que evita el trabajo de dos BATCHS. Clasifica y forma el Batch en forma automática, bajo algún atributo.



## 11.2 Módulo SEPARATE

### 11.2.1 Función separador

Se utiliza para dividir una entidad lote (Batch) en sus entidades componentes; es decir, las entidades originales son recuperadas. La salida de las entidades del lote es secuencial, en el mismo orden en que ellas ingresaron al módulo Batch.



Una simple entidad que no es lote e ingresa al módulo Separate no tendrá ningún efecto de división. De igual manera para aquellas entidades lote cuya unión es permanente.

Respecto al campo Member Attributes, se debe seleccionar el método para asignar los valores de los atributos de la entidad representativa a las entidades originales. Al dividir la entidad lote, las entidades salientes pueden mantener los valores de sus atributos originales (1), también pueden adoptar los valores de los atributos de la entidad lote (2) y también pueden adoptar algunos valores de atributos de la entidad lote (3).

Módulo SEPARATE

DESMONTAR

1

2

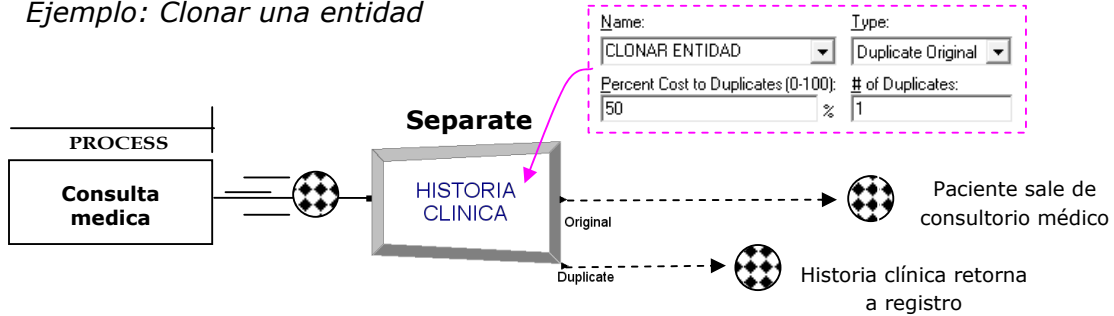
3



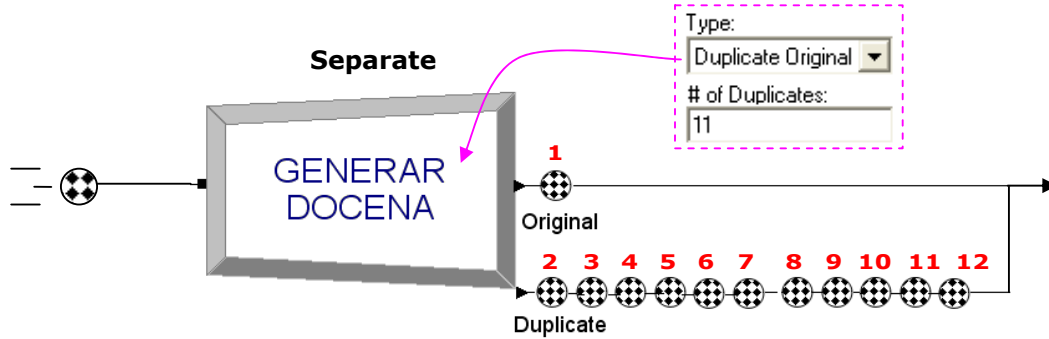
### 11.2.2 Función de clonador

Adicionalmente, el módulo Separate puede ser usado en forma independiente (sin usar el Batch) para copiar o clonar la entidad entrante, en múltiples entidades. En este caso, el número especificado de copias es creado y enviado desde el módulo; la entidad original entrante también sale del módulo. Las entidades duplicadas poseen los mismos atributos que la entidad original; es decir, son idénticas.

*Ejemplo: Clonar una entidad*

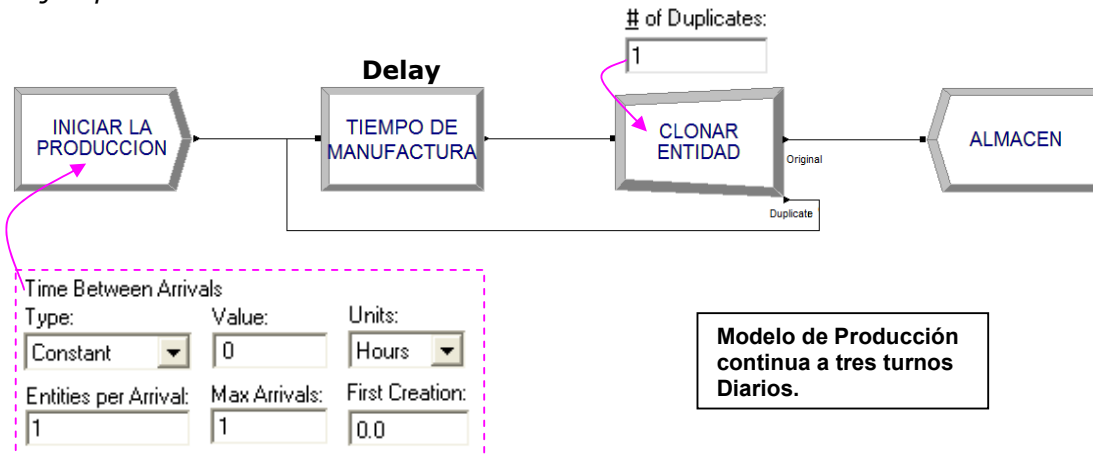


*Ejemplo: Clonar una docena*



Según la ilustración, un total de doce entidades salen del módulo (Original+Duplicados). Se puede generalizar que el número de duplicados o Duplicates es el Total-1, ya que el original también cuenta. Otra alternativa es clonar 12 en vez de 11 entidades, en este caso salen 12 por la salida inferior; la original que sale por la superior se elimina desviándola hacia un módulo Dispose

*Ejemplo:*



13

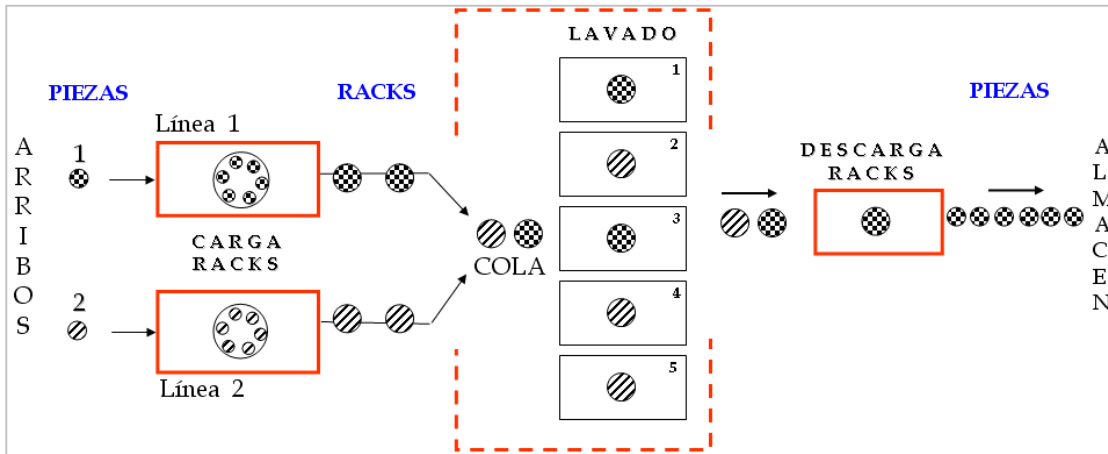
Caso de estudio

**Lavado de piezas colocadas en racks<sup>10</sup>**

Objetivos:

- o Modelado de operaciones de ensamble.
- o Loteo de entidades, aplicación práctica de los nodos BATCH y SEPARATE.
- o Aplicación de Resource Set.

En un sistema compuesto por dos fajas transportadoras viajan, por cada una, un tipo diferente de piezas metálicas. En la sección de carga se agrupan y siguen hacia la sección de lavado, donde se les quita la suciedad y la grasa. A continuación se presenta el diagrama del proceso:



Las piezas que avanzan en ambas fajas transportadoras son cargadas automáticamente en unos *racks* con capacidad para 6 unidades de un mismo tipo; ambas piezas son tomadas directamente de las fajas. Cada vez que se carga un *rack*, este es colgado en cordeles circulantes, que avanzan automáticamente hacia una cola común, previa a la operación de lavado.

La lavandería tiene 5 máquinas disponibles para este proceso; se ha definido el siguiente orden de prioridades para la asignación: 1 – 3 – 5 – 2 – 4. La máquina lava automáticamente, pieza por pieza, hasta completar el *rack*.

Una vez terminado el lavado de un *rack* este se descuelga y descarga automáticamente las piezas, una por una. Luego estas son llevadas al almacén.

	<b>Pieza 1</b>	<b>Pieza 2</b>
<b>Tiempo entre arribos</b> (minutos)	Uniforme(3,7)	Exponencial(3)
<b>Tiempo de carga</b> (minutos / pieza)	1.5	2.5
<b>Tiempo de lavado</b> (minutos /pieza)	Exponencial(4)	Exponencial(3)
<b>Tiempo de descarga</b> (minutos / pieza)	2	3

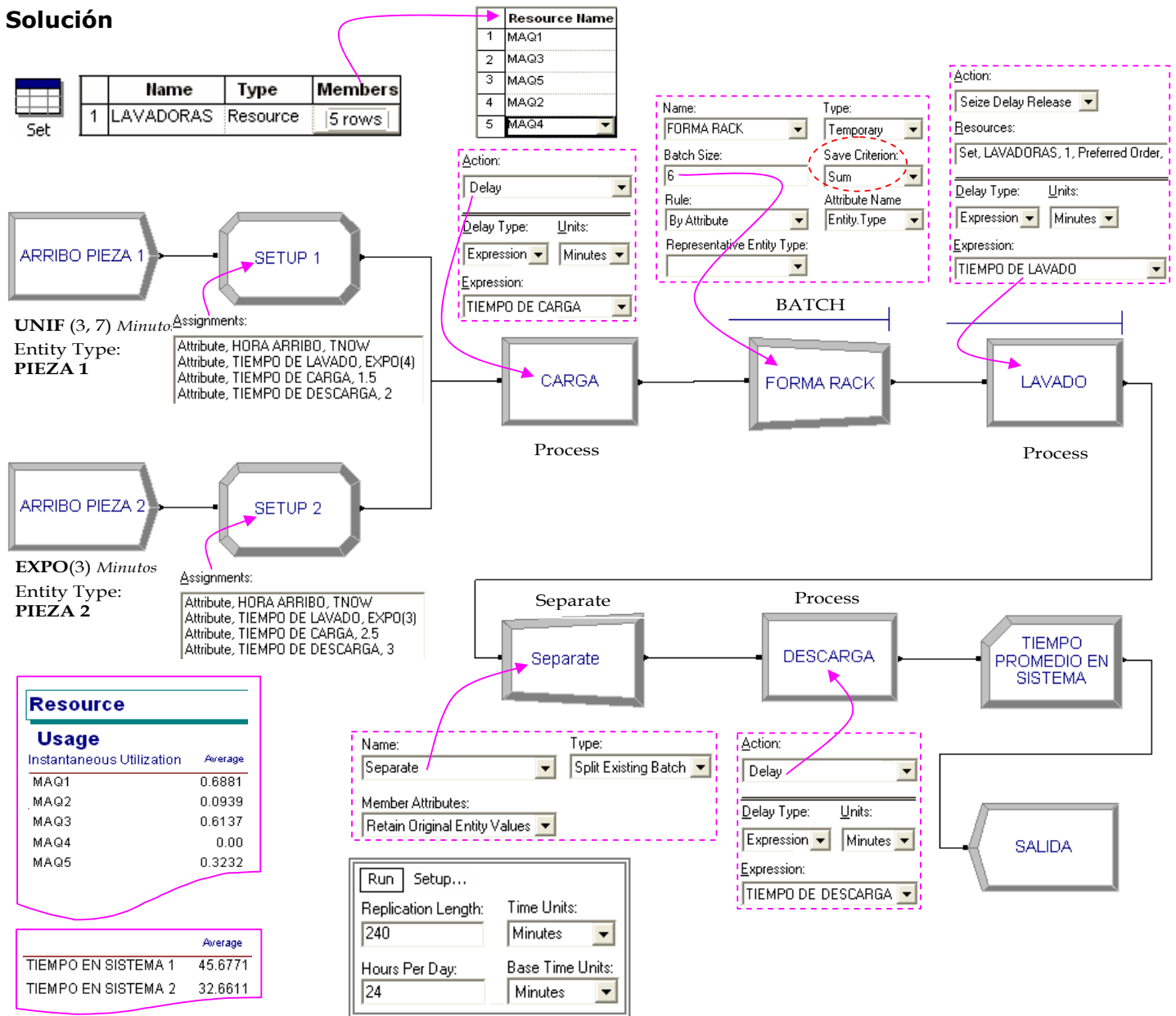
- Formular un modelo para simular el sistema descrito durante 240 minutos.
- Determinar el tiempo de ciclo por cada tipo de pieza.

**Escenario**

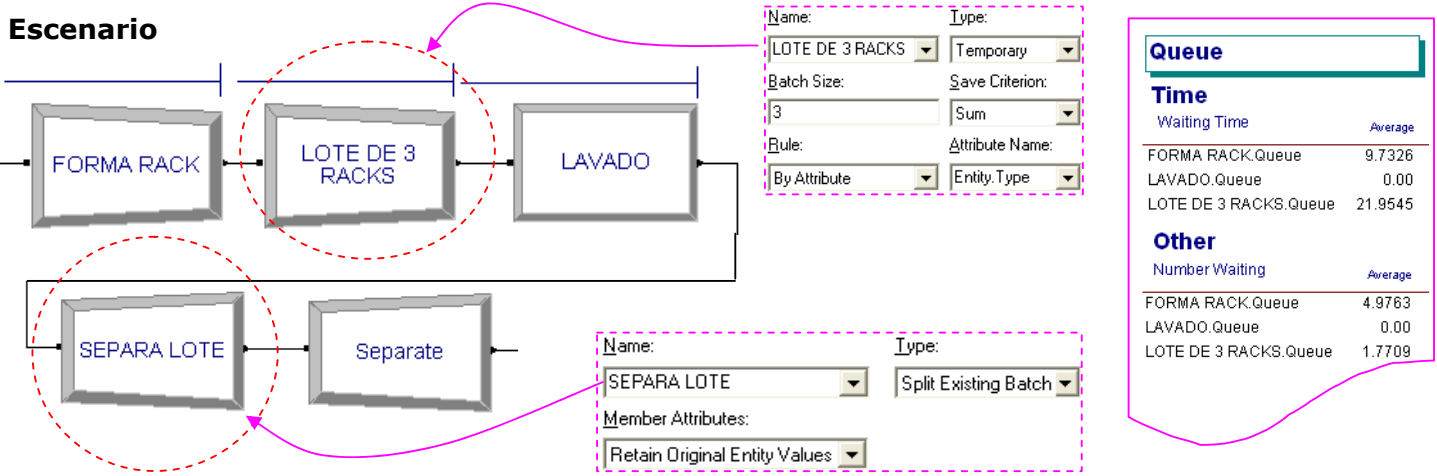
Suponga que se amplía la capacidad de las máquinas, ahora deben ingresar a las máquinas lotes de 3 racks, que los lava como una sola unidad. Realice los cambios.

<sup>10</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. Op. cit.

### Solución



### Escenario



14

Caso de estudio

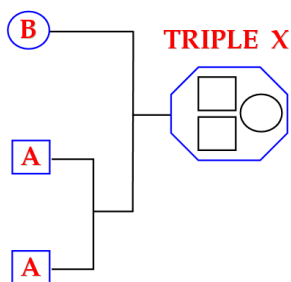
**Ensamble del producto Triple X<sup>11</sup>**

Objetivos:

- o Modelado de operaciones de ensamble.
- o Loteo de entidades, aplicación práctica del módulo Batch.
- o Clonación de entidades mediante el Separate.
- o Módulo de datos Schedule, en la asignación programada de los recursos.

Una línea de producción en una empresa fabrica un artículo denominado Triple X. La cantidad por producir en un día se planea al inicio de ese día y está distribuida uniformemente entre 20 y 30 cajas. La producción empieza a las 9 de la mañana y termina cuando se haya completado la cantidad de productos planeada.

Cada unidad de Triple X requiere dos unidades de materia prima A y una unidad de materia prima B. Considere que al inicio de la producción hay siempre 1.000 unidades de cada materia prima, que representa una cantidad suficiente de ambas.



El procesamiento de cada producto requiere de una moldeadora y toma un tiempo distribuido uniformemente entre 1 y 3 minutos por unidad. Finalmente, las unidades de Triple X se guardan en cajas de 6 unidades.

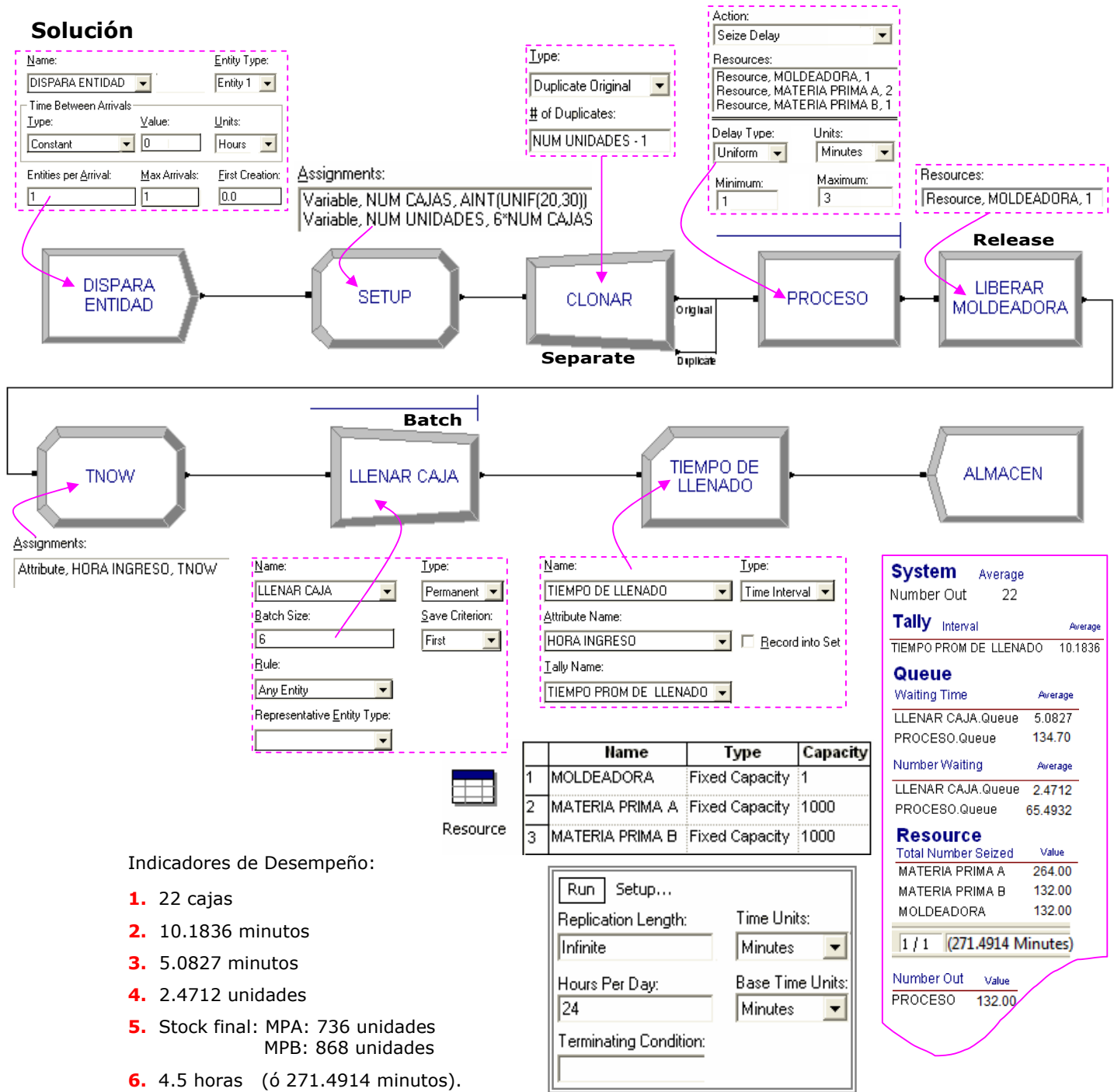
Formular el modelo y simularlo hasta terminar la producción establecida para ese día. Determinar los siguientes resultados indicando cómo se obtuvieron:

1. Número de cajas producidas.
2. Tiempo promedio para completar una caja.
3. El tiempo que pasa una unidad esperando formar parte de una caja.
4. Tamaño promedio de la cola de espera, para formar parte de una caja.
5. Se desea determinar si los niveles de *stock* de materia prima son los adecuados. Determinar el número de unidades de cada materia prima que no se utilizan.
6. El tiempo que toma completar la producción del día.

**Escenario**

Sobre la base del escenario original, suponga que cuando se determina la cantidad de unidades de Triple X que se producirán, debe calcularse y solicitarse al almacén los materiales necesarios. No se cuenta con materiales disponibles hasta que el almacén realiza su primera entrega a las 9 de la mañana, por un tercio del material solicitado. El almacén hace dos entregas más, cada una a intervalos de tiempo que varían uniformemente entre 120 y 240 minutos, por los tercios restantes. La última entrega se realiza 169 minutos antes de terminar la jornada y debe completar el total solicitado al almacén. Modelar los cambios necesarios y simular durante 8 horas.

<sup>11</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2005-1".



Indicadores de Desempeño:

1. 22 cajas
2. 10.1836 minutos
3. 5.0827 minutos
4. 2.4712 unidades
5. Stock final: MPA: 736 unidades  
MPB: 868 unidades
6. 4.5 horas (ó 271.4914 minutos).

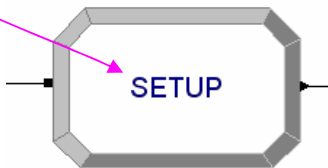
Interpretación:

- Para calcular el número de cajas a producir se utilizó la función AINT que trunca la parte decimal de un número real. Ejemplo: AINT(UNIF(20,30))
- Se produjeron 22 cajas (132 unidades). Se consumieron 264 unidades de materia prima A (22\*6\*2) y 132 unidades de materia prima B (22\*6\*1).
- Al final de la simulación no quedaron productos en proceso en la planta.

**Escenario:**

Assignments:

Variable, NUM CAJAS, AINT(UNIF(20,30))  
 Variable, NUM UNIDADES, 6\*NUM CAJAS  
 Variable, INTRVL 1, UNIF(120,240)  
 Variable, INTRVL 2, UNIF(120,240)



Durations:

$2 * \frac{1}{3} * \text{NUM UNIDADES}$ , INTRVL 1  
 $2 * \frac{1}{3} * \text{NUM UNIDADES}$ , INTRVL 2  
 $2 * (\text{NUM UNIDADES} - \frac{2}{3} * \text{NUM UNIDADES})$ , 169

Durations:

$1 * \frac{1}{3} * \text{NUM UNIDADES}$ , INTRVL 1  
 $1 * \frac{1}{3} * \text{NUM UNIDADES}$ , INTRVL 2  
 $1 * (\text{NUM UNIDADES} - \frac{2}{3} * \text{NUM UNIDADES})$ , 169

  
Schedule

	Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1	PROGRAMA ASIGNACION MP A	Duration	Capacity	Minutes	1.0	3 rows
2	PROGRAMA ASIGNACION MP B	Duration	Capacity	Minutes	1.0	3 rows

  
Resource

	Name	Type	Capacity	Schedule Name	Schedule Rule
1	MOLDEADORA	Fixed Capacity	1		Wait
2	MATERIA PRIMA A	Based on Schedule	PROGR	PROGRAMA ASIGNACION MP A	Ignore
3	MATERIA PRIMA B	Based on Schedule	PROGR	PROGRAMA ASIGNACION MP B	Ignore

Run Setup...

Replication Length:  Time Units:

Hours Per Day:  Base Time Units:

System		Average
Time Persistent		Maximum Value
Variable		
NUM CAJAS	22.0000	
NUM UNIDADES	132.00	

No se cumple con el plan de producción.

## 15

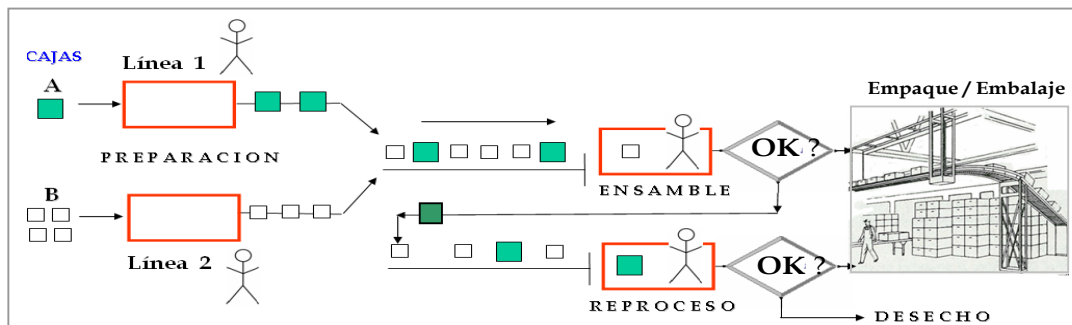
## Caso de estudio

**Ensamble, prueba y embalaje de componentes electrónicos<sup>12</sup>**

## Objetivos:

- o Modelado de operaciones de ensamble.
- o Loteo de entidades, aplicación práctica de los nodos Batch y Separate.
- o Aplicación de Resource Set y uso de la variable MR(Resource).
- o Módulo de datos Schedule. Uso de la función discreta Disc.

El sistema por modelar representa las operaciones finales de una línea de producción de dos dispositivos electrónicos: A y B. El proceso de producción de un dispositivo consiste en la preparación de cajas metálicas, ensamblarlas con los componentes electrónicos correspondientes y, finalmente, embalar los dispositivos.



Las cajas metálicas A se producen en un departamento adyacente y entregan las cajas producidas en intervalos que se ajustan a una Expo(5) minutos. Estas son transferidas a una primera estación, donde un operario maquina las caras interiores de la caja para asegurar un buen sellado; el tiempo de este proceso responde a una Tria(1, 4, 8) minutos. Luego, las cajas son enviadas a la segunda estación, donde se ensamblan con los componentes electrónicos, son selladas y sometidas a una prueba de calidad. El tiempo para este proceso, ejecutado por un operario, corresponde a una Tria(1, 3, 4) minutos.

Las cajas metálicas B son producidas en otro edificio y enviadas a la planta de dispositivos en lotes de 4 cajas, según una Expo(30) minutos. Estas son recibidas en una primera estación, donde un operario prepara exclusiva e individualmente las unidades B; el tiempo de este proceso corresponde a una distribución Tria(3, 5, 10) minutos. Luego, las cajas son enviadas a la segunda estación, donde son ensambladas, selladas y sometidas a una prueba de calidad; esta estación es la misma que procesa la unidad A, trabajando en estricto orden de llegada. El tiempo para este proceso es una WEI-Bull(2.5, 5.3) minutos.

El 91% de los dispositivos (A o B) pasan la prueba y se envían al Área de Empaque. Los dispositivos rechazados se envían a una estación de reproceso, donde las unidades son reparadas y revisadas nuevamente por un técnico. El 80% de estas unidades son salvadas y enviadas al Área de Empaque, el resto se desecha. El tiempo de reproceso responde a una Expo(45) minutos, sin importar el tipo de dispositivo.

Se desea obtener indicadores de desempeño adecuados a la situación planteada; correr la simulación para cuatro turnos consecutivos de 8 horas, es decir 32 horas.

<sup>12</sup> Enunciado tomado de KELTON, W. D; SADOWSKI, R. P. y D. T. STURROCK. Op. cit.

# Solución

Entity Type: COMP A

Type: Random (Expo) Value: 5 Units: Minutes

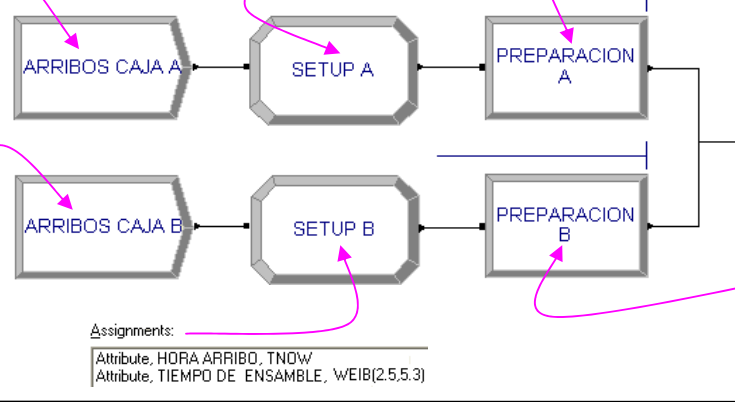
Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: Infinite First Creation: 0.0

Entity Type: COMP B

Type: Random (Expo) Value: 30 Units: Minutes

Entities per Arrival: 4 Max Arrivals: Infinite First Creation: 0.0

Assignments:  
Attribute, HORA ARRIBO, TNOW  
Attribute, TIEMPO DE ENSAMBLE, TRIA(1,3,4)



Action: Seize Delay Release

Resources: Resource, OPERARIO A, 1

Delay Type: Triangular Units: Minutes

Minimum: 1 Value: 4 Maximum: 8

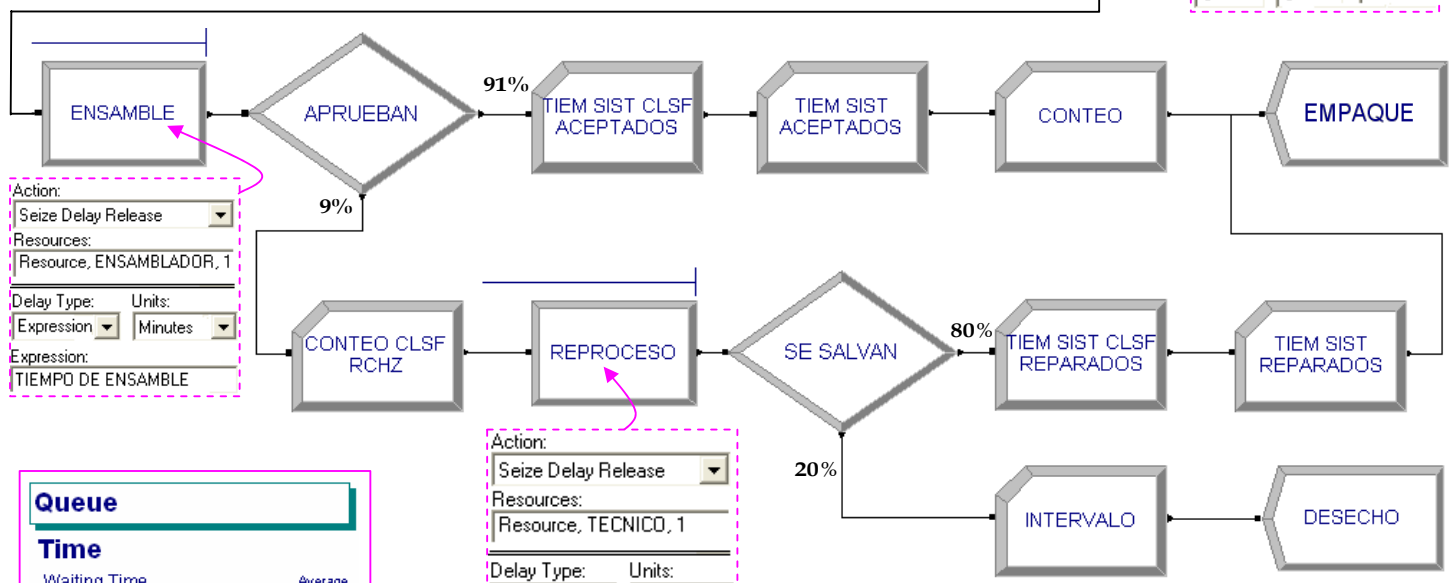
Action: Seize Delay Release

Resources: Resource, OPERARIO B, 1

Delay Type: Triangular Units: Minutes

Minimum: 3 Value: 5 Maximum: 10

Assignments:  
Attribute, HORA ARRIBO, TNOW  
Attribute, TIEMPO DE ENSAMBLE, WEIB(2.5,5.3)



Action: Seize Delay Release

Resources: Resource, ENSAMBLADOR, 1

Delay Type: Expression Units: Minutes

Expression: TIEMPO DE ENSAMBLE

Action: Seize Delay Release

Resources: Resource, TECNICO, 1

Delay Type: Expression Units: Minutes

Expression: EXPO(45)

Run Setup...

Replication Length: 32 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

Queue	
Time	
Waiting Time	Average
ENSAMBLE.Queue	4.3282
PREPARACION A.Queue	14.0156
PREPARACION B.Queue	31.0454
REPROCESO.Queue	596.59
Other	
Number Waiting	Average
ENSAMBLE.Queue	1.5577
PREPARACION A.Queue	3.1250
PREPARACION B.Queue	4.2687
REPROCESO.Queue	25.3973

Tally	
Between	Average
INTERVALO	164.96
Interval	
	Average
TIEM SIST ACEPTADOS	31.9300
TIEM SIST REPARADOS	707.63

Usage	
	Average
TS ACEPTADOS A	24.8408
TS ACEPTADOS B	43.3264
TS REPARADOS A	744.13
TS REPARADOS B	657.86

Counter	
Count	Value
NUM ACEPTADOS A	381.00
NUM ACEPTADOS B	237.00
NUM RCHZ A	46.0000
NUM RCHZ B	27.0000

Entity Type	
1	CAJA A
2	CAJA B

Name	Type	Capacity
1 OPERARIO B	Fixed Capacity	1
2 OPERARIO A	Fixed Capacity	1
3 ENSAMBLADOR	Fixed Capacity	1
4 TECNICO	Fixed Capacity	1

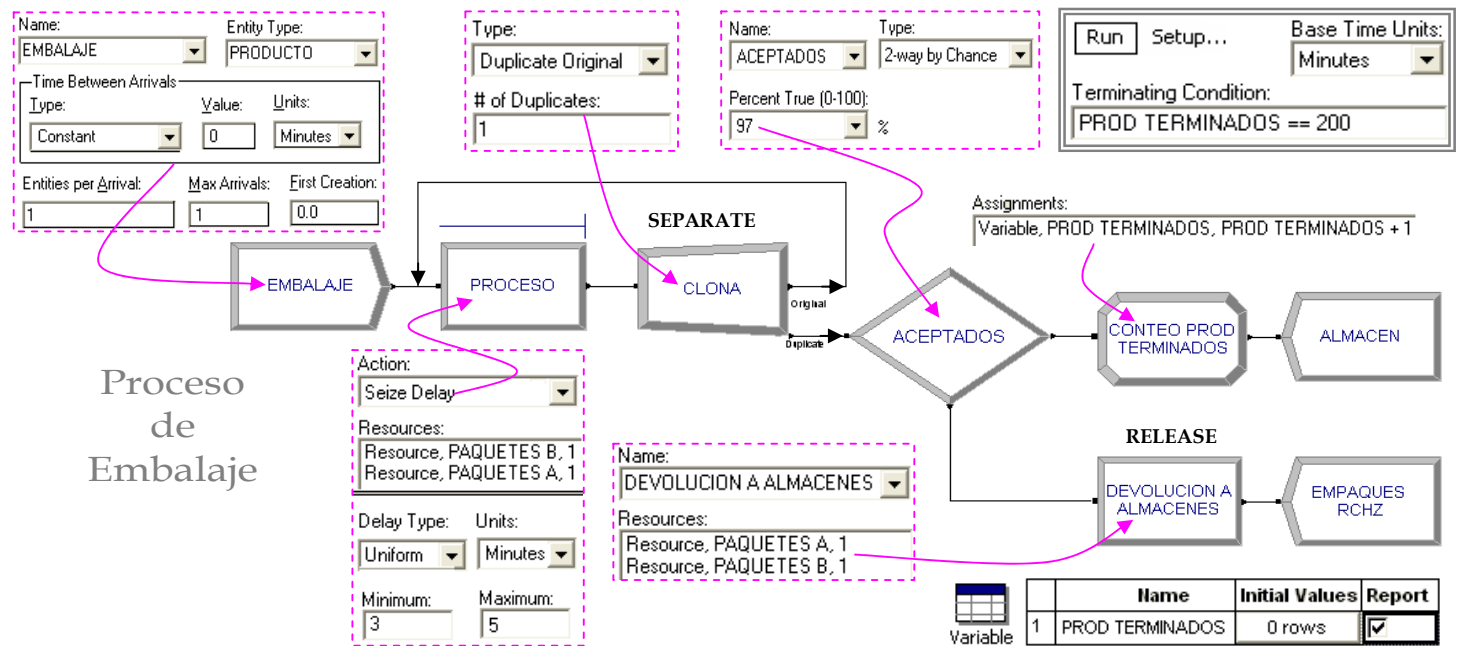
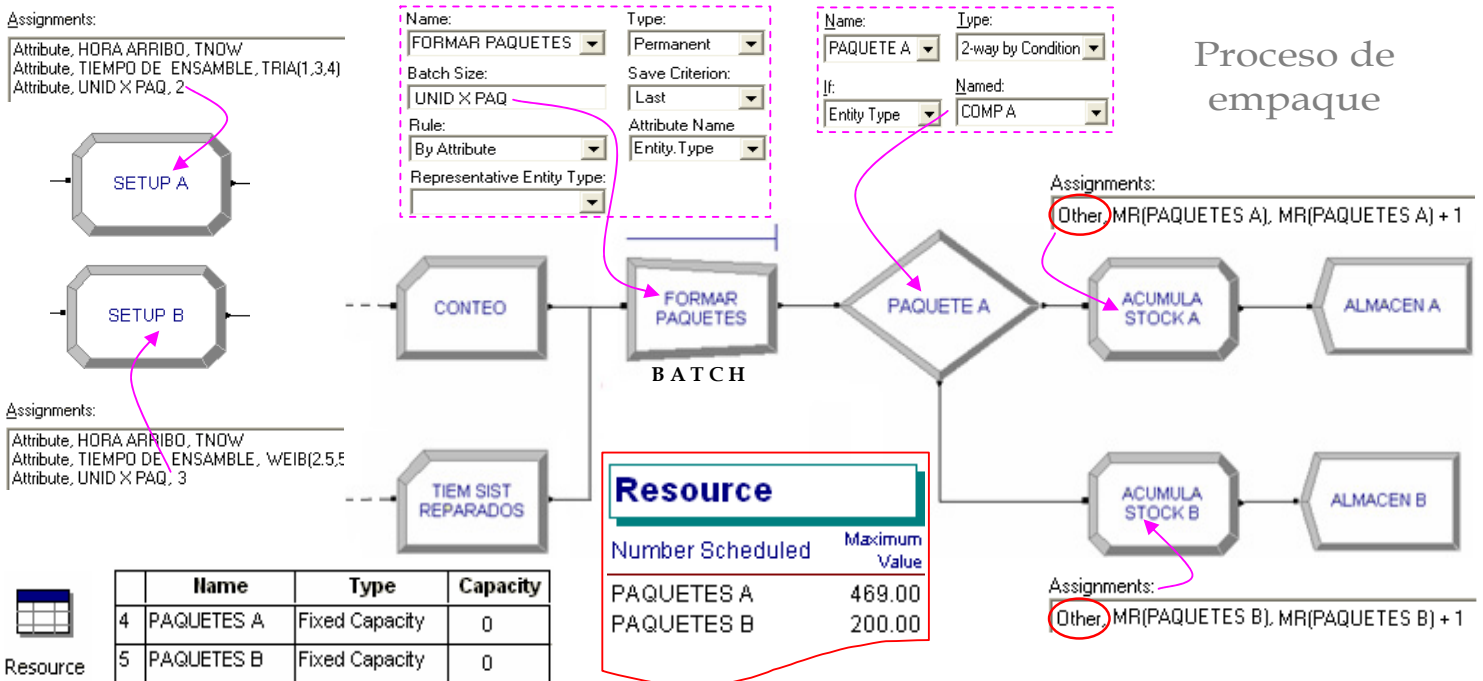
Name	Type	Members
1 TS ACEPTADOS	Tally	2 rows
2 NUM ACEPTADOS	Counter	2 rows
3 NUM RCHZ	Counter	2 rows
4 TS REPARADOS	Tally	2 rows



### Escenario 1

Se desea agregar dos procesos: empaque y embalaje. En el proceso de empaque se forma un paquete A, que contiene 2 dispositivos A y un paquete B, que contiene 3 dispositivos B; considere que el tiempo para formar paquetes es despreciable.

En el proceso de embalaje, se obtiene el producto final introduciendo 1 paquete A y 1 paquete B en una caja; el tiempo para este proceso demora una Unif(3, 5) minutos. Luego de esto, se efectúa un control visual del embalaje, el 97% es aceptado y se almacena como producto terminado. Si es rechazado, los paquetes son retirados de la caja y estos regresan a sus correspondientes almacenajes. Agregue las modificaciones y simúlelo hasta entregar 200 productos terminados. Analice el comportamiento de los almacenajes de paquetes de A y de B.



### Escenario 2

Respecto al escenario original, suponga que las cajas metálicas A son producidas por un tercero, entregando unidades producidas en lotes de 2 o 3 unidades (equi-probablemente) cada intervalo de tiempo que responde a una Expo(12) minutos. Determinar si este cambio afecta a alguno de los indicadores pedidos.

Tally	
Interval	Average
TIEM SIST ACEPTADOS	61.4264
TIEM SIST REPARADOS	526.93

Counter	
Count	Value
NUM ACEPTADOS A	338.00
NUM ACEPTADOS B	271.00
NUM RCHZ A	25.0000
NUM RCHZ B	26.0000

### Escenario 3

Respecto al escenario original, suponga que la planta opera solo dos turnos por día y que en el segundo turno se asignan dos operarios para el Reproceso. Simular el modelo por 10 días. Determinar qué indicadores mejoran con esta medida.

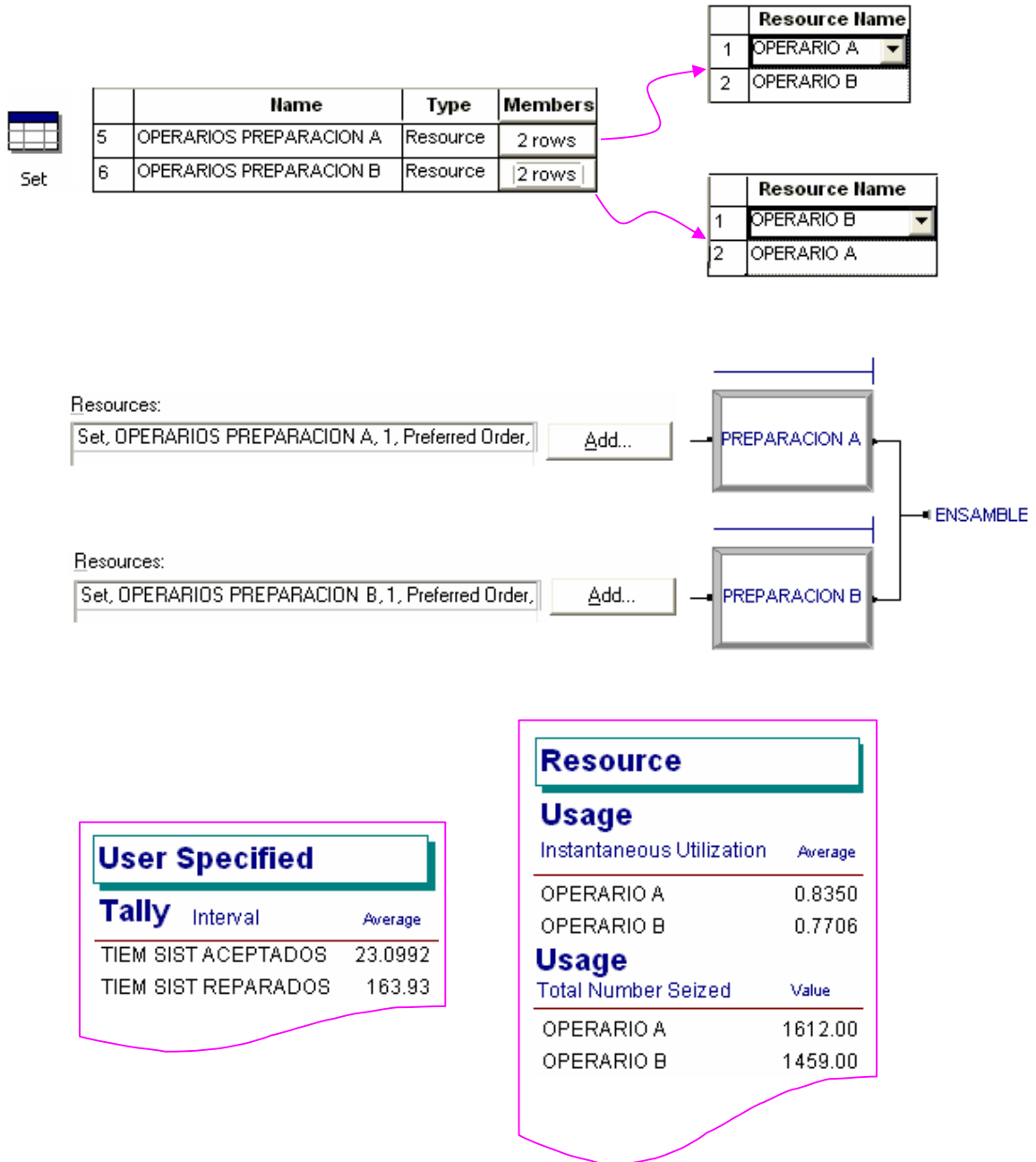
Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1 PROGRAMACION REPROCESO	Duration	Capacity	Hours	1.0	2 rows

Name	Type	Capacity	Schedule Name	Schedule Rule
1 OPERARIO B	Fixed Capacity	1		Wait
2 OPERARIO A	Fixed Capacity	1		Wait
3 ENSAMBLADOR	Fixed Capacity	1		Wait
4 TECNICO	Based on Schedule	1	PROGRAMACION REPROCESO	Ignore

Interval	Average
TIEM SIST ACEPTADOS	37.2353
TIEM SIST REPARADOS	254.90

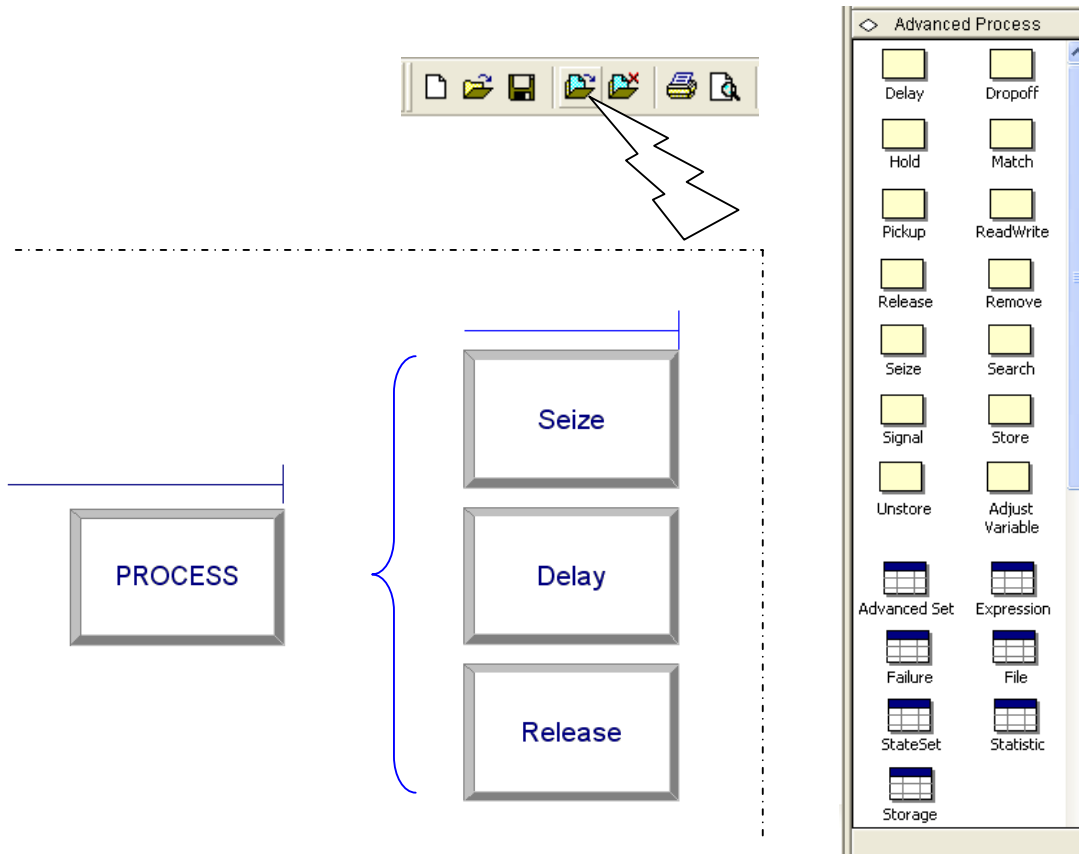
### Escenario 4

Con relación al Escenario 3, se quieren seguir mejorando los resultados del sistema. La propuesta adicional es que la preparación de cualquiera de las dos cajas (A o B), pueda ser efectuada por cualquiera de los dos operarios que actualmente trabajan con un solo tipo de caja. De estar los dos operarios desocupados, una caja A preferirá al operario A y una caja B al operario B. Determinar si se logra la mejora esperada.



## 12. FUNCIONES INDIVIDUALIZADAS DE UN PROCESO

Para el modelado de sistemas, el software Arena dispone de plantillas adicionales a la de módulos básicos; en esta parte abordaremos una nueva plantilla, denominada procesos avanzados: Advanced Process.



Como se sabe, el módulo básico Process, estudiado anteriormente, integra tres funciones importantes, para modelar las operaciones o actividades que requieren recursos del sistema, estas son: Seize, Delay y Release. En la plantilla de procesos avanzados se dispone de los tres módulos individualizados, para brindar cierta flexibilidad en el proceso de modelado cuando se desea que no estén integrados.

**Ejemplo:**

Suponga que se desea medir el tiempo promedio de servicio, es decir el tiempo de atención por el servidor. Esto no es factible si la operación se modela en el módulo Process; sin embargo, con el módulo Delay sí es posible si empleamos el módulo Delay, ya que se toman estadísticas desde que entra hasta que sale del servidor (marcamos el inicio en el módulo Assign, antes del Delay y registramos la salida con el módulo Record, después del Delay. Si las funciones están integradas no podemos capturar el instante en que la entidad pasa de la cola al servidor.

A continuación se presentan los tres primeros módulos avanzados, que individualizan las tres funciones del módulo Process.

## 12.1 Módulo SEIZE

Este módulo asigna unidades de uno o más recursos o un miembro de un conjunto de recursos. Cuando una entidad entra a este módulo esta espera en una cola hasta que todos los recursos requeridos estén disponibles para que le sean asignados simultáneamente.

The image shows the 'Seize' configuration dialog box with several callouts explaining its fields:

- Name:** ASIGNACION (Callout: Recurso y número de unidades requerido. Puede ser el miembro de un conjunto solicitado (set).)
- Allocation:** Transfer (Callout: Categoría a la que pertenece el costo que le corresponde a la entidad por utilizar el recurso: Value Added, Non-Value Added, Transfer, Wait, Other.)
- Priority:** Low(3) (Callout: Las entidades que esperan en cola por el recurso tienen prioridad baja si compiten con otras entidades que solicitan el mismo recurso en otros módulos Seize.)
- Resources:** Resource.VEHICULO.1. (Callout: Tipo de cola en la que esperan las entidades por el recurso)
- Queue Type:** Queue (Callout: Una ventaja que posee el módulo individualizado Seize es que se puede indicar en cuál de las colas del modelo la entidad realizará la espera. Si provienen de diferentes orígenes, entonces dicha cola deberá definirse como compartida, activando la opción Shared del módulo de datos Queue.)
- Queue Name:** ASIGNACION.Queue

## 12.2 Módulo DELAY

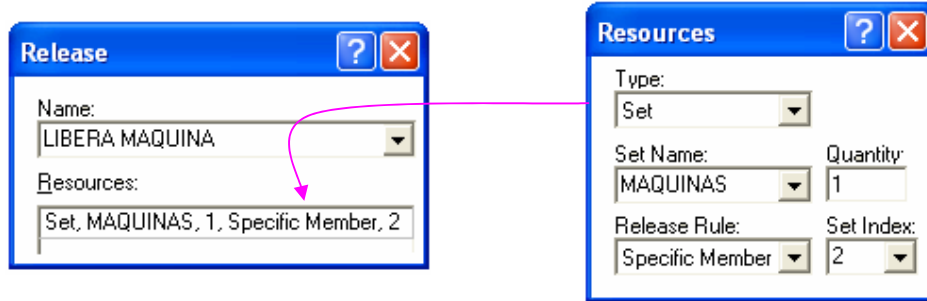
Este módulo retrasa la entidad por un tiempo determinado. Al ingresar una entidad al módulo Delay, esta permanece en el módulo por el intervalo especificado. Este tiempo es asignado a la entidad, a la categoría que le corresponda como Value Added, Non-Value Added, Transfer, Wait y Other Time. Según esto, los costos correspondientes también se asignan a la entidad.

The image shows the 'Delay' configuration dialog box with the following fields:

- Name:** DURACION DEL EMPAQUE
- Allocation:** Value Added
- Delay Time:** 10
- Units:** Minutes

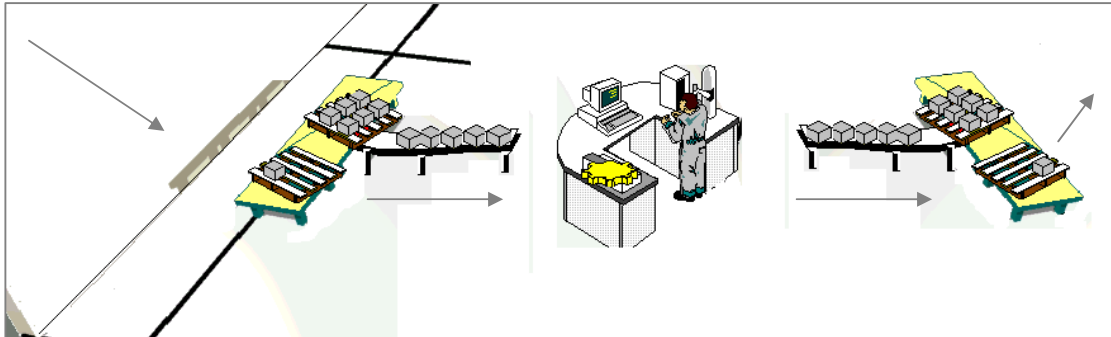
### 12.3 Módulo RELEASE

Este módulo permite liberar un recurso o un miembro de un conjunto (Set) que previamente ha sido asignado (Seize). Por cada recurso liberado el nombre de este y la cantidad deben ser especificados en el nodo Release. Al hacer efectiva esta liberación la entidad en cola, cuyo turno le corresponde, puede tomar al recurso liberado.



*Ilustración:* Asignación de recursos en una secuencia de operaciones.

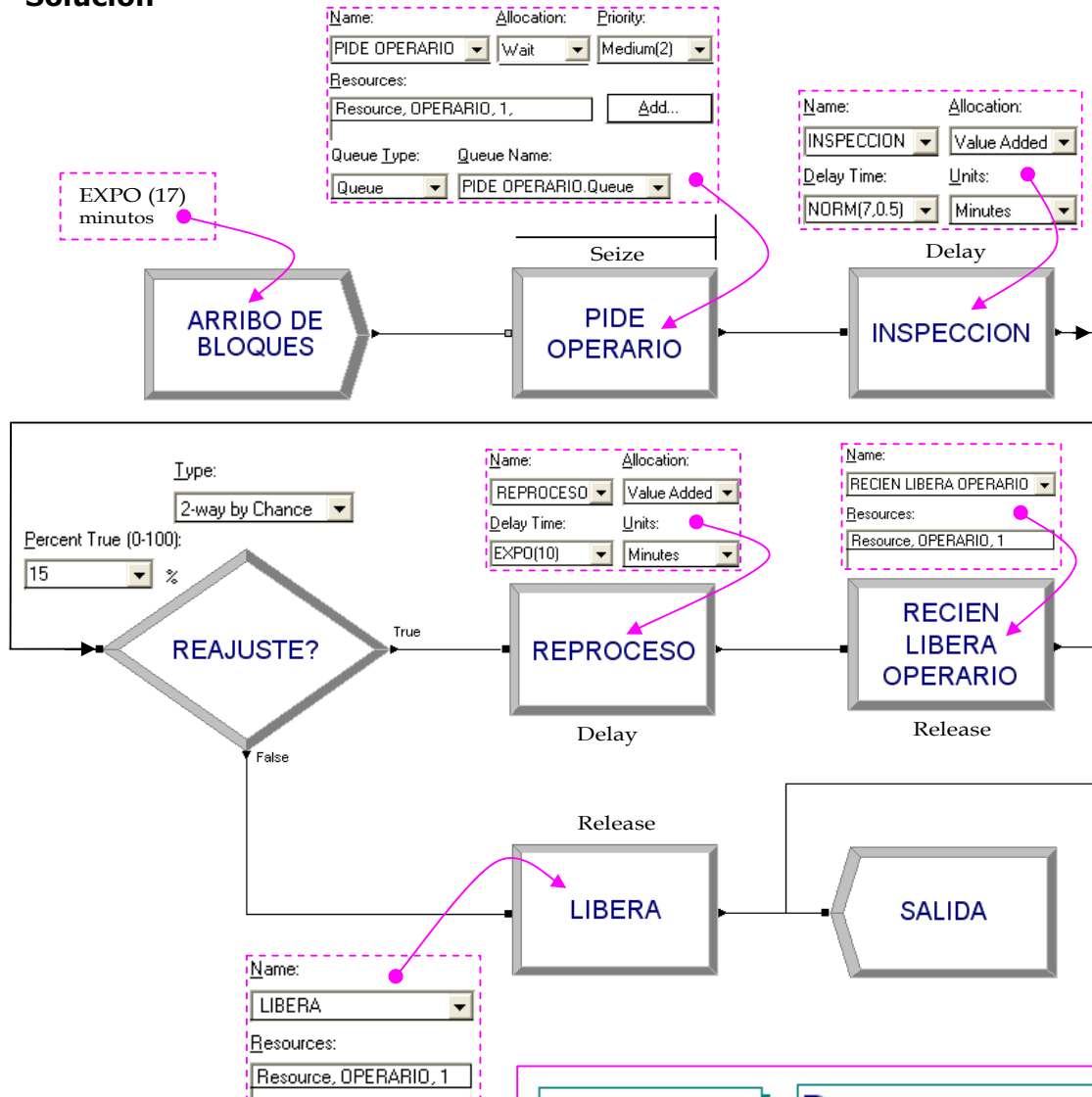
Considerar la situación en que un operario realiza la tarea de inspección de unos bloques de madera, que son producidos por la empresa. Véase el siguiente esquema:



Los bloques llegan cada EXPO(17) minutos, y deben permanecer en espera si el operario no se encuentra disponible. Si el operario está disponible realiza la operación de inspección, que demora una NORM(7,0.5) minutos. Las unidades que aprueban la inspección salen de la planta para su posterior despacho. Si el bloque no aprobó la inspección, entonces requiere un reproceso y el mismo operario ejecuta dicha operación, que demanda un tiempo EXPO(10) minutos. Por lo tanto, el operario no siempre está disponible cuando termina una inspección porque debe ejecutar la operación de reproceso. El 15% de los bloques producidos requieren reproceso.

Formular un modelo de simulación para la situación descrita, incluyendo la utilización de recursos. La finalización de la simulación se produce cuando 200 bloques salen del sistema.

### Solución



Run Setup...

Replication Length: Infinite  
 Time Units: Minutes  
 Hours Per Day: 24  
 Base Time Units: Minutes  
 Terminating Condition: SALIDA.NUMBEROUT ==200

Entity		Resource	
<b>Time</b>		<b>Usage</b>	
VA Time	Average	Instantaneous Utilization	Average
Entity 1	8.4557	OPERARIO	0.5047
NVA Time	Average	Total Number Seized	Value
Entity 1	0.00	OPERARIO	200.00
Wait Time	Average		
Entity 1	6.5214		
Transfer Time	Average		
Entity 1	0.00		
Other Time	Average		
Entity 1	0.00		
Total Time	Average		
Entity 1	14.9770		

Según el reporte, hubo una eficiencia de 50.47% en el uso del recurso, el cual fue requerido y asignado en 200 oportunidades. El tiempo de permanencia en el sistema de las entidades fue en promedio de 14.97 minutos.

16

Caso de estudio

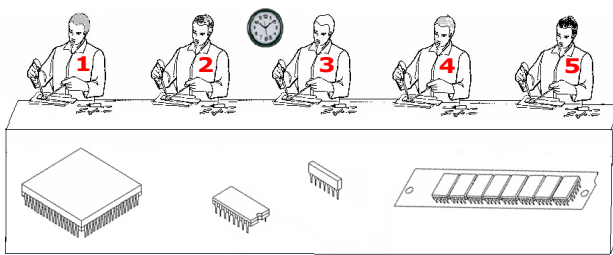
**Arreglo de fallas en circuitos integrados**

Objetivos:

- o Conjunto de recursos: Resource Set.
- o Declaración de los miembros del conjunto (módulo de datos Set).
- o Reglas de selección del recurso: Specific Member/Set Index (módulo Process).
- o Módulos Seize-Delay-Release con Queue Type: Set. Módulo de datos Advanced Set (conjunto de colas). Expression (plantilla Advanced Process).

Al departamento de servicio técnico de una empresa llegan componentes electrónicos con un determinado diagnostico de falla. Existen cinco posibles tipos de fallas con las que puede llegar un equipo, la ocurrencia de estas se ajustan a una distribución uniforme. A este departamento se han asignado 5 técnicos especializados en cada tipo de fallas; los componentes llegan de acuerdo a un tiempo entre arribos que se distribuye exponencialmente, con una media de 4 minutos.

En el instante en que llegan los componentes, según la falla, estos son derivados al especialista correspondiente que arregla, en forma exclusiva, un solo tipo de falla. Es posible que coincidan simultáneamente componentes que tienen un mismo tipo de falla y demanden el mismo técnico, en este caso se formará una cola de espera con regla FIFO. En la tabla siguiente se muestra el tiempo que tarda un técnico en arreglar la falla de un componente electrónico:



Técnico	Tiempos de revisión y arreglo (minutos/componente)
Técnico 1	NORM(10,1)
Técnico 2	UNIF(4,9)
Técnico 3	TRIA(3,5,7)
Técnico 4	EXPO(5)
Técnico 5	UNIF(2,5)

Se pide:

Formular un modelo adecuado a la situación descrita y simular el funcionamiento del departamento de servicio técnico durante una jornada de trabajo de 8 horas. Obtener los siguientes indicadores de desempeño:

1. Determinar el tiempo promedio para revisar y arreglar un componente electrónico. Discriminar por tipo de falla.
2. ¿Cuántas unidades arregló cada técnico?
3. Utilización promedio de cada uno de los cinco técnicos.

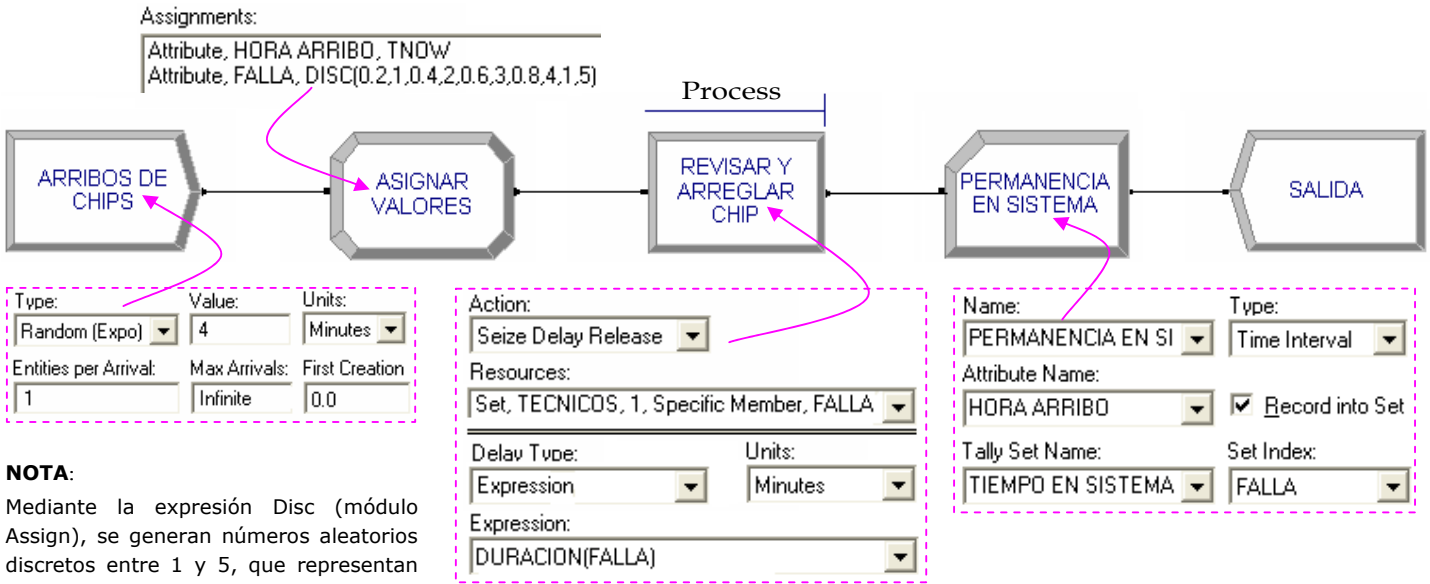
**Escenario**

Suponga que entre los indicadores de desempeño con mayor interés para el estudio se encuentran aquellos relacionados con las colas de espera. Se pide:

4. Determinar el tiempo promedio de espera y el tamaño de cola por cada uno de los cinco técnicos.



**Solución 1:** Solución corta, utilizando conjuntos y Expression



**NOTA:**  
 Mediante la expresión Disc (módulo Assign), se generan números aleatorios discretos entre 1 y 5, que representan el tipo de falla que tiene la entidad que ingresa al sistema. Así, la probabilidad que tiene cada tipo de falla es de 0.2.

Name	Rows	Columns	Expression Values
1	DURACION	5	5 rows

1	NORM(10,1)
2	UNIF(4,9)
3	TRIA(3,5,7)
4	EXPO(5)
5	UNIF(2,5)

Name	Type	Members	
1	TECNICOS	Resource	5 rows
2	TIEMPO EN SISTEMA	Tally	5 rows

Resource Name	
1	TECNICO 1
2	TECNICO 2
3	TECNICO 3
4	TECNICO 4
5	TECNICO 5

Tally Name	
1	TIEMPO EN SISTEMA 1
2	TIEMPO EN SISTEMA 2
3	TIEMPO EN SISTEMA 3
4	TIEMPO EN SISTEMA 4
5	TIEMPO EN SISTEMA 5

Run Setup...

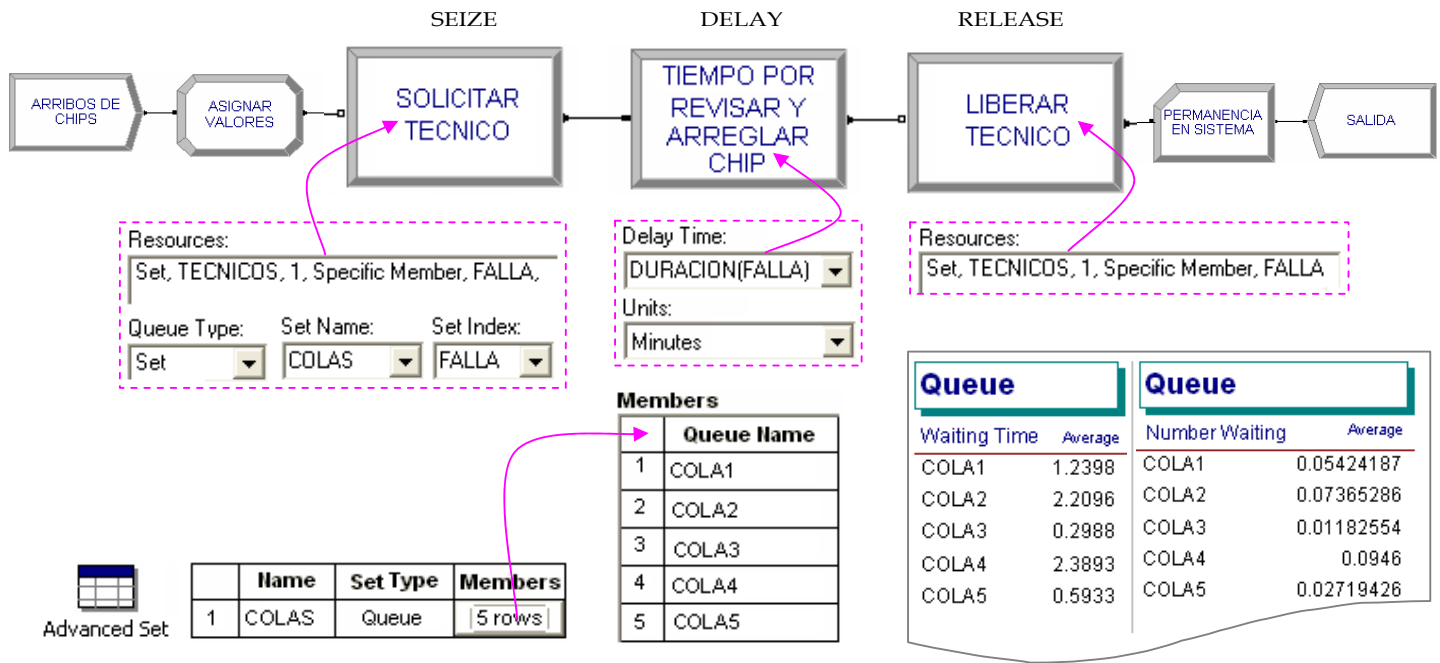
Replication Length: 8 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

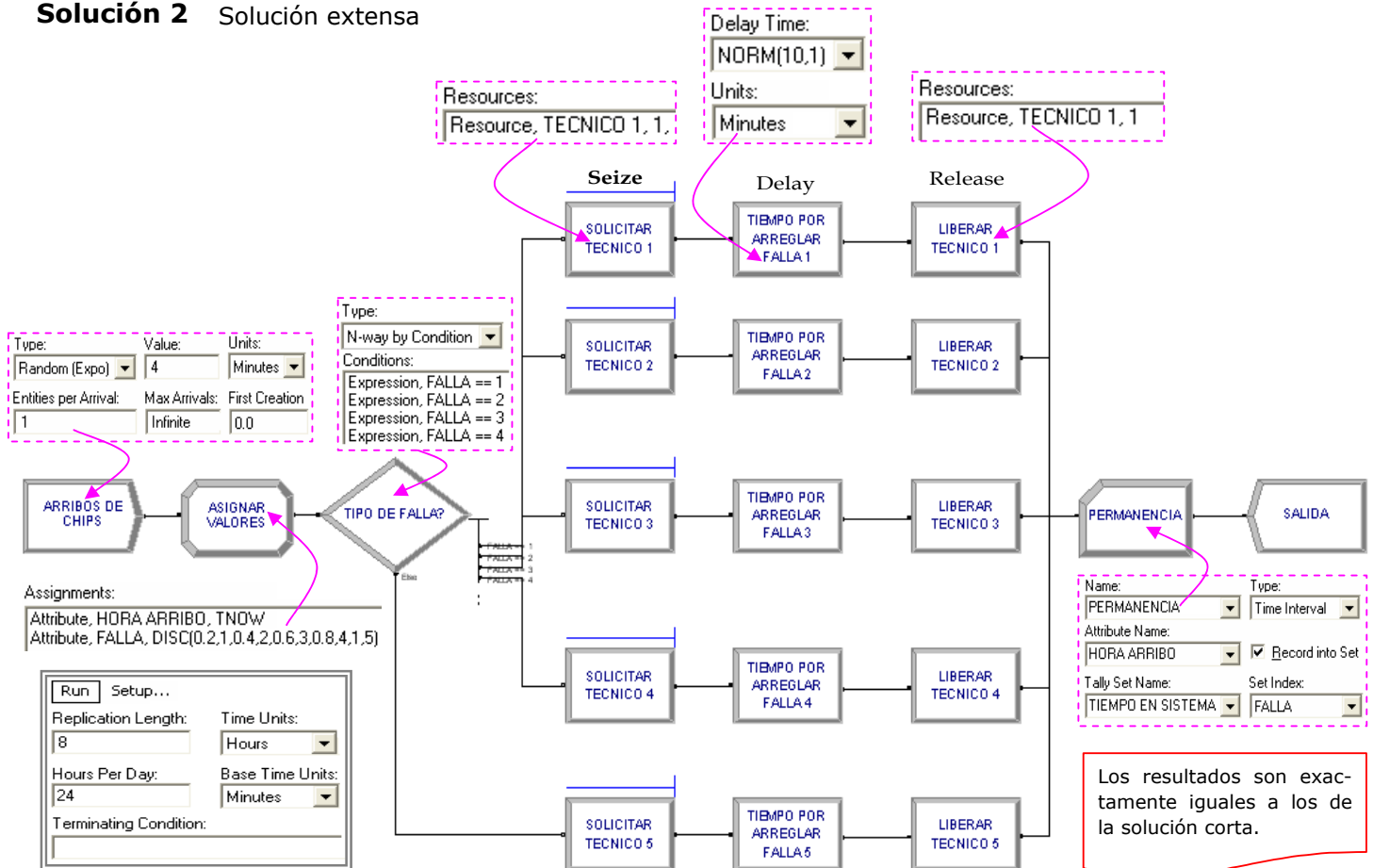
Terminating Condition:

User Specified		Resource		Resource	
	Average	Total Number Seized	Value	Instantaneous Utilization	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	11.1023	TECNICO 1	21.0000	TECNICO 1	0.4315
TIEMPO EN SISTEMA 2	8.1992	TECNICO 2	16.0000	TECNICO 2	0.1997
TIEMPO EN SISTEMA 3	5.4604	TECNICO 3	19.0000	TECNICO 3	0.2043
TIEMPO EN SISTEMA 4	8.2138	TECNICO 4	19.0000	TECNICO 4	0.2306
TIEMPO EN SISTEMA 5	3.9502	TECNICO 5	22.0000	TECNICO 5	0.1539

**Escenario** Se cambia el módulo Process por los módulos SEIZE-DELAY-RELEASE:



**Solución 2** Solución extensa



17

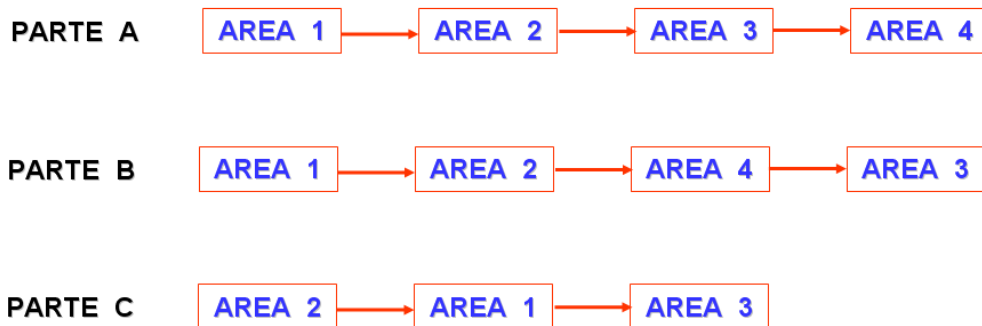
Caso de estudio

**Secuencia de operaciones de un proceso<sup>13</sup>**

Objetivos:

- o Aplicación práctica de los módulos de datos Expression (matriz).
- o Manejo avanzado de conjuntos Advanced Set (Queue Type: Set) conjunto de colas.
- o Interpretación del reporte de resultados.

En una planta de producción se realizan 4 operaciones distintas, cada una en un área exclusiva. Al sistema llegan tres tipos de partes: parte A, parte B y parte C, las cuales seguirán una secuencia preestablecida de operaciones; los tiempos entre llegadas de las partes corresponde a una distribución de probabilidad exponencial, con una media de 13 minutos. En el siguiente esquema se muestra la secuencia de operaciones que sigue cada una de las partes:

**SECUENCIA DE OPERACIONES**

En la tabla siguiente se muestran los tiempos de actividad en cada una de las áreas, que corresponden a una distribución de probabilidad triangular:

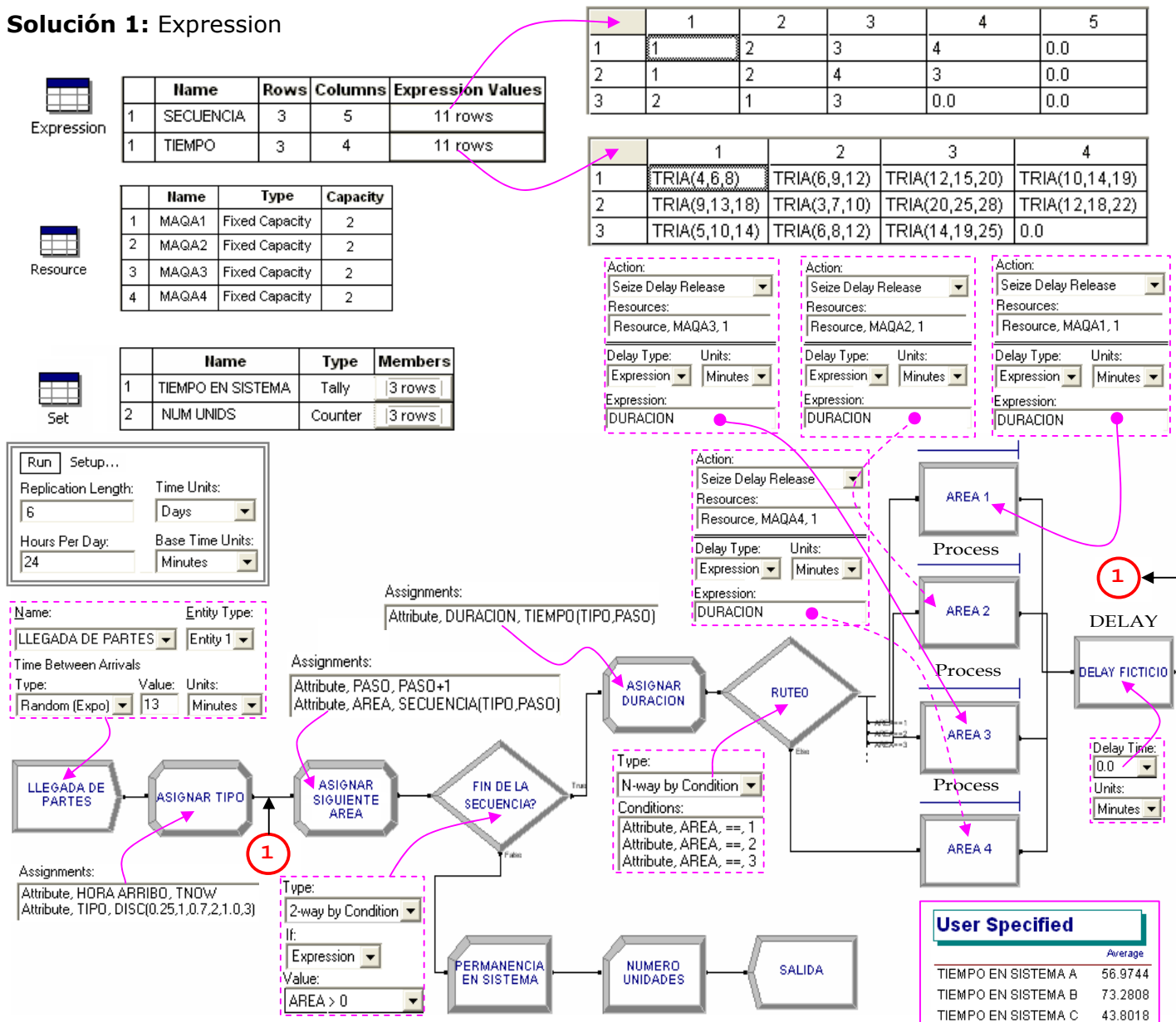
	<b>Tiempos de actividad (minutos)</b>			
	<b>Área 1</b>	<b>Área 2</b>	<b>Área 3</b>	<b>Área 4</b>
<b>Parte A</b>	4 , 6 , 8	6 , 9 , 12	12 , 15 , 20	10 , 14 , 19
<b>Parte B</b>	9 , 13 , 18	3 , 7 10	20 , 25 , 28	12 , 18 , 22
<b>Parte C</b>	5 , 10 , 14	6 , 8 , 12	14 , 19 , 25	

Existen dos máquinas disponibles por cada área. Durante los arribos de las partes la probabilidad de que sea parte A es de 25%, de que sea parte B, 45% y de que sea parte C, 30%. Se pide:

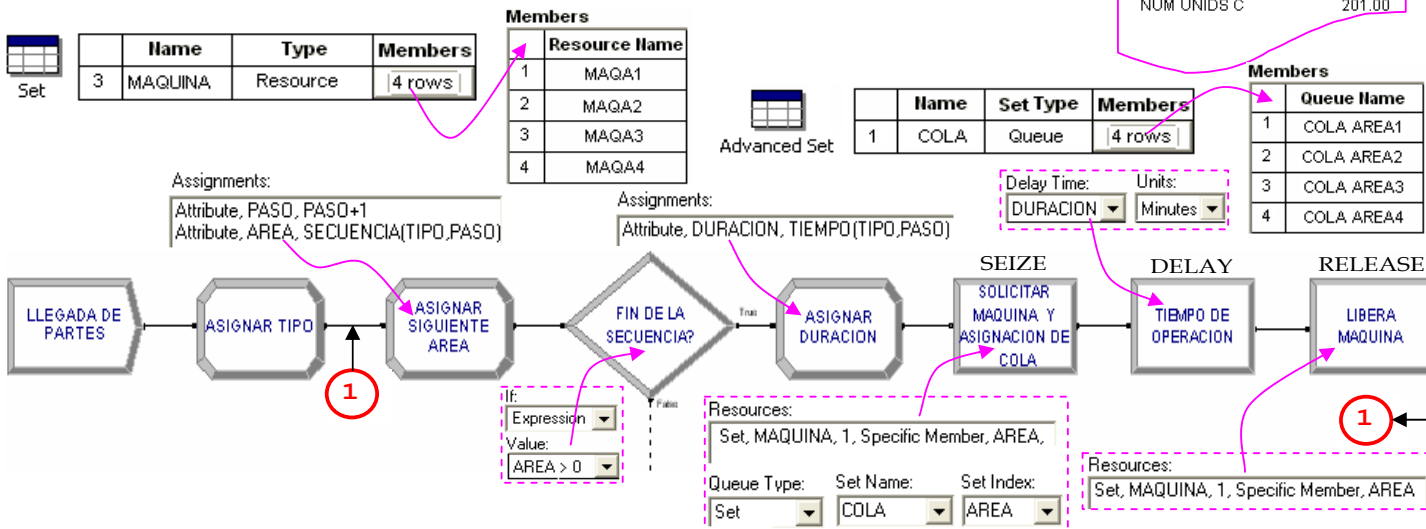
1. Formular un modelo de simulación adecuado a la situación descrita y simularlo durante 6 días (24 horas/día).
2. Obtener las estadísticas sobre tiempo en sistema por tipo de parte y general, así también como número de unidades procesadas por cada tipo de parte.

<sup>13</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. Op. cit.

### Solución 1: Expression



### Solución 2: Expression / Set / Advanced Set

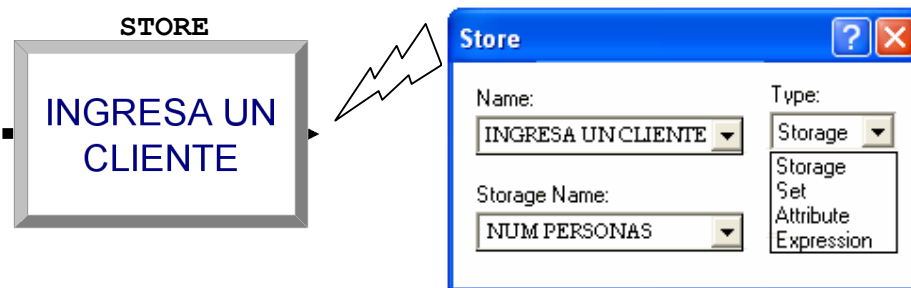


## 13. ACUMULADORES AUTOMÁTICOS

Los módulos Store y Unstore, en su modalidad Storage, posibilitan el almacenaje automático de valores en áreas de memoria determinadas. Así, el Store acumula y el Unstore descuenta valores en forma automática. La importancia de su uso es que mide la cantidad de entidades en proceso en cualquier segmento de la red del modelo.

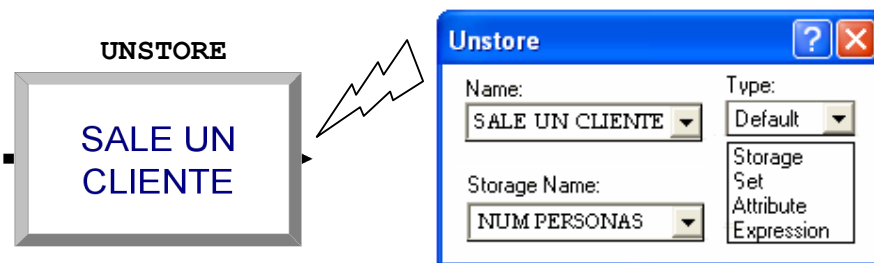
### 13.1 Módulo STORE

Este módulo agrega una entidad al almacenaje en memoria. Cuando una entidad ingresa a este módulo el almacenaje especificado (*storage name*) es incrementado y la entidad inmediatamente es trasladada al próximo módulo del modelo.



### 13.2 Módulo UNSTORE

Este módulo substrahe una entidad del almacenaje. Cuando una entidad ingresa a este módulo entonces el almacenaje especificado (*storage name*) decrece en una unidad y la entidad inmediatamente es trasladada al próximo módulo del modelo.



La variable NSTO(*Storage Name*) contiene el número de entidades en el almacenaje especificado (*storage name*). Si esta variable solo se incrementa con el tiempo, significa que las entidades no están siendo removidas por un módulo Unstore.

	Name	Type	Expression
1	NUMERO DE PERSONAS	Time-Persistent	NSTO(NUM PERSONAS)

Statistic

Time Persistent	Average	Minimum Value	Maximum Value
	NUMERO DE PERSONAS	5.1923	0.00

**Ilustración**

Se desea medir el número promedio de entidades en el sistema, es decir el *Work in process* (WIP) durante la simulación.

**Solución 1: Mirando el reporte: WIP**

The diagram shows a process flow: ARRIBOS (Arrivals) → ESTACION 1 (Station 1) → ESTACION 2 (Station 2) → SALIDA (Exit). Below each station are configuration panels:

- ARRIBOS:** Time Between Arrivals: Type: Random (Expo), Value: 15, Units: Minutes. Entities per Arrival: 1. Max Arrivals: 50. First Creation: 0.0.
- ESTACION 1:** Action: Seize Delay Release. Resources: Resource, EMPLEADO1, 1. Delay Type: Normal, Units: Minutes. Value (Mean): 10, Std Dev: 1.
- ESTACION 2:** Action: Seize Delay Release. Resources: Resource, EMPLEADO2, 1. Delay Type: Normal, Units: Minutes. Value (Mean): 12, Std Dev: 2.

On the right is a simulation control panel with settings like Number of Replications: 1, Warm-up Period: 0.0, and Hours Per Day: 24.

At the bottom left is an Entity report table:

Entity	WIP	Average	Min Value	Max Value
CLIENTES		1.4204	0.00	5.0000

**Solución 2: Usando una variable:**

The diagram shows a process flow: ARRIBOS → INCREMENTA → ESTACION 1 → ESTACION 2 → DECREMENTA → SALIDA. Below the INCREMENTA and DECREMENTA blocks are assignment panels:

- INCREMENTA:** Assignments: Variable, CUENTA, CUENTA + 1
- DECREMENTA:** Assignments: Variable, CUENTA, CUENTA - 1

Below the diagram is a Variable table:

Variable	Name	Initial Values	Report Statistics
1	CUENTA	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

At the bottom right is a User Specified Time Persistent report table:

Variable	Average	Min Value	Max Value
CUENTA	1.4204	0.00	5.0000

**Solución 3: Usando los módulos Store/Unstore:**

The diagram shows a process flow: ARRIBOS → STORE → ESTACION 1 → ESTACION 2 → UNSTORE → SALIDA. Below the STORE and UNSTORE blocks are configuration panels:

- STORE:** Name: STORE, Type: Storage, Storage Name: NUM
- UNSTORE:** Name: UNSTORE, Type: Default

Below the diagram is a Statistic table:

Statistic	Name	Type	Expression
1	NUMERO	Time-Persistent	NSTO(NUM)

At the bottom right is a User Specified Time Persistent report table:

Time Persistent	Average	Min Value	Max Value
NUMERO	1.4204	0.00	5.0000

18

Caso de estudio

**Funcionamiento de una central de llamadas<sup>14</sup>**

Nuestro centro de llamadas genérico recibe llamadas mediante un número central en una organización en la cual los clientes llaman para solicitar soporte técnico, pedir información de ventas o averiguar el estado de una orden. Las llamadas entrantes se reciben en intervalos de tiempo que son exponencialmente distribuidos con una media de 0.857 minutos. El número central alimenta a 26 líneas troncales. Si las 26 líneas troncales están en uso, el usuario recibe una señal de ocupado y se espera que el cliente pueda llamar más tarde. Para nuestro modelo, el cliente abandona la llamada si recibe la señal de ocupado. Un cliente que es atendido escucha una grabación y recibe 3 opciones: transferir a soporte técnico, a información de ventas o a información por el estado de una orden (76%, 16% y 8%, respectivamente). El tiempo estimado para esta actividad es UNIF (0.1, 0.6); todos los tiempos están en minutos.

Si elige Soporte Técnico una segunda grabación le pide identificar cuál de los tres tipos de productos está usando el cliente. Esto requiere un tiempo estimado de una UNIF(0.1, 0.5) minutos. Los porcentajes de pedidos para los productos tipos 1, 2 y 3 son 25%, 34% y 41%, respectivamente. Si un personal de soporte técnico está disponible para el tipo de producto seleccionado, la llamada es automáticamente dirigida a esa persona. Si ninguno está disponible en ese momento el cliente es ubicado en una cola electrónica, donde se le hace escuchar una música de rock hasta que un personal de soporte esté disponible. El tiempo para todas las llamadas de soporte es estimado por una TRIA(3, 6, 18) minutos, sin importar el tipo de producto. Al terminar la llamada el cliente sale del sistema.

Las llamadas a ventas son automáticamente dirigidas al equipo de ventas. Si ninguno de los representantes de ventas estuviera disponible, el cliente es entretenido con una música reconfortante (después de todo se tiene la esperanza de lograr una venta). Los tiempos de las llamadas de ventas son estimados por una TRIA(4, 15, 45); el personal de ventas suele hablar mucho más que el personal técnico. Al terminar la llamada, el cliente satisfecho sale del sistema.

Los clientes que requieren información sobre el estado de una orden son automáticamente manejados por el sistema telefónico y no existe un límite en el número que el sistema pueda manejar (excepto que solamente hay 26 líneas troncales, lo cual es, en sí mismo, un límite, ya que toda llamada ocupa una de estas líneas). El tiempo estimado para estas transacciones es una TRIA (2, 3, 4) minutos. El 15% de estos clientes opta por hablar con una persona real luego de haber recibido el estado de su orden. Estos clientes son dirigidos a los representantes de ventas, donde esperan con una prioridad menor que las llamadas de ventas. Esto significa que si una llamada por estado de órdenes está en la cola esperando por un representante de ventas y una nueva llamada de ventas ingresa, se le dará prioridad a la llamada de ventas sobre la de estado de la orden. La atención para estas llamadas de estado de órdenes es estimada en una duración TRIA(3, 5, 10) minutos. Estos clientes salen del sistema luego de ser atendidos.

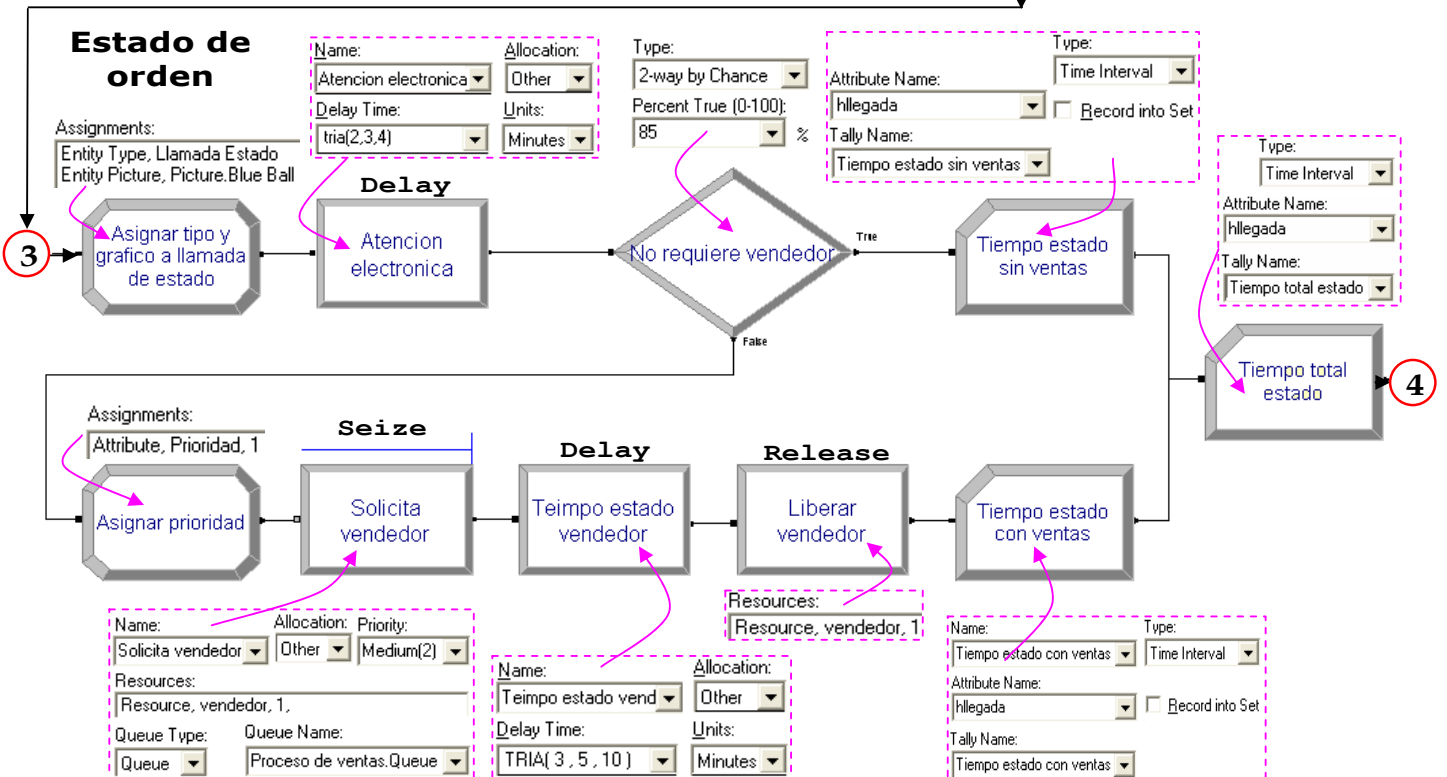
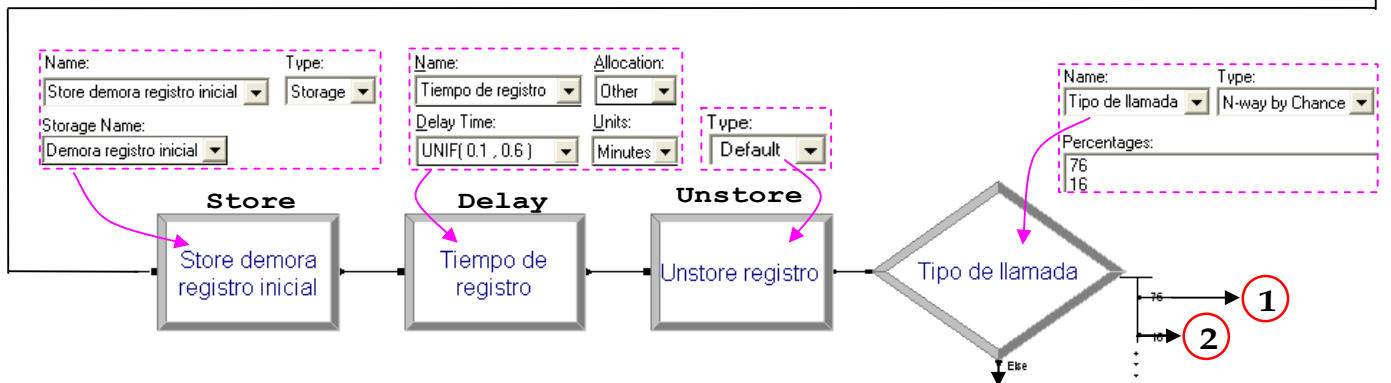
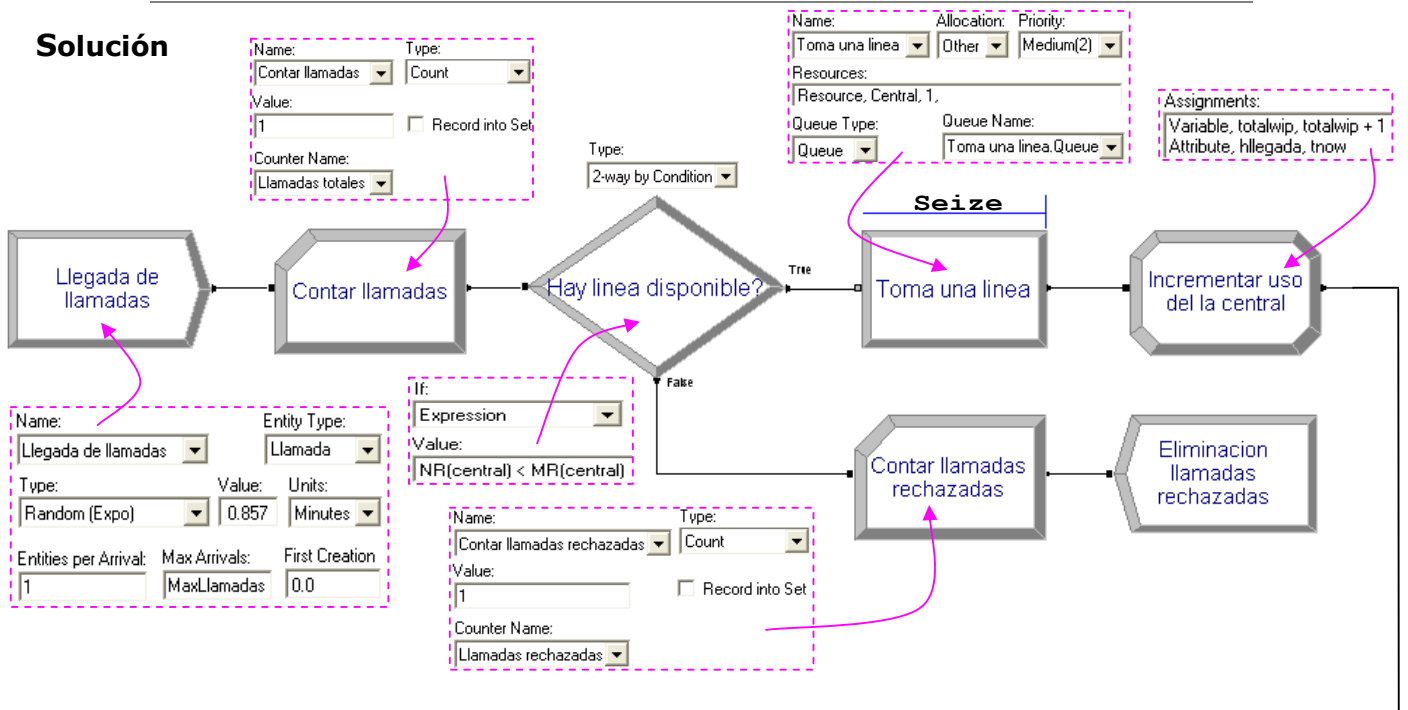
Las horas de trabajo del centro de llamadas van desde las 8 a.m. hasta las 6 p.m., con una pequeña proporción de personal trabajando hasta las 7 p.m. Aunque el sistema cierra para nuevas llamadas a las 6 p.m., todas las llamadas que han entrado en el sistema hasta esa hora deben ser atendidas.

A través del curso del día se tienen 8 empleados de soporte técnico para contestar todas las llamadas técnicas que surjan. Dos técnicos son asignados al tipo de producto 1, tres técnicos al tipo de producto 2 y tres técnicos al tipo de producto 3. Hay cuatro representantes de ventas para contestar las llamadas de ventas y las llamadas de estado de orden que eligen hablar con una persona real.

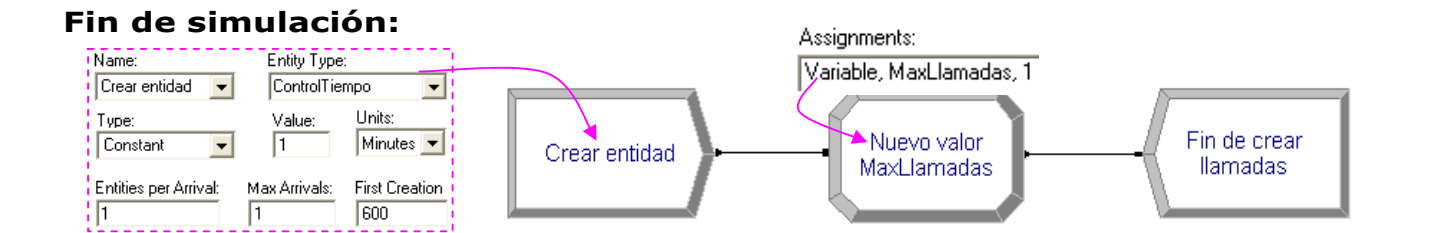
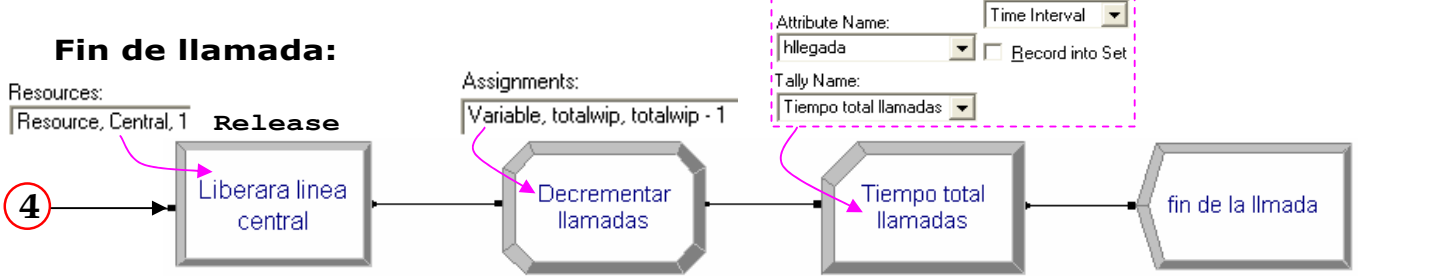
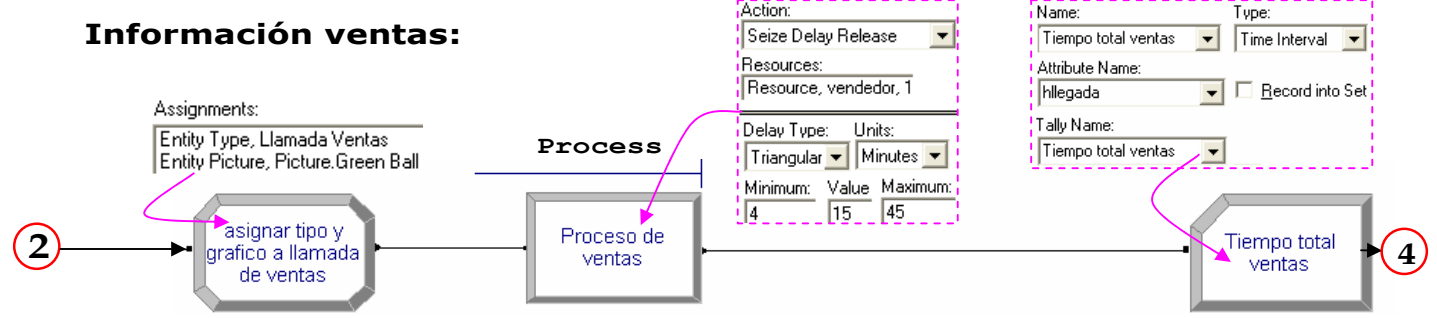
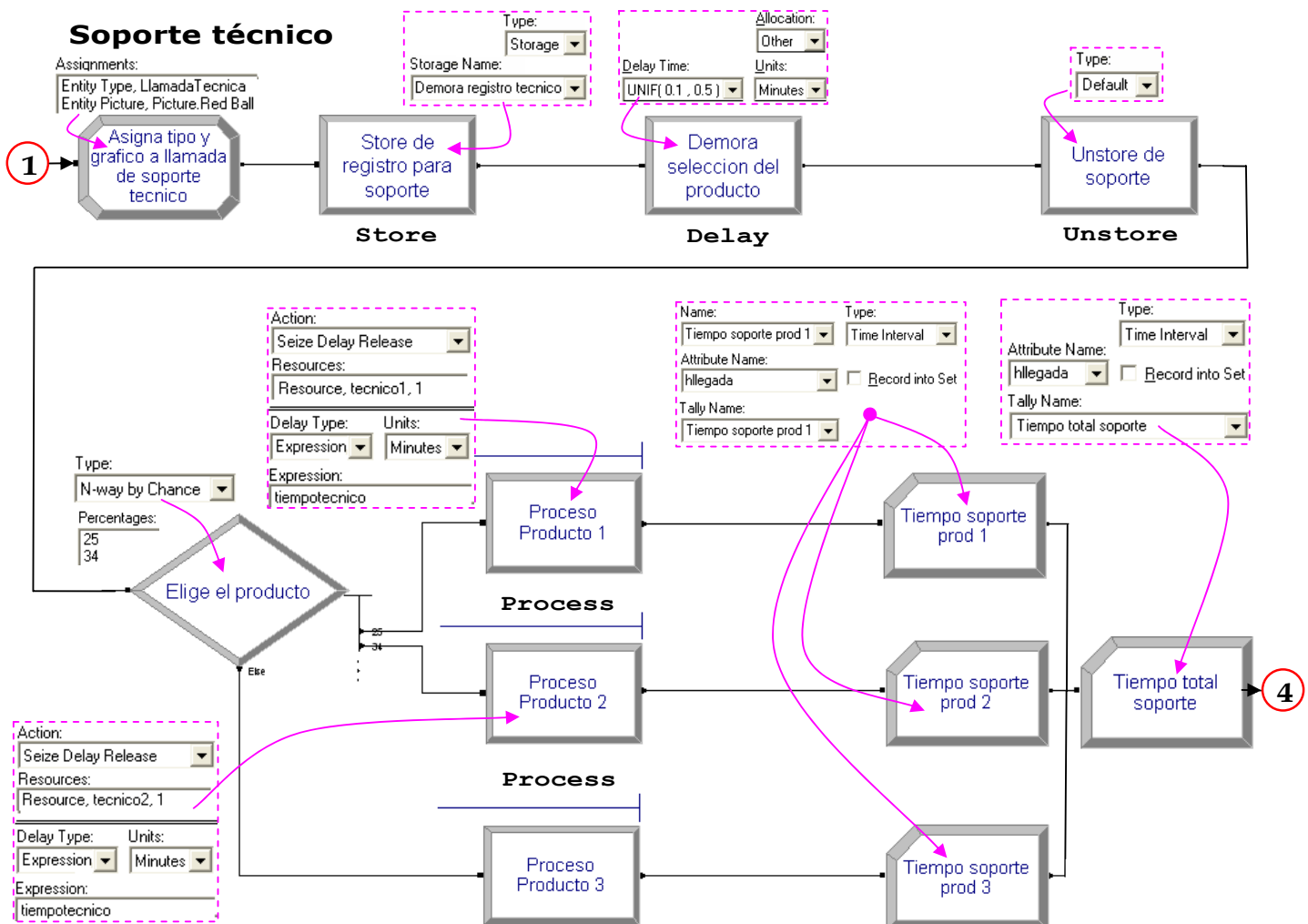
Como un punto de interés contaremos el número de llamadas de clientes que no han podido conseguir una línea central y han sido rechazadas para entrar al sistema. Evaluar los siguientes indicadores de desempeño: Porcentaje de clientes que no consiguieron línea, tiempo total en la línea por tipo de cliente, tiempo de espera por una persona real por tipo de cliente, número de llamadas esperando por servicio por tipo de cliente, utilización del personal.

<sup>14</sup> Enunciado tomado de KELTON, D.; SADOWSKI, R. y D. STURROCK. Op. cit. Adaptado para el examen parcial 2007-1.

### Solución







## Módulos de datos

Run Setup...

Replication Length: Infinite

Time Units: Hours

Hours Per Day: 24

Base Time Units: Minutes

Terminating Condition:

Entity	Name
1	Llamada
2	LlamadaTecnica
3	Llamada Ventas
4	Llamada Estado
5	ControlTiempo

Name	Type	Attribute Name	Shared
1 Toma una linea.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>
2 Proceso Producto 1.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>
3 Proceso Producto 2.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>
4 Proceso Producto 3.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>
5 Proceso de ventas.Queue	First In First Out	Lowest Attribute Value	<input checked="" type="checkbox"/>
		Prioridad	<input checked="" type="checkbox"/>

Resource	Name	Type	Capacity
1	Central	Fixed Capacity	26
2	tecnico1	Fixed Capacity	2
3	tecnico2	Fixed Capacity	3
4	tecnico3	Fixed Capacity	3
5	vendedor	Fixed Capacity	4

Variable	Name	Rows	Columns	Clear Option	Initial Values	Report Statistics
1	MaxLlamadas			System	1 rows	<input type="checkbox"/>
2	totalwip			System	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Expression	Name	Rows	Columns	Expression Values
1	Tiempotecnico			1 rows

Storage	Name
1	Demora registro inicial
2	Demora registro tecnico

Statistic	Name	Type	Expression	Report Label
1	Porcentaje llamadas rechazadas	Output	$100 * NC(Llamadas rechazadas) / NC(Llamadas totales)$	Porcentaje llamadas rechazadas

### Entity

VA Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
ControlTiempo	0.00	0.00	0.00
Llamada	0.00	0.00	0.00
Llamada Estado	0.00	0.00	0.00
Llamada Ventas	20.5794	7.5814	40.5603
LlamadaTecnica	8.9528	3.3754	17.3607

Wait Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
ControlTiempo	0.00	0.00	0.00
Llamada	0.00	0.00	0.00
Llamada Estado	2.5229	0.00	92.7024
Llamada Ventas	5.8328	0.00	33.2819
LlamadaTecnica	10.3607	0.00	55.4488

Other Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
ControlTiempo	0.00	0.00	0.00
Llamada	0.00	0.00	0.00
Llamada Estado	4.4393	2.4792	13.2443
Llamada Ventas	0.3304	0.1007	0.5964
LlamadaTecnica	0.6424	0.2179	1.0670

### Entity

Number In	Value
ControlTiempo	1.0000
Llamada	727.00
Llamada Estado	48.0000
Llamada Ventas	97.0000
LlamadaTecnica	494.00

Number Out	Value
ControlTiempo	1.0000
Llamada	727.00
Llamada Estado	48.0000
Llamada Ventas	97.0000
LlamadaTecnica	494.00

WIP	Average	Maximum Value
ControlTiempo	0.00	1.0000
Llamada	0.3364	4.0000
Llamada Estado	0.4883	3.0000
Llamada Ventas	3.9358	11.0000
LlamadaTecnica	14.8822	24.0000

### Queue

Waiting Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
Proceso de ventas.Queue	6.5417	0.00	92.7024
Proceso Producto 1.Queue	22.2692	0.00	55.4488
Proceso Producto 2.Queue	2.2504	0.00	11.2248
Proceso Producto 3.Queue	9.2893	0.00	42.1323
Toma una linea.Queue	0.00	0.00	0.00

Number Waiting	Average	Minimum Value	Maximum Value
Proceso de ventas.Queue	1.0552	0.00	8.0000
Proceso Producto 1.Queue	4.3447	0.00	15.0000
Proceso Producto 2.Queue	0.5497	0.00	5.0000
Proceso Producto 3.Queue	2.9683	0.00	15.0000
Toma una linea.Queue	0.00	0.00	0.00

### Resource

Instantaneous Utilization	Average	Minimum Value	Maximum Value
Central	0.7555	0.00	1.0000
tecnico1	0.8897	0.00	1.0000
tecnico2	0.7346	0.00	1.0000
tecnico3	0.9370	0.00	1.0000
vendedor	0.7854	0.00	1.0000

Number Busy	Average	Minimum Value	Maximum Value
Central	19.6427	0.00	26.0000
tecnico1	1.7795	0.00	2.0000
tecnico2	2.2038	0.00	3.0000
tecnico3	2.8109	0.00	3.0000
vendedor	3.1417	0.00	4.0000

### User Specified

Interval	Average	Minimum Value	Maximum Value
Tiempo estado con ventas	24.7946	7.1893	102.68
Tiempo estado sin ventas	3.3957	2.4792	4.1953
Tiempo soporte prod 1	32.0088	5.7367	71.4102
Tiempo soporte prod 2	11.9218	4.3064	22.1605
Tiempo soporte prod 3	18.7380	3.9936	55.8505
Tiempo total estado	6.9621	2.4792	102.68
Tiempo total llamadas	20.0100	2.4792	102.68
Tiempo total soporte	19.9559	3.9936	71.4102
Tiempo total ventas	26.7425	9.8721	52.2515

Count	Value
Llamadas rechazadas	88.0000
Llamadas totales	727.00

Output	Value	Variable	Average	Minimum Value	Maximum Value
Porcentaje llamadas rechazadas	12.1045	totalwip	19.6427	0.00	26.0000

INDICADORES

## 14. MODELO BÁSICO DE INVENTARIOS

Una manera muy simple de controlar inventarios en un sistema podría consistir en la utilización de variables globales. Podemos definir en el modelo, el valor inicial de la variable y durante la simulación cargar o descargar valores, de acuerdo a si se produce o si se atiende la demanda. Esta sería una manera muy simple pero no tan flexible o generosa en la generación de indicadores de desempeño.

El concepto utilizado para modelar inventarios es mediante el uso de recursos, es decir, se define el producto como un recurso y se le asigna una capacidad inicial, que se va incrementando de acuerdo con la producción. También se considera la demanda del producto, que se origina mediante el proceso Seize-Delay que realiza la entidad; el efecto que esta produce es la descarga del inventario, ya que la entidad "cliente" salió del sistema y nunca se produjo la liberación del recurso o Release.



En la figura se observa a los clientes (entidades) realizando compras. Debido a la demanda de productos (recursos), el sistema actualiza los niveles de inventario y controla los *stocks* para reordenar y lanzar la orden de pedido al proveedor, este realizará el envío de la mercadería y después de un tiempo (*Lead Time*) el pedido llegará al almacén.

### 14.1 Indicadores de desempeño

Entre los indicadores más frecuentes en el problema de inventarios se encuentran los siguientes:

- Inventario promedio del producto (disponibilidad promedio).
- Inventario final del producto.

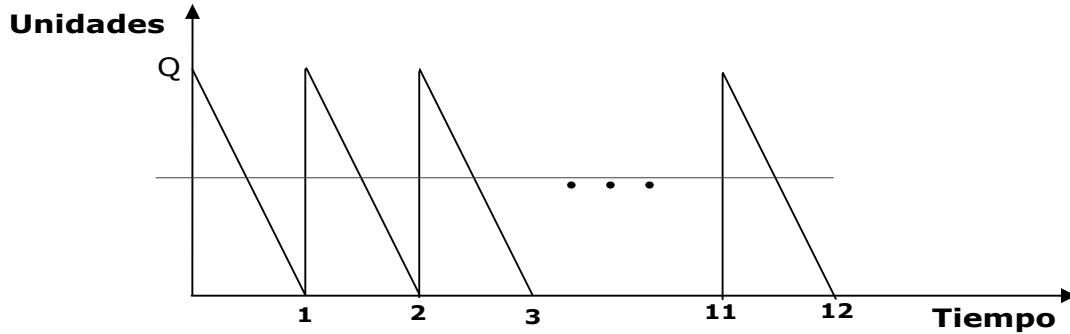
- Utilización promedio del producto.
- Intervalo entre pedidos.
- Promedio de unidades por pedido.
- Rotación del inventario.
- Número de unidades vendidas.
- Venta promedio del producto.
- Número de revisiones periódicas al inventario.
- Número de clientes perdidos por no haber *stock*.
- Intervalo entre pérdidas por no haber *stock*.

## 14.2 Variables de recursos

- MR(recurso)  
Retorna la capacidad actual del recurso. Ejemplo: MR(cajeros).  
Esta capacidad puede ser alterada. Los valores que toma esta variable son enteros.
- NR(recurso)  
Retorna el número de recursos ocupados. Ejemplo: NR(cajeros).  
La disponibilidad de recursos se obtiene mediante la expresión:  
$$MR(\text{cajeros}) - NR(\text{cajeros})$$
- ResUtil(recurso)  
Retorna la utilización del recurso; es decir, la relación  $MR(\text{recurso})/NR(\text{recurso})$   
Ejemplo: ResSeizes(cajeros)
- ResSeizes(recurso)  
Retorna el número de recursos que vienen siendo utilizados en ese momento.  
Ejemplo: ResSeizes(cajeros)
- ResourceState(número del recurso)  
Retorna el estado actual del recurso:
  - 1: Idle\_Res (ocioso), cuando todas las unidades del recurso están desocupadas y no se encuentra en estado Failed (falla) o en estado Inactive (inactivo).
  - 2: Busy\_Res (ocupado), cuando una o más unidades del recurso están ocupadas.
  - 3: Inactive\_Res (inactivo), cuando el recurso tiene capacidad cero y no está en estado Failed (falla).
  - 4: Failed\_Res (falla), cuando el recurso tiene una falla que imposibilita su utilización.

**Ejemplo:**

Se realiza el pedido al inicio de cada mes, por una cantidad Q (lote económico), que se va consumiendo durante el mes (véase esquema) hasta que se agota. Luego llega el siguiente pedido y el ciclo se repite durante el año. Simular (de manera analítica) la variación de los niveles de inventario y determinar el inventario promedio durante los 12 meses.



**Solución analítica:**

Sea:

Q(t): Función que indica la cantidad de unidades disponibles en el instante t.

T(n): Tiempo total de simulación.

t<sub>i</sub>: Cantidad de tiempo con i unidades en almacén.

P<sub>i</sub>: Proporción de tiempo en el que se dispone de i unidades en almacén

$$p_i = \frac{t_i}{T(n)}$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=0}^{\infty} i * p_i = q(n)$$

Inventario promedio durante el año:

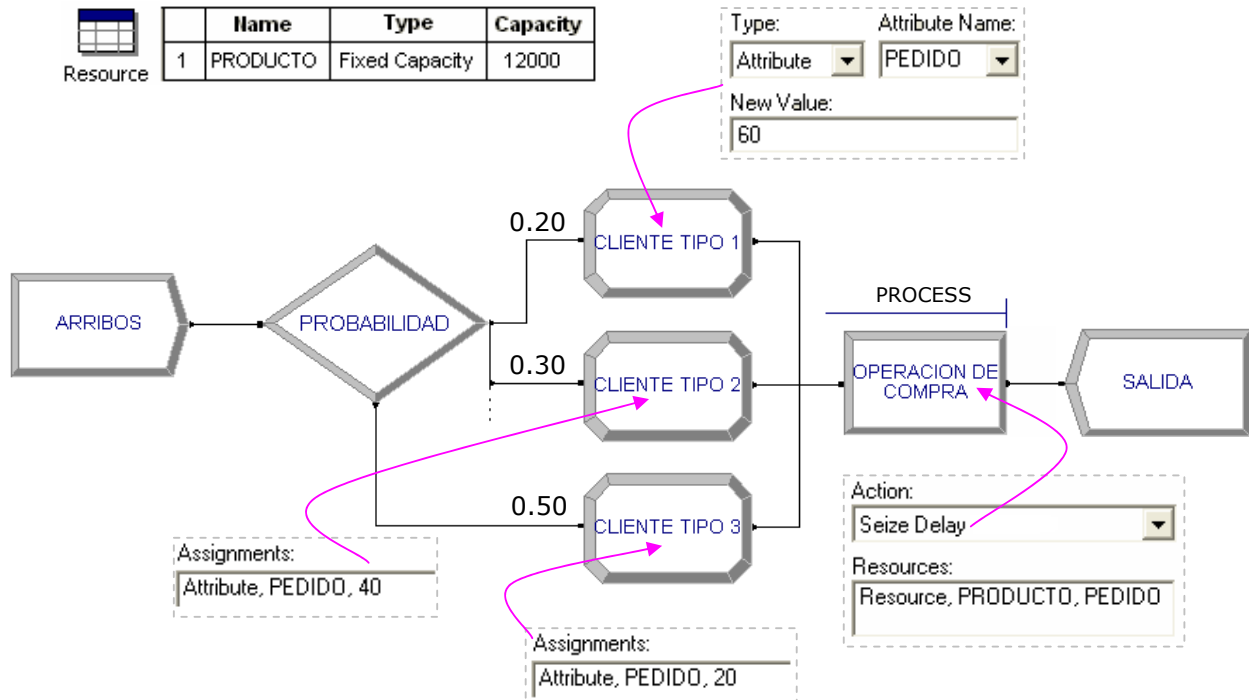
$$\hat{q}(n) = \sum_{i=1}^{12} \frac{i * t_i / 2}{T(n)}$$

$$\hat{q}(n) = \frac{\frac{Q \text{ unid.} * 1 \text{ mes}}{2}}{12 \text{ meses}} * 12 \text{ Triángulos} = Q/2 \text{ unid.}$$

El inventario promedio se obtiene del promedio ponderado de las áreas que se forman en la gráfica. El número promedio de unidades disponibles durante el año fue de Q/2.

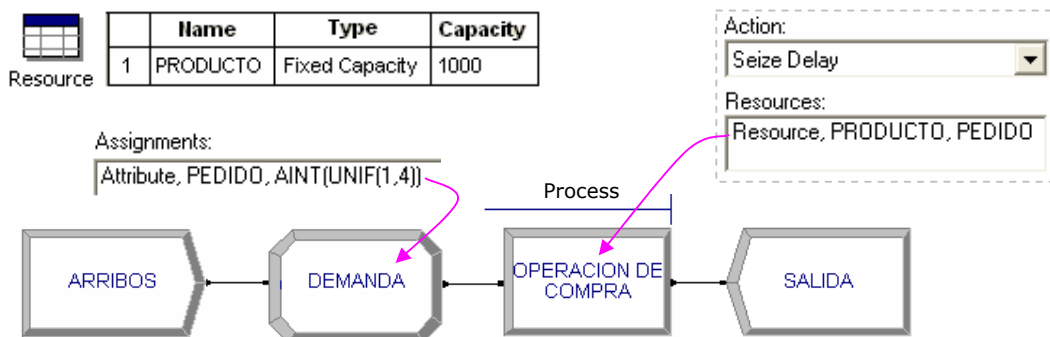
**Ejemplo:**

Suponga un sistema en el que los clientes llegan para realizar compras de un producto. La cantidad que se comprará es variable y corresponde a una estimación probabilística. Hay suficiente *stock* de productos como para satisfacer la demanda del día.



**Ejemplo:**

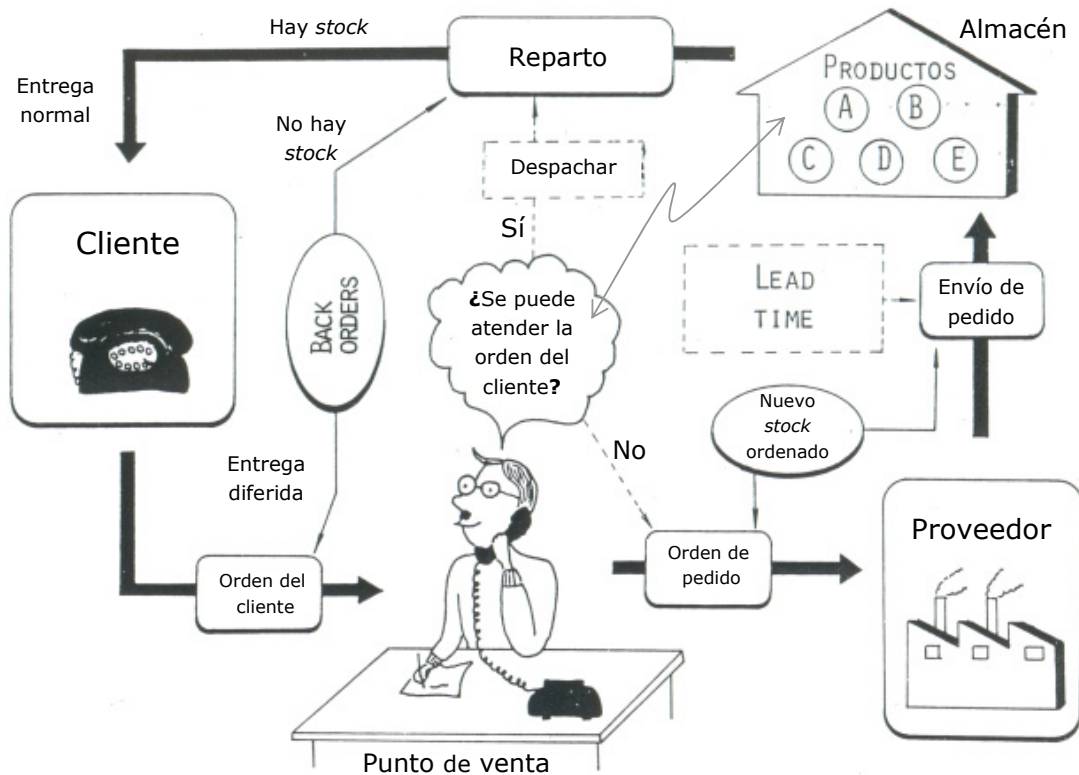
Suponga un sistema en el que los clientes llegan para realizar compras de un producto. La cantidad que se comprará es variable y se ajusta a una distribución uniforme entre 1 y 3 unidades.



**Nota:** La expresión UNIF(1, 4) es una distribución uniforme continua y genera números reales, con intervalo abierto en el extremo derecho, tal que:  $1.0 \leq X < 4.0$ . Al anteponer la función AINT, se trunca la parte decimal de dicho número real, quedando este como un valor entero, tal que:  $1 \leq X < 4$ ; es decir, la variable toma valores enteros entre 1 y 3.

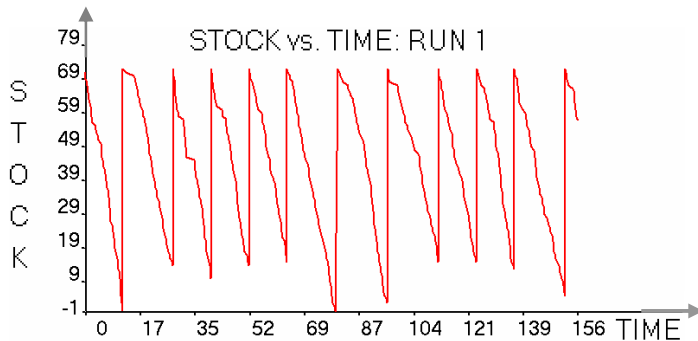
### 14.3 Sistema de control de inventarios y venta con entrega diferida

Suponga una empresa distribuidora de computadoras y accesorios. Los clientes realizan su pedido por teléfono, si hay suficiente *stock* para atender la orden del cliente se realiza el despacho inmediatamente y se envía el pedido. Si no hay suficiente *stock* para atender la orden, se le envía todo el *stock* existente y el resto se convierte en una entrega diferida (Back Order). Cuando un nuevo *stock* es recibido en el almacén, primero se despachan las órdenes que fueron diferidas y el resto permanece en el almacén como inventario. Se ordenará a la fábrica (proveedores) un nuevo *stock* cuando el inventario alcance o descienda al punto de reorden, fijado por la empresa. Si esto sucede, se lanza la orden al proveedor y la mercadería llegará después de algún tiempo (Lead Time).



En los modelos de sistemas con entregas diferidas o Back Orders podemos medir algunos indicadores como:

- Máximo tiempo de espera por la entrega del producto.
- Cantidad máxima de clientes que aguardan por su pedido.
- Máximo número de entregas diferidas o Back Orders.



En la gráfica se puede observar el comportamiento de la demanda en el tiempo, así como el abastecimiento al almacén. Se observan también algunas situaciones en las que el *stock* alcanza valores negativos, debido a la política de realizar entregas diferidas o Back Orders.

## 19

## Caso de estudio

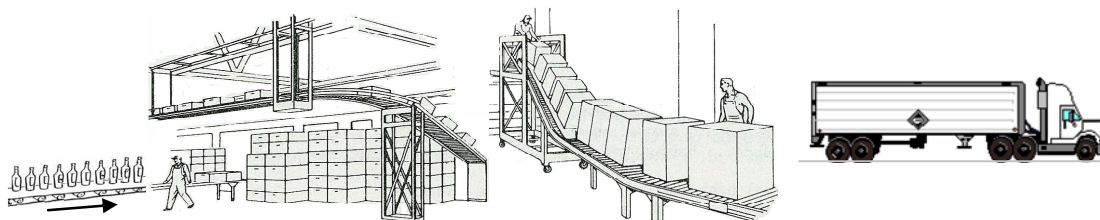
**Control de almacenes y distribución de cajas de aceite**

## Objetivos:

- o Modelado de sistemas de control de inventarios
- o Módulo de datos SCHEDULE para programar arribos de entidades durante un intervalo de tiempo de acuerdo con una tasa (entidades por hora)
- o Variables de recursos: MR y NR
- o Módulo de Datos EXPRESSION, para el manejo externo de datos.

Una industria productora de aceite de palma se encuentra ubicada en el oriente de nuestro país. Su planta consta de cuatro áreas definidas: producción, envasado, embalaje y almacenes. Se desea investigar el proceso de embalaje, el control de los inventarios y el control de la carga y la partida de los camiones para la distribución.

La línea de envasado envía las botellas a la zona de embalaje a una velocidad de 3.600 botellas por hora; en la zona de embalaje se acomodan 12 unidades en una caja de cartón, esto se realiza en forma automática pero con supervisión. Se puede decir que la generación de cajas es un proceso continuo que incrementa el inventario en los almacenes. La planta trabaja 8 horas por turno y tres turnos diarios; por motivos técnicos, 30 minutos antes del cambio de turno la sección de envasado detiene la línea, entonces la sección de embalaje también se detiene al no llegarle botellas.



En el almacén hay un inventario inicial de 100 *cajas*. En una puerta del almacén se encuentra una rampa en la que se ubica un camión para que sea cargado; existe una cola de camiones en espera por su turno, la capacidad de estos es variable y se ajusta a una distribución UNIF(800,1000) cajas. El tiempo que se requiere para cargar y acomodar una caja en el camión es de 0.25 minutos. Todos los camiones deben ser atendidos, pero en caso de que no se disponga de la cantidad suficiente, se irán ingresando las cajas disponibles en el momento, hasta completar su capacidad. Considere que el tiempo promedio que espera un camión para tener su pedido completo se ajusta a una distribución UNIF(25,35) minutos; este tiempo debe considerarse aparte del tiempo de carga. Cada vez que se termina de atender un camión el inventario del almacén se actualiza, descontando la cantidad despachada.

Formular un modelo adecuado a la situación descrita y simular el funcionamiento durante 24 horas continuas. Obtener los siguientes indicadores de desempeño:

1. Número de botellas que ingresaron a embalaje y la producción total de cajas, número de camiones atendidos y carga promedio por camión.
2. Inventario final de cajas.
3. Número de cajas vendidas.
4. Inventario promedio de cajas en el almacén.
5. Utilización promedio del producto.
6. Venta promedio de cajas.



### Solución

Resource

	Name	Type	Capacity
1	CAJAS	Fixed Capacity	100

Expression

	Name	Rows	Columns	Expression Values	
1	CARGA			1 rows	UNIF(800,1000)
2	TIEMPO DE CARGA			1 rows	0.25*CARGA - UNIF(25,35)

Schedule

	Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1	TASA DE LLEGADA	Duration	Arrival	Hours	1.0	1 rows

Botón Derecho

- Insert Row
- Delete Row
- Build Expression...
- Edit via Dialog...
- Edit via Spreadsheet...
- Properties...

3.600 botellas/hora  
(durante 7.5 horas) →

0 botellas/hora  
(durante 0.5 horas) →

**Schedule** [?] [X]

Name: TASA DE LLEGADA    Format Type: Duration

Type: Arrival

Time Units: Hours    Scale Factor: 1.0

Durations:

- 3600, 7.5
- 0, 0.5
- 3600, 7.5
- 0, 0.5
- 3600, 7.5
- 0, 0.5
- <End of list>

Run    Setup...

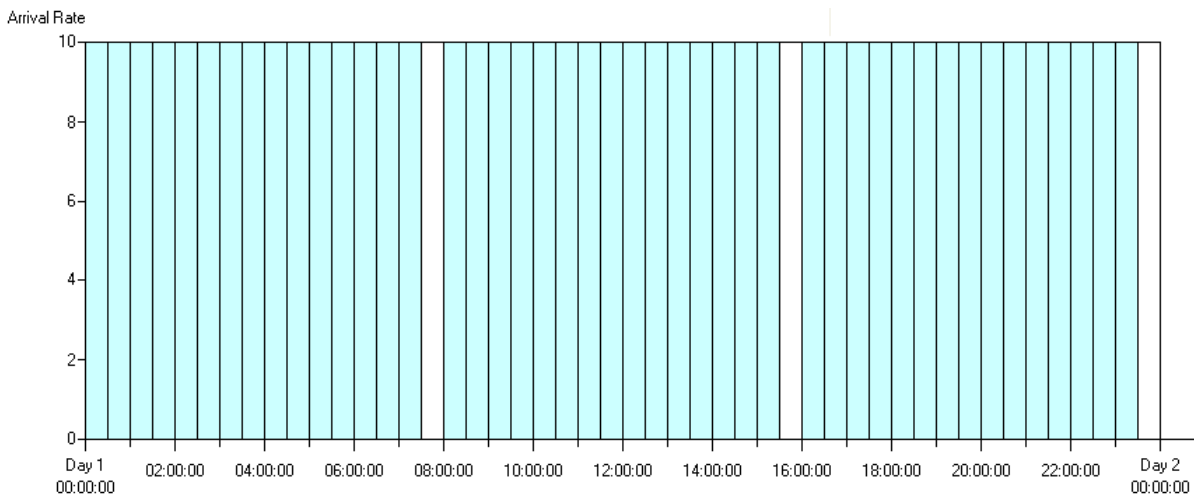
Number of Replications: 1

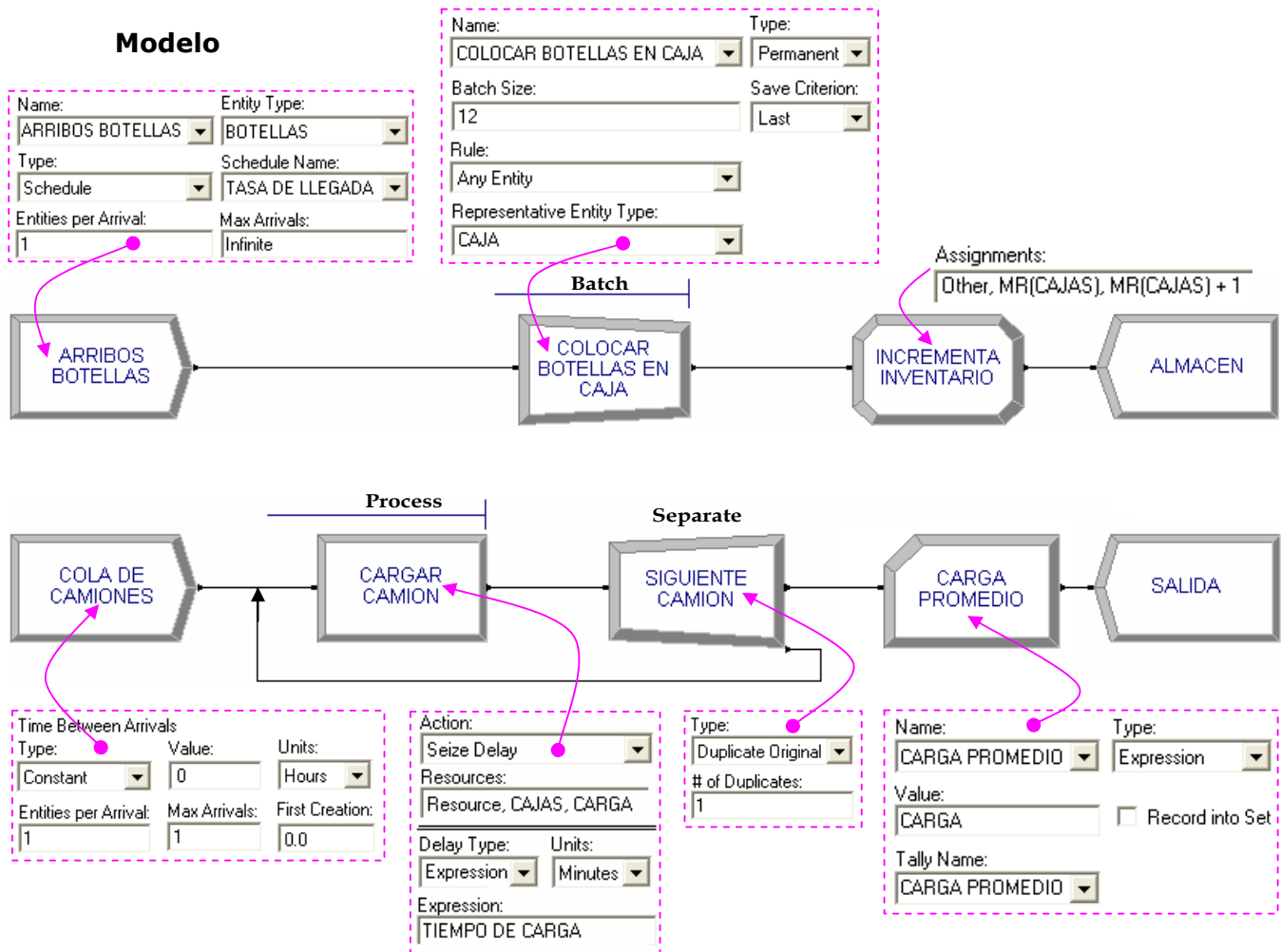
Warm-up Period: 0.0    Time Units: Hours

Replication Length: 24    Time Units: Hours

Hours Per Day: 24    Base Time Units: Hours

Terminating Condition:





**Indicadores:**

1. Número de botellas que ingresaron al embalaje y la producción total de cajas, número de camiones atendidos y carga promedio por camión.

Entity	
Number Out	Value
BOTELLAS	82452.00
CAJA	6871.00
CAMION	6.0000

User Specified			
Tally	Average	Minimum Value	Maximum Value
CARGA PROMEDIO	913.72	830.20	972.22

2. ¿Cómo quedó el stock, al final de la simulación?: **911.59 cajas.**



Name	Type	Expression
STOCK AL FINAL	Output	MR(RADIOS) - NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Scheduled - Current Number Busy

3. Se vendieron **6.059.41 cajas** (véase en el reporte: **Resource**/Total Number Seized)

*Alternativas:*



Name	Type	Expression
VENTA TOTAL	Output	NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Busy



Name	Type	Expression
VENTA TOTAL	Output	ResSeizes(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Total Number Seized

4. Inventario promedio o disponibilidad promedio del producto: **688.78 cajas**.



Name	Type	Expression
INVENTARIO PROMEDIO	Time-Persistent	MR(RADIOS) - NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Scheduled - Current Number Busy

5. Utilización promedio: **70.61%** (véase reporte: **Resource**/Instantaneous Utilization).

*Alternativas:*



Name	Type	Expression
UTILIZACION PROMEDIO	Time-Persistent	NR(RADIOS) / MR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/ Current Number Busy ÷ Current Number Scheduled



Name	Type	Expression
UTILIZACION PROMEDIO	Time-Persistent	ResUtil(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Utilization

6. Venta promedio: **2.837.85 cajas** (véase reporte: **Resource** / Number Busy).

*Alternativas:*



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Time-Persistent	NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/ Current Number Busy



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Time-Persistent	ResSeizes(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Total Number Seized



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Output	DAVG(RADIOS.NumberBusy)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Average Number Busy



## Caso de estudio

**Examen de "Simula"**

## Objetivos:

- o Recursos reutilizables con capacidades variables en el tiempo.
- o Módulo de datos Resource. Uso de la variable MR (Resource).

Con el propósito de investigar mejorar los procesos administrativos, en lo referente a la actividad de cuidado de los exámenes que realizan los profesores, se planea modelar y simular la secuencia de actividades involucradas en este proceso. Existe interés en observar y analizar los posibles problemas que podrían presentarse en los exámenes que se rinden en aulas no convencionales como los laboratorios en los que se emplean máquinas y/o equipos.

Para el estudio se ha tomado como muestra la sección 811 de la asignatura Simulación de Sistemas que tiene 34 alumnos matriculados. El examen parcial está programado para las 18 horas en el aula W-44, que dispone de 34 computadoras, justo para el número de estudiantes matriculados. El día del examen los alumnos comenzarán a llegar a la universidad desde cuatro horas antes de su evaluación, con un tiempo entre arribos que se ajusta a una distribución exponencial con una media de 5 minutos. Los estudiantes que llegan a la universidad antes de las 16 horas se dirigen a las salas de estudio de la biblioteca o a la cafetería, con el propósito de repasar antes del examen y permanecer por un tiempo uniforme entre 1.5 y 2 horas. En cambio, los estudiantes que llegan después, pero antes de las 17 horas solo permanecen entre 0.5 y 1.5 horas. Posteriormente, se dirigirán al aula asignada o se ubicarán cerca del edificio que es un punto de encuentro. Los estudiantes que llegan a partir de las 17 horas se dirigen directamente al edificio.

Faltando 15 minutos para el inicio del examen, llegará al aula el profesor encargado y tardará a lo más 15 minutos en tomar lista, controlar el ingreso, acomodar y leer las instrucciones a los alumnos. A las 18 horas se dará la orden de inicio de la evaluación con los alumnos que hayan llegado; el examen tiene una duración de 100 minutos sin embargo los alumnos tardan en resolverlo un tiempo que se ajusta a una distribución UNIF [90,101) minutos. Según vayan terminando el examen, en forma ordenada los estudiantes se van retirando del aula, la cual deberá quedar vacía.

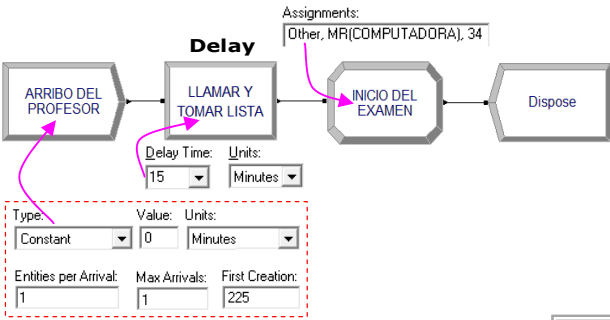
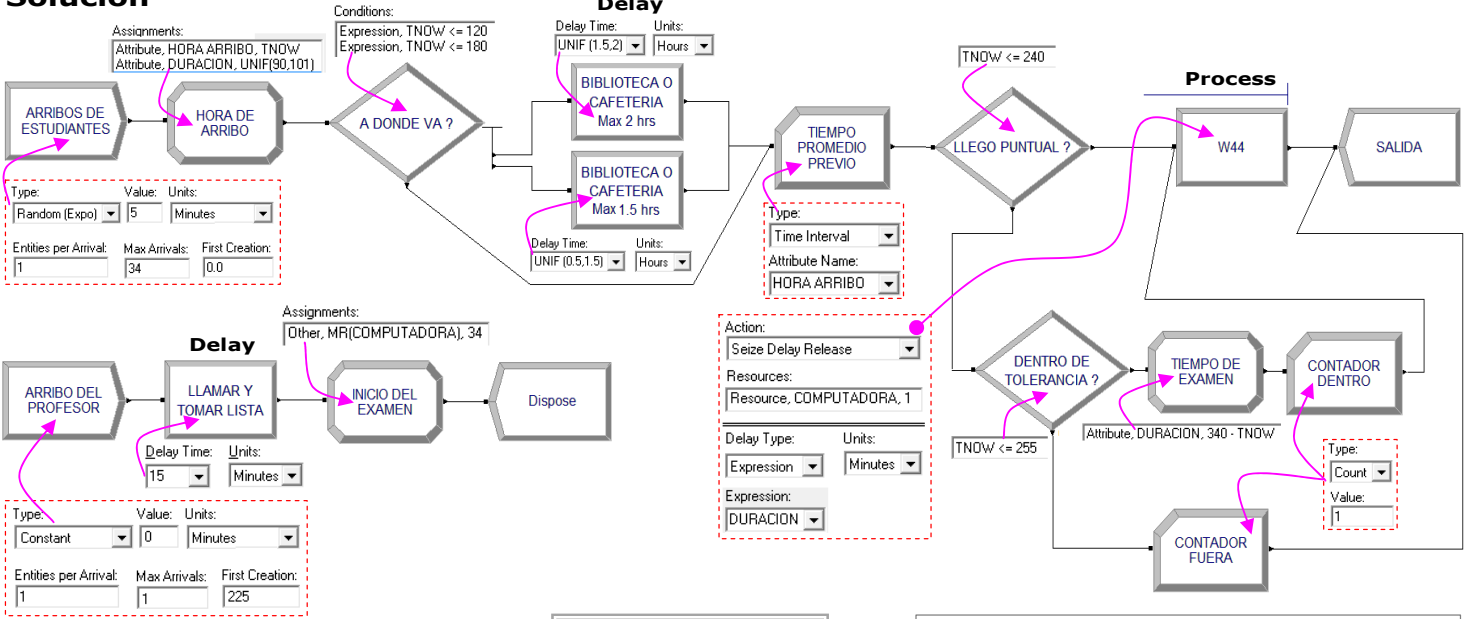
1. Se desea formular un modelo de simulación para la situación descrita.
2. Simular el sistema y determinar el tiempo promedio con el que los estudiantes llegan a la universidad por anticipado, antes de rendir su examen.
3. ¿Cuántos alumnos llegaron tarde dentro de la tolerancia de 15 minutos?
4. ¿Cuántos estudiantes fueron impedidos de rendir examen por exceder la tolerancia?

**Escenario**

Se desea incluir en el modelo la probabilidad de falla de una computadora, que ocurrirá una sola vez en el lapso del examen, con distribución uniforme. En ese caso, el profesor deberá solicitar de inmediato el soporte técnico y anotar en el parte de incidencias la hora en que el alumno comunicó el hecho y la hora en que se resolvió el problema. El incidente tarda una EXPO (5) minutos e incluye la reparación. Al terminar el examen, el profesor deberá dar el tiempo adicional que corresponde al estudiante perjudicado. La interrogante es si existirá conflicto con el inicio del próximo examen: 20 horas.

5. Realice los cambios al modelo y simúlelo considerando además, el tiempo adicional.
6. Determine la hora en que se produjo la falla y el tiempo adicional otorgado al alumno.

**Solución**



Name	Type	Capacity
1 COMPUTADORA	Fixed Capacity	0

Run Setup...

Number of Replications: 1

Warm-up Period: 0.0 Time Units: Hours

Replication Length: Infinite Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

Terminating Condition:

**User Specified**

**Tally**

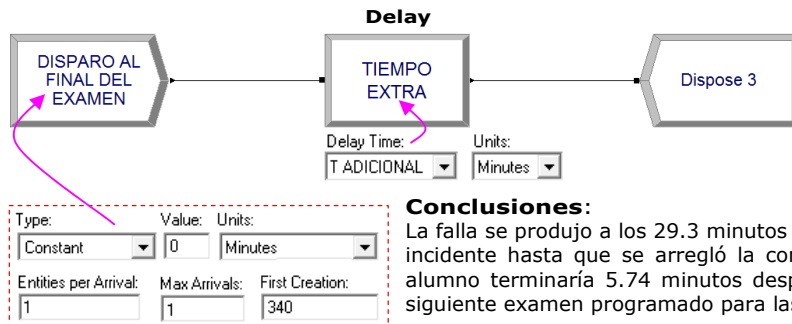
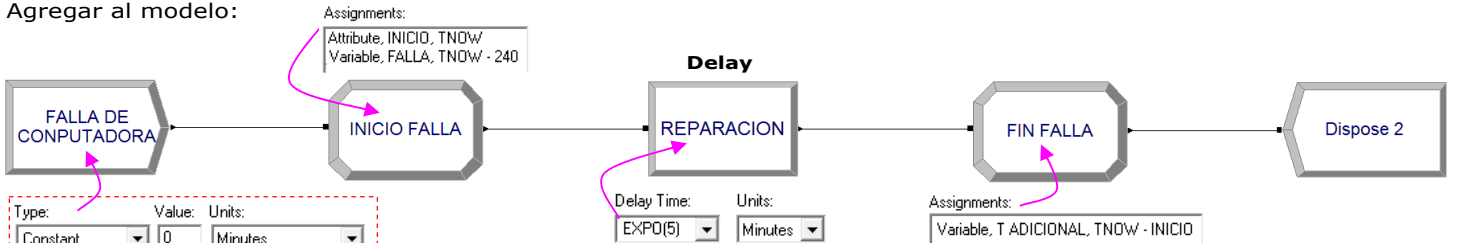
Interval	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO PROMEDIO PREVIO	73.9121	0.00	119.25

**Counter**

Count	Value
CONTADOR DENTRO	1.0000
CONTADOR FUERA	0.00

**Escenario**

Agregar al modelo:



**User Specified**

**Time Persistent**

Variable	Average	Minimum Value	Maximum Value
FALLA	7.7185	0.00	29.2595
T ADICIONAL	4.9784	0.00	25.7392

**Conclusiones:**

La falla se produjo a los 29.3 minutos del inicio del examen. El tiempo desde que el alumno reportó el incidente hasta que se arregló la computadora fue de 25.7 minutos, con este tiempo adicional el alumno terminaría 5.74 minutos después de las 8 pm, por lo que habrá conflicto con el inicio del siguiente examen programado para las ocho de la noche.



Caso de estudio

**Sistema rápido de transporte en corredor segregado**

Objetivos:

- o Recursos reutilizables con capacidades variables en el tiempo.
- o Estado transitorio de la simulación.
- o Módulo de datos Resource. Uso de la variable MR (Resource).

Se desea simular el funcionamiento de un sistema de autobuses de tránsito rápido a través de un corredor segregado de alta capacidad, que de norte a sur comprende 16 distritos limeños: desde Independencia hasta Chorrillos. Estudios del mercado alientan la posibilidad de diversificar la oferta y añadir un servicio "Super Expreso" puntual y seguro, que cubra la misma ruta pero con paradas en tan sólo dos estaciones intermedias.

Inicialmente se desea experimentar el desplazamiento de un solo autobús de norte a sur (de Independencia a Chorrillos), simulando los tiempos de viaje y verificando la hora exacta de partida del autobús en los paraderos. A continuación se muestra la información técnica del caso:

	<b>Itinerario del Autobús</b>		
	Independencia	San Isidro	Miraflores
<b>Hora de Partida</b>	7:00 a.m.	7:30 a.m.	7:45 a.m.

<b>Paradero</b>	<b>Tiempos de Ruta (minutos)</b>			
	Independencia	San Isidro	Miraflores	Chorrillos
Independencia	--	UNIF(24,29)		
San Isidro		--	UNIF(10,12)	
Miraflores			--	UNIF(17,20)

Considere que el autobús debe permanecer en espera de pasajeros en el paradero desde su llegada hasta la hora programada de su partida.

Formule un modelo de simulación adecuado a la situación descrita y simule la trayectoria del autobús de inicio a fin de la vía (Independencia → Chorrillos).

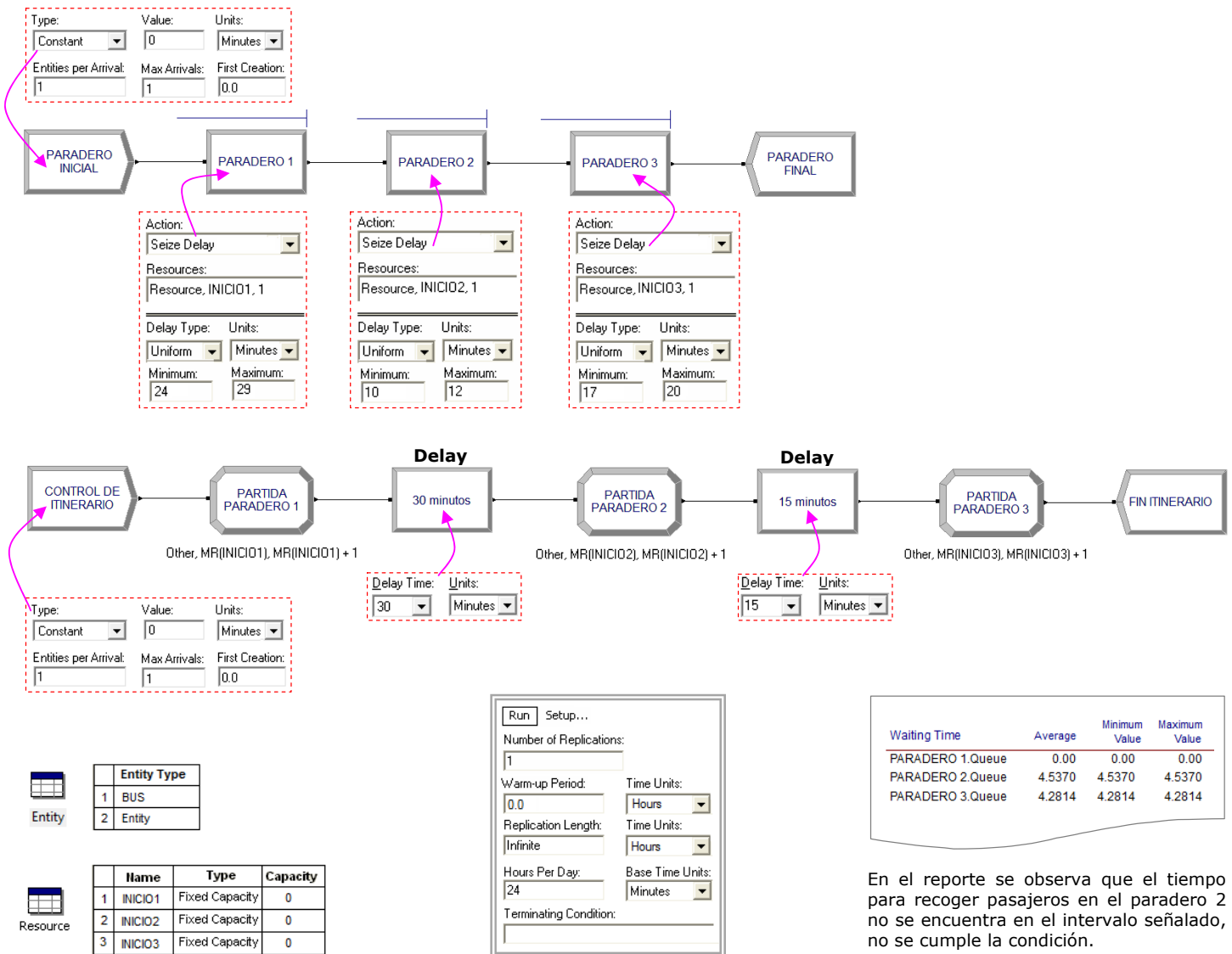
1. Suponga que se considera un tiempo promedio adecuado, para recoger pasajeros en un paradero, que esté en el intervalo: [3.5, 4.5] minutos. ¿Se cumple esa premisa?

**Escenario**

Suponga que los autobuses parten cada 15 minutos del paradero inicial de Independencia, en forma constante, uno a la vez. Considere que el último bus partirá a las 12 de la noche y deberá completar su recorrido

2. Agregue los cambios al modelo original y simúlelo de 7:00 am a 12:00 a.m.
3. Determine el tiempo promedio de viaje para los pasajeros que van desde el paradero inicial hasta el paradero final.

### Solución

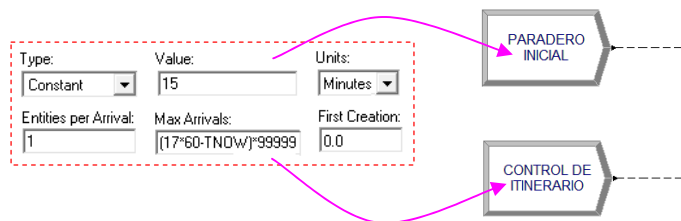


En el reporte se observa que el tiempo para recoger pasajeros en el paradero 2 no se encuentra en el intervalo señalado, no se cumple la condición.

### Escenario

Modificar los módulos "Create":

El Tiempo promedio por viaje fue de 63.56 minutos.



Entity			
VA Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
BUS	56.3014	51.9536	59.7243
Wait Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
BUS	7.2638	4.4286	10.2917
Total Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
BUS	63.5651	62.0093	64.9960
Entity	45.0000	45.0000	45.0000



Final de capítulo

## Casos propuestos

### Caso 1: Confección de casacas para universitarios

Una empresa textil produce dos tipos de casacas: un diseño para damas y el otro para caballeros. El mercado potencial está representado por jóvenes universitarios; solo hay talla única.

El departamento de producción envía las casacas confeccionadas al área de empaque, en intervalos de tiempo, de acuerdo con una EXPO(2) minutos. De estos envíos, el 60% de las casacas son para damas y el 40% para caballeros.

#### Operación empaque

Cada casaca que llega al área de empaque debe ser doblada, embolsada y colocada en una caja con capacidad variable. Las casacas para damas se colocan en cajas de una docena; las casacas para caballeros en cajas de media docena.

Empacar cada casaca de damas demora un tiempo NORM(5,2) minutos y es realizada indistintamente por 2 operarios que se dedican en forma exclusiva a este tipo de prenda. El empaque de cada casaca para caballeros tarda un tiempo EXPO(3) minutos y es realizada por cualquiera de los 3 operarios disponibles exclusivamente para dicha prenda.

#### Operación etiquetado

Procedentes del área de empaque, las cajas van llegando al área de etiquetado. Aquí laboran 2 operarios que emplean tiempos similares para colocar las etiquetas en las cajas. Etiquetar una caja con casacas para damas tarda un tiempo UNIF(10,15) minutos. El tiempo de etiquetado en una caja de casacas para caballeros corresponde a una EXPO(12) minutos. Posteriormente, cada caja es despachada al departamento de ventas.

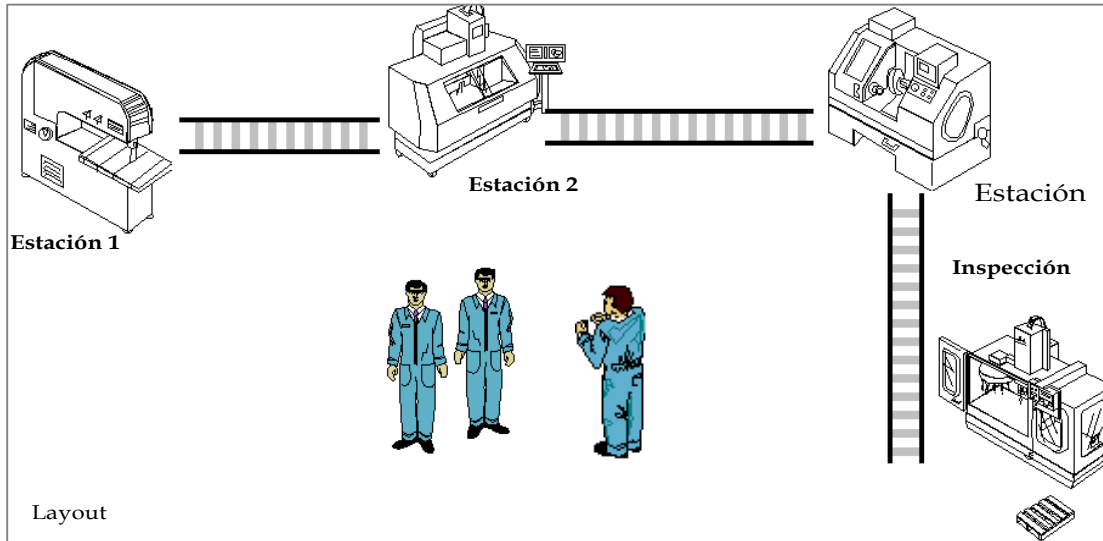
Se pide:

- Simular 6 días continuos y 20 réplicas. Considerar un turno de trabajo de 8 horas/día.
- Obtener estadísticas sobre:
  1. El tiempo de ciclo por cada tipo de caja y el tiempo de ciclo general.
  2. El número de casacas para damas y caballeros que se despacharon al departamento de ventas.
- El número total de cajas enviadas al departamento de ventas.



### Caso 2: Asignación de recursos a las actividades

En una empresa metalmecánica se fabrican piezas de acero, para ello requieren operaciones de maquinado en tres estaciones de trabajo (estación 1, estación 2, estación 3) y una operación de inspección. Para realizar todas estas operaciones la empresa cuenta con 2 maestros y 1 ayudante en toda la planta.



El tiempo entre llegadas se distribuye exponencialmente con media de 1 minuto. Considerar que se forman colas frente a cada estación de trabajo y a la inspección.

En la inspección ocurre una probabilidad de aceptación del 90%. Se cuenta, además, con la siguiente información sobre tiempos, expresados en minutos:

	Tiempo de proceso	Recursos a utilizar
<b>Estación 1</b>	Normal(0.70, 0.20)	1 maestro
<b>Estación 2</b>	Normal(0.75, 0.25)	1 maestro
<b>Estación 3</b>	Normal(0.80, 0.15)	1 maestro y 1 ayudante
<b>Inspección</b>	Normal(0.20, 0.05)	1 maestro

#### Escenario 1:

Simular el sistema descrito por un tiempo de 8 horas y 20 réplicas. Determinar el promedio de piezas defectuosas y el intervalo, con un nivel de confianza del 95%.

#### Escenario 2:

Suponga que en el ayudante ha ganado experiencia, de tal forma que en la Estación 3, el proceso puede ser ejecutado por un maestro o por un ayudante (el maestro tiene prioridad sobre el ayudante).

Se pide:

Realizar una comparación estadística entre ambos escenarios, en cuanto al promedio de piezas defectuosas.

### Caso 3: Producción de maletas en tres tipos de material

Una empresa se dedica a la fabricación de maletas. Posee un solo diseño y tres tipos de presentación, según el material que se utilice. Cada EXPO(12) minutos llega a la planta un kit de componentes para producir una maleta. El 45% de los kits que llegan son del tipo 1 (contienen el material 1), un 35% son del tipo 2 y un 20% del tipo 3.

Cada kit que llega a la planta pasa por una operación previa de inspección, para verificar que los componentes estén completos. Esta operación dura una UNIF(3, 8) minutos, y la realiza un solo operario. Se estima un 0.5% de kits incompletos que serán devueltos al almacén.

La secuencia de operaciones que debe seguir un kit depende del tipo de material que contenga. Así, tenemos que:

- Kit tipo 1: Secuencia de operaciones 1 → 2 → 3
- Kit tipo 2: Secuencia de operaciones 1 → 3
- Kit tipo 3: Secuencia de operaciones 2 → 3

Cada operación es ejecutada por un solo operario. La disponibilidad de operarios y los tiempos de cada operación se muestran en la siguiente tabla:

Operación	Número de operarios	Tiempo (minutos)
1	2	Unif(2, 6)
2	3	Unif(6, 10)
3	2	Unif(8, 19)

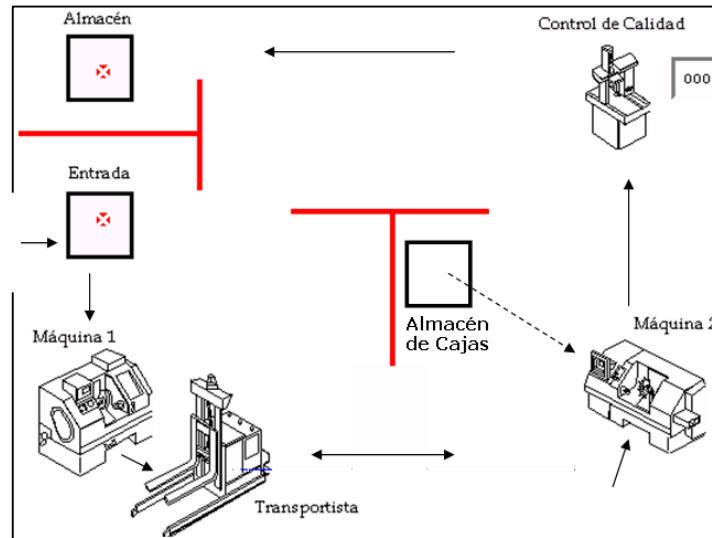
Luego de la operación 3, las maletas se van colgando en estructuras de madera rodantes, con capacidad para 6 unidades. Cuando estas se completan son llevadas hacia una cola, antes del control de calidad. La duración de este control es una UNIF(5, 10) minutos por cada maleta contenida en la estructura (el control se ejecuta en la misma estructura), y lo hace un solo operario.

Una vez que se inspecciona el contenido de cada estructura las maletas son descolgadas y llevadas al almacén de productos terminados.

1. Formular el modelo y simular el sistema durante 2000 minutos.
2. Determinar los tiempos de ciclo por cada tipo de maleta y los tiempos promedio de espera por cada operación.
3. Respecto del modelo inicial, suponga que si en algún momento la cola de inspección final llega a 6 estructuras, entonces el 50% se llevará a otra estación de inspección con un tiempo de servicio similar.
4. Suponga que cada vez que la cola de inspección previa llega a 5 kits, la media entre llegadas pasa de 12 a 15 *minutos*. Realizar los cambios en el modelo.

### Caso 4: Evaluación de escenarios

El siguiente esquema representa el proceso de producción de un producto:



El proceso comienza cuando la pieza llega a la entrada en lotes de 5 unidades y con una frecuencia de comportamiento exponencial, con una media de 45 minutos. Seguidamente estas pasan una a una a la máquina 1, donde se realiza una operación cuya duración se ajusta a una distribución normal con media 3 y una desviación de 0.1 minutos. Terminada esta, la pieza es llevada hasta la máquina 2 por medio de un único dispositivo (transportista) debido a que sale a temperaturas que no permiten que sea trasladada de otra forma. La distancia que el transportista recorre le toma 1 minuto.

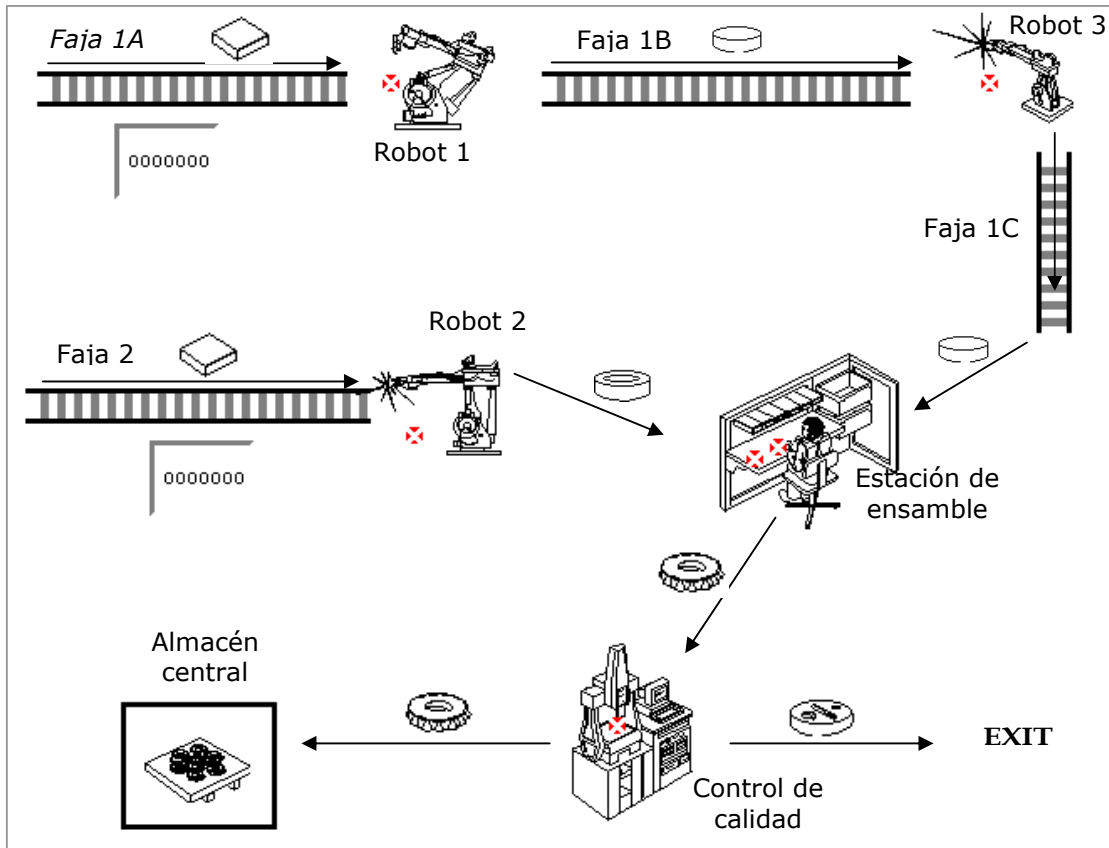
La duración de la operación en la máquina 2 corresponde a una distribución uniforme entre 4 y 6 minutos. Esta operación incluye la colocación de la pieza en una caja. Las cajas llegan de 10 en 10 cada hora al almacén de cajas (la línea discontinua en el esquema representa el paso de las cajas de empaque hacia la máquina 2). Al finalizar esta tarea, la pieza ya se convirtió en producto terminado y, dentro de su caja, se envía a la inspección de calidad. La inspección dura 3 minutos y no se efectúa sobre el total de las cajas terminadas; de acuerdo con el plan de muestreo, se sabe que la probabilidad de que una pieza sea inspeccionada es del 60%. Las estadísticas históricas revelan que el 90% de los productos que ingresan al control se aceptan, el resto se rechaza. Los productos aceptados en el control se sellan y pasan al almacén para su posterior distribución, mientras que los rechazados salen de la planta hacia una línea distinta de reproceso.

La capacidad de operación de las máquinas y del control de calidad es de una unidad a la vez, y en el caso de la entrada y la zona de cajas puede tenerse hasta 10 unidades como máximo. Se pide:

1. Formular y ejecutar el modelo por 15 horas y determinar la tasa de producción de la línea.
2. Para las condiciones dadas en el problema y para el tiempo de simulación establecido, ¿cuántos productos se rechazaron?

### Caso 5: Sistema de producción semiautomatizado

Se tiene un sistema de producción semiautomatizado, compuesto por las siguientes locaciones y entidades:



#### Proceso

Se requiere modelar un sistema para la producción de un tipo de engranaje de uso industrial. El gráfico anterior nos da una visión más clara de la situación planteada.

El proceso comienza cuando los bloques de acero llegan a las fajas 1A y 2, en lotes de 10 unidades, cada 30 minutos. Luego, los bloques llegan a los robots 1 y 2, donde se realizan operaciones que tienen una duración que se ajusta a la distribución de probabilidad exponencial con una media de 8 y 15 minutos, respectivamente, en cada robot.





Del robot 1 sale la pieza 1, que viaja por la faja 1B hasta el robot 3, donde se realiza una operación que tiene una duración de comportamiento exponencial con una media de 2 minutos. Luego, esta misma pieza es trasladada por la faja 1C con dirección a la estación de ensamble, pero no podrá pasar hasta que en la estación ya se disponga de una pieza 2. Del robot 2 sale la pieza 2, que luego pasa a la estación de ensamble.

La operación de ensamble se realiza juntando una pieza 1 con una pieza 2 y la duración de esta se ajusta estadísticamente a una distribución normal, con una media de 3 minutos y una desviación de medio minuto. Al terminar un ensamble se completa un producto terminado, que luego es enviado al control de calidad.

Durante el control de calidad, la probabilidad de aceptar un producto es del 75%, mientras que la probabilidad de rechazarlo es del 25%. Según sea el resultado de la inspección de calidad, el producto aceptado se envía al almacén central para su posterior salida del sistema, mientras que los productos rechazados salen directamente del sistema.

Considere que existe un tiempo de desplazamiento de las entidades hacia las locaciones, que se estima que es, en promedio, de 1 minuto. Este tiempo no se refiere a los desplazamientos de las entidades en las fajas sino cuando salen de estas u otras locaciones hacia otras. A continuación, se muestra la información técnica del caso:

Locaciones	Capacidad	Unidades
Faja 1A	10	1
Robot 1	1	1
Faja 1B	10	1
Robot 3	1	1
Faja 1C	10	1
Faja 2	10	1
Robot 2	1	1
Estación de ensamble	1	1
Control de calidad	1	1
Almacén central	INF	1

Entities	
Icon	Name
	Bloque
	Pieza 1
	Pieza 2
	Producto Terminado
	Producto Rechazado

Se pide hacer un modelo de simulación para el sistema planteado, luego correr o simular el modelo por un tiempo de 15 horas.

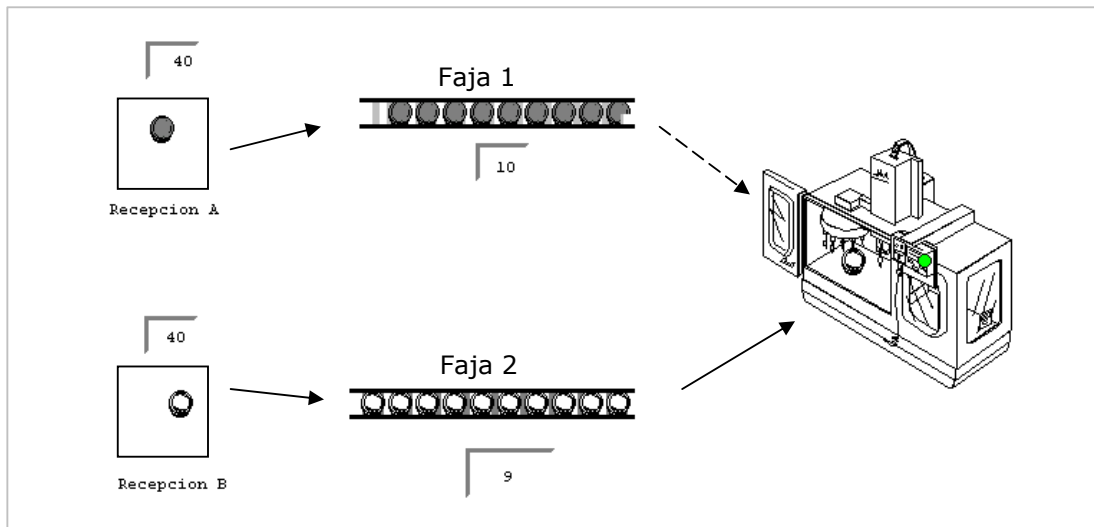
### Escenario

Se desea evaluar la posibilidad de que la producción defectuosa se reprocese. En cuanto al trabajo realizado por los robots, este es muy preciso y de muy alto nivel de calidad; sin embargo, el problema se produce en la estación de ensamblaje. Las estadísticas revelan que el 100% de los productos defectuosos se debe a un mal ensamble. Los ingenieros de planta están considerando modificar el proceso de la siguiente manera:

- Para todo producto que se rechaza por mala calidad durante la inspección, debe realizarse un retrabajo en la estación de ensamble.
- Debido a la mayor demanda de trabajo que soportará la estación de ensamble, se ha considerado aumentar su capacidad a 2.
- El producto rechazado que sale del control de calidad reingresa a la estación de ensamble. La operación de reensamble no requiere de ninguna pieza adicional y tiene una duración que se ajusta a una distribución normal con media de 1 y una desviación de 0.1 minutos. Terminada esta operación, el producto pasa directamente al almacén central y desde allí posteriormente saldrá del sistema.
- Se requiere llevar un control sobre el número de productos que se reprocesan y llegan al almacén central. Es decir, se pide que se coloque un contador para monitorear a los productos que se retrabajan.

## Caso 6: Asignación de prioridades a rutas

Se tiene un sistema de producción cuyas locaciones y entidades se muestran a continuación:



Según el esquema anterior, el proceso comienza cuando las piezas A y B arriban a las zonas de recepción A y B respectivamente, donde permanecerán 5 minutos. Luego pasarán en paralelo a las fajas 1 y 2, entonces avanzarán con dirección a la máquina de proceso.

Las zonas de recepción y las fajas transportadoras tienen capacidad infinita, mientras que la máquina de proceso tiene capacidad 1. Al salir de las fajas, las piezas ingresan, una a una, a la máquina de proceso. El tiempo de procesamiento en esta se ajusta a una distribución normal con media 3 y desviación de 0.1 minutos, para cualquier tipo de pieza; transcurrido este tiempo, salen del sistema. Considerar un tiempo de desplazamiento de las piezas entre locaciones igual a 1 minuto.

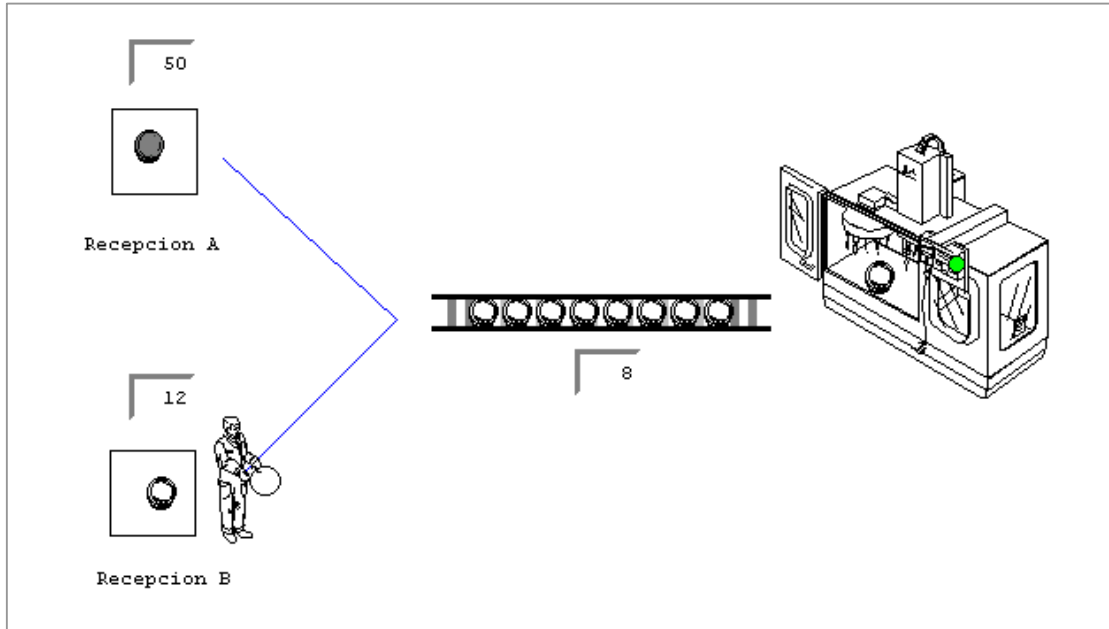
Formular un modelo de simulación para el caso planteado. Considerar que las piezas ingresan al sistema cada minuto, en lotes de 50 unidades, se desea observar el proceso para una sola ocurrencia en cada tipo de pieza, es decir, hasta que se terminen de procesar ambos lotes.

### Escenario

Se desea estudiar el comportamiento del sistema cuando las piezas tipo B que se encuentran en la faja 2 deben ingresar a la máquina de proceso antes que las piezas A de la faja 1.

### Caso 7: Asignación de prioridades a recursos

Sobre la base de la información del caso anterior, considerar el siguiente sistema de producción, cuyas locaciones, entidades y recursos, se muestran a continuación:



Según el esquema anterior, el proceso comienza cuando las piezas A y B arriban a las zonas de recepción A y B, respectivamente. Luego un operario se encargará de llevarlas hasta la faja transportadora.

Como se tiene dos tipos de piezas, una en cada recepción, y solo existe una faja, entonces es imperativo definir cuál de ellas tiene prioridad para obtener el recurso y acceder primero a la faja. Para este caso, la prioridad al *capturar* el recurso la tendrá la pieza B; es decir, el operario debe ir a la recepción B y tomar una pieza B y llevarla hasta la faja, luego regresará a la recepción B y tomará la segunda pieza B y la llevará a la faja, y así sucesivamente hasta terminar con el lote. Después pasará a la recepción A y hará lo mismo con el lote A.

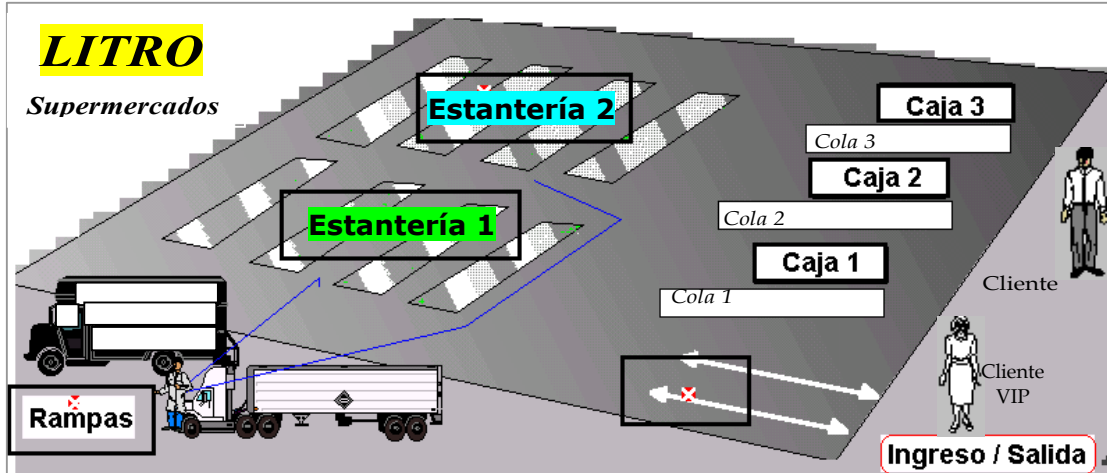
Al salir de las fajas, las piezas ingresan una a una a la máquina de proceso y al término de la operación la pieza saldrá del sistema.

Se pide:

Formular un modelo de simulación para el caso planteado. Se desea observar el proceso para una sola ocurrencia en cada tipo de pieza.

### Caso 8: Supermercado Litro

Se desea estudiar el comportamiento de las colas que se producen en un sistema comercial, correspondiente a un supermercado de autoservicio que está compuesto por las siguientes locaciones, entidades y recursos:



Según el esquema anterior hay dos tipos de clientes, quienes ingresan al establecimiento por la locación correspondiente, para realizar sus compras. Existen dos estanterías, donde se encuentran los productos clasificados según su uso y a los cuales llegan los clientes para escoger sus productos. Terminada esta operación, los clientes se dirigen hacia las cajas para realizar sus pagos.

Existen tres cajas disponibles para realizar los pagos. La caja 1 está destinada exclusivamente para clientes importantes; las cajas 2 y 3 son utilizadas por el resto de los clientes. Una vez que los clientes realizaron sus pagos salen de la cola y se dirigen a la zona de salida, para luego salir del sistema.

Paralelamente a las transacciones descritas, se produce la tarea de abastecimiento de los productos al supermercado. Esto se inicia cuando los productos llegan a la zona de rampas; luego, dos empleados del establecimiento trasladan los productos directamente a las estanterías. Estos empleados están al tanto de la llegada de los productos para realizar su trabajo.

El estudio se ha focalizado en realizar un seguimiento a los clientes y no a los productos que estos lleven; considere que existe un tiempo de desplazamiento de los clientes hacia las locaciones, que se estima que, en promedio, es de 1 minuto. A continuación, se muestra la información técnica del caso:

Locaciones	Capacidad
Caja 1	1
Caja 2	1
Caja 3	1
Cola 1	INF
Cola 2	INF
Cola 3	INF
Estantería 1	1
Estantería 2	1
Entrada	1
Rampas	1



Se ha efectuado un trabajo de campo para la toma de tiempo de los arribos de los clientes. Esta data se sometió a diversas pruebas estadísticas para realizar los ajustes correspondientes a distribuciones de probabilidad. Los resultados fueron los siguientes:

- Una vez abierto el establecimiento, la frecuencia con que un cliente importante (VIP) llega al supermercado está de acuerdo a una distribución exponencial con una media de 10 minutos. El comportamiento de las llegadas cambia después de 4 horas de abierto el establecimiento; es decir, los clientes VIP llegan con mayor frecuencia, de acuerdo con una exponencial con media de 5 *minutos*.
- El resto de los clientes arriban al supermercado también de acuerdo a una distribución exponencial, pero con una media de 2 *minutos*.
- Los productos llegan a la zona de rampas de acuerdo a una exponencial con media de 30 minutos, e inmediatamente son trasladados por los empleados hacia las estanterías.
- En cuanto a los recursos, existen 2 empleados que se dedican en forma exclusiva a trasladar los productos desde las rampas hasta las estanterías. La selección de la estantería donde dejarán el producto es Random o aleatoria (otro objetivo del estudio es conocer los niveles de utilización actual de dichos recursos).
- Considere que la selección de la estantería por los clientes es Random (aleatorio). De igual forma, cuando el cliente sale de las estanterías con dirección a las colas 2 o 3, su selección es aleatoria o Random. Solo en el caso del cliente VIP su destino siempre es la cola de pago 1.
- Todos los clientes demoran un promedio de 1 minuto en las estanterías. Luego de hacer la cola, los clientes ingresan a la caja donde realizan el pago. Esta operación tiene una duración promedio de 1 minuto por cliente.
- Considere un minuto como tiempo de desplazamiento de los clientes desde la entrada hasta las estanterías. De igual forma, desde las estanterías hasta las colas el tiempo de desplazamiento es de un minuto. También tardan un minuto en salir del sistema.

Se pide:

1. Hacer un modelo de simulación para el sistema planteado, luego correr o simular el modelo por un tiempo de 15 horas.
2. Efectuar un diagnóstico de la situación actual del comportamiento de colas observado.
3. Implementar las mejoras que considere conveniente.

**Caso 9: generación de stock y despacho**

Una empresa produce y comercializa un cierto producto destinado exclusivamente para la exportación. Los productos pasan de la planta de producción al almacén central en forma continua a un ritmo que se ajusta a una distribución UNIF(2,4) minutos, aquí se coloca cada unidad en una caja que luego se enzuncha (colocarle cinta abrazadera de metal), este proceso tarda un tiempo que se ajusta a una distribución UNIF(1,1.5) minutos y existe capacidad infinita para realizarlo. Se dispone de un inventario inicial de 117 unidades empacadas en almacén. Determine como queda el inventario final, al cabo de 8 horas de simulación del sistema.

**Escenario**

Respecto al escenario original, suponga que los productos ya no se empaacan, ahora se envían sin caja al almacén al mismo ritmo. Paralelamente a la producción, existen 4 operarios que van realizando en forma continua, el control de calidad del producto. Este proceso tarda, a cada trabajador, un tiempo que corresponde a un distribución TRIA(2,3,5) minutos por producto. El 15% de los productos desaprueba el control de calidad y deben ir a un reproceso, que demanda una distribución UNIF(2,3) minutos, en el que siempre se recupera el producto y se le envía al almacén. Los productos que aprueban el control de calidad, son cargados en camiones que los llevan directamente al puerto de embarque.

1. Modele los cambios necesarios al modelo original.
2. Determine los siguientes indicadores:
  - Obtenga el número total de cajas examinadas
  - Determine el inventario promedio de cajas durante la simulación
  - Determine el número de cajas que no fueron examinadas.
  - Determine cada cuanto tiempo se examina y aprueba un producto.

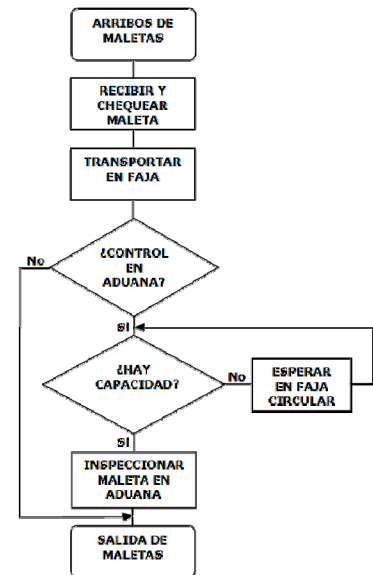
**Caso 10: Descarga del equipaje de los pasajeros en aeropuerto**

Se desea investigar el funcionamiento del proceso de descarga del equipaje de pasajeros que traen los aviones que provienen del extranjero. Luego de cargar, los montacargas se desplazan y llegan a la zona de descarga del aeropuerto de acuerdo a una EXPO(10) minutos, cargando entre 10 y 15 maletas con distribución uniforme. Si bien se dispone de varios montacargas, se debe realizar entre 18 y 20 cargas con distribución uniforme, para descargar cada avión. Al llegar el primer montacargas a esta zona, dos operarios descargan y verifican la recepción de cada maleta mediante una pistola lectora de código de barras, luego es cargada en una faja transportadora. Todo ello tarda a cada operario una NORM(0.5,0.05) minutos por maleta.

Ya en la faja, cada maleta es transportada hasta la zona de control de aduana; el tiempo de traslado es variable y corresponde a una UNIF(4,6) minutos, ya que siempre realizan paradas técnicas en las fajas. Una vez en la aduana, el 33% de las maletas pasa a la inspección (asumimos una maleta por pasajero), el resto de pasajeros sale del aeropuerto con su equipaje. En la aduana existen dos inspectores que tardan, cada uno, un tiempo equivalente a una EXPO(5) minutos por maleta. En la zona de control de aduanas no debe haber más de 6 pasajeros en total (dos atendiéndose y cuatro en cola). Por ello, las maletas que arriban a dicha zona pueden pasar directa-

mente a la cola, si es que hay capacidad, de lo contrario un operario las monta en una faja circular en la que las maletas estarán dando vueltas hasta que sean retiradas por el operario; éste realiza el chequeo de la disponibilidad en cola cada vez que una maleta llega a su ubicación; una maleta tarda un minuto en dar una vuelta. Sí las maletas que llegan a la aduana encuentran disponibilidad de atención, entonces entran directamente a la cola sin ingresar a la faja circular; sin embargo una maleta que sale de la faja circular tiene prioridad en la cola de atención sobre las que no ingresaron a la faja. Se pide:

1. Formular un modelo de simulación en Arena, para el sistema descrito.
2. Determine los siguientes indicadores de desempeño:
  - El tiempo promedio que demora entregar una maleta, desde su arribo a la zona de descarga hasta su salida del aeropuerto. Discrimine de acuerdo a si pasó o no por aduana.
  - El tiempo promedio que una maleta permanece en la faja circular.
  - Intervalo entre salidas de pasajeros, discrimine de acuerdo a si pasó o no por aduana.



### **Escenario**

Suponga que los inspectores de aduana comienzan a trabajar solo después de 10 minutos del arribo de las primeras maletas a la zona de descarga del aeropuerto. Realice los cambios necesarios al modelo original y obtenga los mismos indicadores.

### **Caso 11: Transporte de bobinas de acero**

En el departamento de producción de MAFEPE, que es una empresa metal mecánica dedicada a la transformación y venta de materiales ferrosos, se tiene interés en simular el funcionamiento de una sección de la planta en la cual se reciben las bobinas de acero y se transportan hacia las diferentes líneas de transformación.

El proceso se inicia con los envíos de las bobinas de acero desde el almacén MP a la zona temporal de almacenaje; los arribos a esta zona están programados para que se realicen durante 2 horas consecutivas y con un tiempo entre arribos que se ajusta a una distribución UNIF(8,10) minutos. A esta zona temporal llegan dos tipos de bobinas: LAF (laminado en frío) y LAC (laminado en caliente), cuyas probabilidades de arribo son del 60% y 40%, respectivamente. Mediante una grúa "puente", conducida por un operario, se toma con prioridad una bobina LAF, si la hubiere, de lo contrario se toma una bobina LAC. El proceso de enganchar la bobina, transportarla hasta la zona previa a las líneas de producción y colocarla en una tarima dura una UNIF(10,15) minutos. Hecho esto, la grúa regresa sin carga a tomar una nueva bobina; este tiempo de regreso se ajusta a una NORM(3.5,0.25) minutos.

1. Formule un modelo de simulación adecuado al caso planteado y ejecútelo hasta que se hayan trasladado todas las bobinas de acero hasta la zona previa a las líneas de producción.
2. Determine el tiempo de ciclo de la grúa, desde que inicia la carga de la bobina hasta que regresa y carga la siguiente bobina.
3. Diseñe un indicador estadístico para controlar el final de la simulación.

### **Escenario**

Las bobinas dejadas por la grúa son recogidas por montacargas y demoran una UNIF(3,5) minutos en llegar hasta las líneas de producción. Las bobinas tipo LAF, de mejor calidad, se destinan para la producción de tubos (Línea 1); mientras que las de tipo LAC, se utilizan en un 70% para la producción de ángulos (Línea 2); y el resto para la producción de platinas (Línea 3).

4. Añada al modelo original lo necesario para cumplir con lo requerido en el escenario.
5. Incluya un procedimiento para contar el número de bobinas que llegan a cada línea de producción y escriba sus resultados.

### **Caso 12: Proceso de ensamble de bicicletas**

En INBISA, se producen dos tipos de bicicletas para dos segmentos diferentes del mercado; el proceso de producción se realiza en dos líneas, una para cada tipo de bicicleta, y consiste en ejecutar operaciones de ensamble; cada bicicleta requiere de una estructura, que es la misma para ambos tipos, y de accesorios (llantas, cadena, frenos, etc.). Se ha programado que, durante la jornada, el almacén realizará los envíos de las estructuras a la planta de producción, a razón de un envío por hora, comenzando desde las 8 a.m. hasta las 4 p.m. hora en que se ejecutará el último envío, es decir serán 9 envíos en el día. Cada envío consiste en una estructura de cada tipo.

En cada línea de producción existe una estación de trabajo y un operario asignado a cada una de ellas, para ejecutar las operaciones de ensamblaje. En cada estación existen los accesorios suficientes para cumplir con la producción diaria; el tiempo para ensamblar una bicicleta del tipo 1 se ajusta a una UNIF(50,60) minutos, mientras que para el tipo 2 es una TRIA(45,50,55) minutos. Una vez ensamblada una bicicleta, inmediatamente, se realiza un control de calidad que lo ejecuta el mismo operario; el 25% de las bicicletas requieren de un reajuste de sus piezas, que demandará un tiempo equivalente a un 10% de lo que fue su duración original de ensamblaje.

Finalmente, las bicicletas son llevadas a un almacén común en el que se van colocando en fila, según vayan llegando, y permanecerán allí hasta terminar la producción del día, hora en que dos camionetas, una para cada tipo de bicicleta, las llevarán a los respectivos puntos de venta. Los tiempos de carga de las bicicletas a las camionetas son despreciables.

Se pide simular el sistema, hasta que se haya concluido la producción del día y determine lo siguiente:

1. Identifique a las entidades, actividades y recursos del sistema.
2. Determine el tiempo promedio para ensamblar cada tipo de bicicleta, desde la llegada de los componentes.
3. Determine el tiempo promedio que una bicicleta de cualquier tipo permanece en el almacén hasta que sean recogidas.

**Escenario:**

Suponga que debido a problemas de capacidad en el almacén de estructuras, se dispone de un inventario de exactamente 18 unidades (9 para cada tipo de bicicleta), para trabajar en el día. Así, a las 4:00 p.m. se debe lanzar una orden de pedido al proveedor para la compra de 18 unidades y recargar inventario, que estarán disponibles al inicio de la producción del día siguiente. Suponga que el proveedor tarda un tiempo equivalente a una  $UNIF(1.5,2)$  horas, en atender el pedido. Se pide agregar los cambios necesarios al modelo original.



## Capítulo 3

# Obtención y análisis estadístico de los datos para el modelo

- Aspectos importantes en la etapa de recolección de datos
- Ajuste de los datos muestrales a distribuciones de probabilidad teóricas poblacionales
- Proceso de ajuste de datos a una distribución
- Análisis de datos en Arena: Input Analyzer
- Escenario de incertidumbre total

El proceso de recolección de datos implica planeamiento, tiempo de ejecución y costo, por lo tanto debe ejecutarse en forma inteligente y sistemática, para asegurar una construcción apropiada del modelo que representará al sistema. La información que se desprende de un sistema tiene carácter dinámico y estocástico, la variabilidad de este debe modelarse mediante expresiones matemáticas que reproduzcan su comportamiento. Así, las distribuciones teóricas de probabilidad, en la mayoría de los casos pueden reproducir dicha variabilidad; por ello, los datos recolectados deben someterse a diversas pruebas estadísticas para evaluar el grado de independencia, homogeneidad y compatibilidad; y conocer el nivel de calidad de ajuste que tienen a alguna distribución teórica que los represente.





Una vez que se han definido claramente los objetivos y se ha diseñado el modelo conceptual, entonces puede iniciarse la fase de recolección de datos. Se requiere identificar qué datos serán necesarios para soportar el modelo, como los tiempos de proceso de las máquinas o el intervalo entre fallas de equipos, etcétera. El proceso de recolección de datos es vital e implica tiempo y costo, por lo tanto, debe ejecutarse en forma inteligente y sistemática para asegurar la construcción del modelo apropiado.

Los datos raramente se encuentran disponibles en la forma exacta en que se necesitan para definir un modelo. Por lo general, los esfuerzos de recolección terminan con muchos datos, pero muy poca información útil. La disponibilidad y calidad de los datos pueden influenciar en el acercamiento o nivel de detalle que se captura en el modelo; es decir, si no podemos conseguir los datos adecuados que conciernen a elementos críticos del modelo, entonces no es posible obtener conclusiones con un significativo nivel de confiabilidad.

## **1. ASPECTOS IMPORTANTES EN LA ETAPA DE RECOLECCIÓN DE DATOS<sup>1</sup>**

### **1.1 Identificar los requerimientos de los datos**

La recolección de los datos no debe ser al azar sino orientada en función de los objetivos del estudio. Se deben considerar solo los factores relevantes; por ejemplo, si las fallas de las máquinas no son relevantes, o los tiempos de desplazamiento no son significativos, entonces no hay que perder tiempo buscando información sin importancia. Tomar en cuenta que la simulación es una abstracción del sistema real, que implica modelar la esencia y no los mecanismos con que funciona.

### **1.2 Identificar las relaciones causa-efecto**

Uno de los aspectos más difíciles de definir son las relaciones causa-efecto en el sistema. Es importante identificar correctamente las causas o condiciones bajo las cuales las actividades son ejecutadas durante la simulación. En algunos casos esto se produce durante la ejecución de los eventos programados, sin embargo en otros casos la ejecución de actividades obedece a la ejecución de eventos condicionales. Por ejemplo, cuando se realiza la recolección de datos sobre tiempos de actividad es importante distinguir entre el tiempo que se requiere para ejecutar la actividad y el tiempo que permanece en cola por la espera de la disponibilidad de recursos. Si, por ejemplo, los datos históricos son usados para determinar los tiempos de reparación por la falla de una máquina, entonces el tiempo de reparación no debería incluir el tiempo de espera por la disponibilidad del mecánico (técnico).

<sup>1</sup> Basado en HARRELL, CH. y K. TUMAY. *Simulation made easy. A managers guide*, 1995.

Tómese en cuenta que, por cuestiones de simplificación, sumar los tiempos o agrupar múltiples actividades en un solo tiempo resultante puede ser factible si las operaciones conforman un proceso en serie. Sin embargo, esto no es posible si las operaciones se realizan en paralelo, en este caso los tiempos no son aditivos. Estos aspectos deben ser tomados en el proceso de recolección de los datos.

### **1.3 Recolección de datos en forma sistemática**

Los requerimientos de los datos se definen sobre la base de los objetivos y estrategias para la construcción del modelo, recién entonces se debe iniciar la recolección de los datos. Los datos deben ser obtenidos de manera sistemática, comenzando con información general acerca del sistema y luego información más específica como parte de un refinamiento progresivo. Al empezar desde el nivel más general, quizá la forma de comenzar sea definiendo el flujo físico de entidades de una locación a otra, a través del sistema. Esto puede realizarse mediante un diagrama de flujo que asegure que el flujo es correcto y no se ha descuidado nada. El siguiente paso es definir cómo se mueven las entidades de locación en locación y qué recursos son usados para ejecutar las operaciones en cada locación. El último paso es determinar los valores que se van a utilizar en las capacidades, tiempos de desplazamiento, tiempos de proceso, etcétera. En el modelado de los sistemas de manufactura el modelador debe, a menudo, estimar los tiempos de ciclo o tiempos de inactividad por fallas de las máquinas mediante estudios de tiempos, tiempos estándar predeterminados, datos históricos o especificaciones técnicas de los equipos.

Es importante preparar una lista de preguntas que nos oriente hacia la obtención de la información adecuada. Algunas de estas preguntas son:

- ¿Cuáles son los tipos de entidades que fluirán por el sistema y qué atributos los distinguen en la manera en que las entidades del mismo tipo son procesadas?
- ¿Cuál es la ruta de las locaciones en el sistema (locaciones o puntos de procesamiento, colas o rutas alternativas por módulos de decisión) y cuáles son sus capacidades (número de entidades que se pueden alojar en la locación a la vez)?
- Si la locación es una cola, ¿en qué orden se formará la cola (FIFO, LIFO, etcétera)?
- ¿Qué tipos de recursos (personal, vehículos, máquinas, etcétera) son utilizados en el sistema y cuántas unidades se requieren por cada tipo?
- ¿Dónde, cuándo y en qué cantidades ingresan las entidades al sistema? Definir los horarios Schedule, tiempos entre arribos, patrones de arribos cíclicos o condiciones que inician cada arribo.
- ¿Cuál es la ruta o secuencia que sigue cada tipo de entidad?
- ¿Qué actividad es requerida por cada entidad, en la ruta o secuencia que estas siguen? Definir en términos de tiempo requerido, recursos usados, lógica de la operación, etcétera.

- Si una entidad saliente de un módulo de decisión puede ser dirigida a varias locaciones alternativas, ¿cómo es establecida la ruta según decisión (selección probabilística o por condición)?
- ¿Cómo se trasladan las entidades a la siguiente locación? Definir en términos de tiempo y recursos requeridos.
- ¿Qué produce el movimiento de entidades de una locación a otra: capacidad disponible de la locación siguiente, el pedido que realiza la estación siguiente a la estación anterior, una condición externa?
- ¿Cómo se mueven los recursos de una locación a otra para ejecutar tareas? Definir en términos de velocidad, distancia o tiempo.
- ¿Qué hacen los recursos cuando terminan de ejecutar una tarea y no hay otras tareas esperando? ¿Permanecer en el lugar, ir a algún otro lugar, etcétera?
- Si hay situaciones donde múltiples entidades esperan por el mismo recurso, cuando este queda disponible, ¿qué método es usado para conceder el acceso? Definir prioridades de apropiación.
- ¿Cuál es el programa de disponibilidad de recursos? Definir en términos de turnos de trabajo o interrupciones en los programas.
- ¿Qué clase de interrupciones planeadas realizan los recursos: programas de mantenimiento, calibración/configuración o setup, reemplazo de equipos?
- ¿Qué clase de fallas se producen en las máquinas o recursos en general? Definir en términos de distribuciones, describiendo el tiempo de falla y el tiempo para reparar el recurso.

#### **1.4 Usar fuentes de datos apropiadas**

Los datos raramente se recolectan de una única fuente, por lo general es el resultado de tabulación, extrapolación, entrevistas, y provienen también de una suerte de conjeturas. Las nuevas fuentes de sistemas de datos incluyen lo siguiente:

- Planes de procesos.
- Estudios de tiempos.
- Diagramas de flujo.
- Diagramas de disposición.
- Entrevistas personales.

### **1.5 Preparar una lista de supuestos**

No toma mucho tiempo, después de que los datos han sido recolectados, darnos cuenta de que cierta información no está disponible, o quizá los datos obtenidos sean no fiables. Es difícil obtener datos completos, precisos y actualizados para toda la información necesitada. Asimismo, es casi imposible lograr la precisión de los datos para sistemas nuevos que están siendo modelados.

Para fenómenos donde la información es desconocida o imposible de determinar se deben establecer suposiciones; por ejemplo, la varianza de una determinada actividad tiene muy poco o ningún impacto en el desempeño del sistema, entonces debe ser usado un tiempo de actividad constante. De otro modo, será importante tener una definición precisa de la distribución del tiempo de actividad.

Otro tipo de suposiciones consiste en ejecutar tres escenarios diferentes, "el mejor caso" mostrando el valor más optimista, "el peor caso" usando el valor más pesimista, y "el caso más probable" usando un valor estimado. Esto ayudará a cuantificar el riesgo que se desea adoptar en el supuesto.

### **1.6 Convertir los datos en una forma utilizable en el modelo**

Una vez recolectados los datos se deben realizar ciertas pruebas de ajuste de estos a alguna distribución teórica poblacional, o, en todo caso, a una distribución empírica. Es decir, el objetivo es resumir los datos en la forma de una distribución, que pueda ser utilizada directamente en el modelo.

### **1.7 Documentación de los datos**

Cuando la información relevante ha sido extrapolada de los datos disponibles es aconsejable documentar la fuente de esta información y someterla al escrutinio de otros que están en posición de evaluar y validar los datos y aprobar las suposiciones hechas. Organizar la información en un resumen escrito hará que los datos sean fáciles de revisar. Incluso, esto será útil cuando se reexaminan los datos o cuando se provee de información posterior a usuarios del modelo. Además, provee un modelo conceptual de cómo funciona el sistema, que puede ser usado como la base para desarrollar el modelo de simulación.

## 2. AJUSTE DE LOS DATOS MUESTRALES A DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD TEÓRICAS POBLACIONALES

### 2.1 Distribuciones de probabilidad

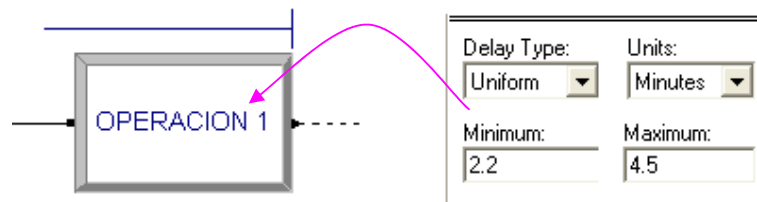
La información de un sistema tiene carácter dinámico y estocástico; la variabilidad de este debe modelarse con ciertas ecuaciones matemáticas que sean capaces de reproducir su comportamiento; en la mayoría de los casos dicha variabilidad es posible clasificarla dentro de alguna distribución de probabilidad, en algunos otros casos esto no es posible. La representación en el modelo de una variable aleatoria se da por medio de una distribución de probabilidad.

#### 2.1.1 Distribuciones teóricas y empíricas

Si luego de realizar las pruebas de los datos obtenidos se logra un ajuste significativo, entonces es posible representar en el modelo estos datos por medio de una distribución de probabilidad "teórica" (exponencial, uniforme, triangular, normal, etcétera). Durante la ejecución del modelo de simulación, estas distribuciones "teóricas" generan valores basadas en fórmulas matemáticas; para ello, en primer lugar, se debe generar un valor individual de la variable aleatoria, tomando un número aleatorio (creado mediante un generador de números aleatorios), el cual mediante una rutina de transformación se convierte en un valor que conforma una distribución de probabilidad y que representa a la variable aleatoria.

#### *Ejemplo:*

Suponga que el tiempo de una actividad se ajusta a una distribución uniforme que varía entre 2.2 y 4.5 minutos, estos parámetros describen la forma o densidad y el rango de la distribución. Durante la simulación, los valores individuales de las variables aleatorias son generados de esta distribución para sucesivos tiempos de operación de las entidades que ingresan al proceso.



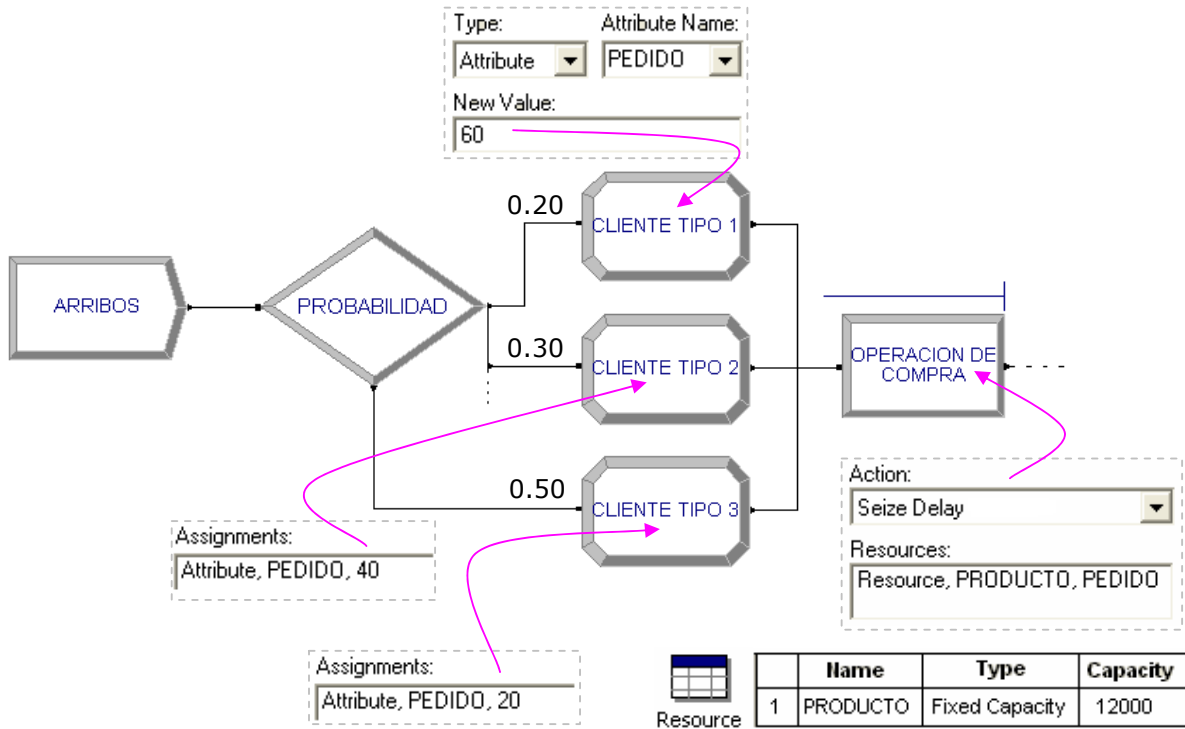
Cuando en las pruebas preliminares se detecta una descripción multimodal de los datos de entrada, o cuando existen datos cuyos valores son significativamente diferentes del conjunto principal de observaciones, entonces esto representa una posibilidad de no ajuste a una distribución teórica. Esto se confirmará después de realizar las pruebas de ajuste respectivas, que arrojarán un ajuste pobre o de poca fiabilidad, de las distribuciones teóricas; en estos casos se debe recurrir a las distribuciones "empíricas". A diferencia de las distribuciones teóricas, cuyos valores se generan mediante la formulación matemática, las distribuciones empíricas clasifican los datos en grupos y se calculan las proporciones o probabilidades de cada uno.

**Ejemplo:**

Suponga que la demanda de un producto no se ajusta a ninguna distribución de probabilidad conocida; sin embargo, se tienen algunos datos sobre los pedidos de los clientes:

<b>Demanda</b>	<b>Probabilidad</b>
60 docenas	0.20
40 docenas	0.30
20 docenas	0.50

A continuación se muestra una representación simple de la situación planteada:



**2.1.2 Clasificación de las distribuciones teóricas**

- *Distribuciones discretas*

Se utilizan para modelar la aleatoriedad de una variable que solo puede tomar valores enteros.

**Ejemplo:**

variable = El # de alumnos que arriban a la cafetería en un intervalo de 3 horas.

valores = { 15, 27, 34, 31, 45, ....., 58 }

Las distribuciones más utilizadas en esta categoría son: Poisson, Binomial, Bernoulli, Uniforme discreta y Geométrica.

- *Distribuciones continuas*

Se utilizan para modelar la aleatoriedad en aquellos eventos en los cuales los valores que toman las variables pertenecen al rango de los números reales.

**Ejemplo:**

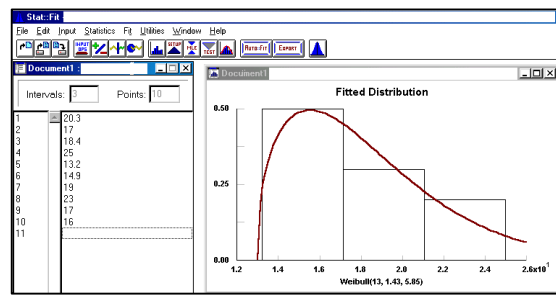
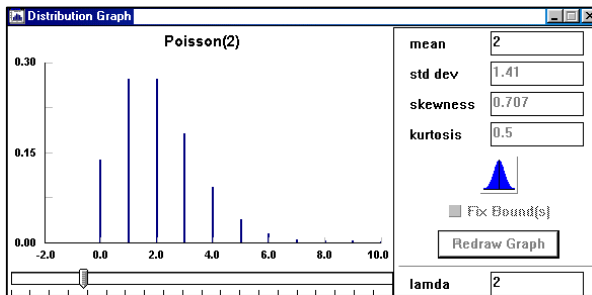
variable = El tiempo entre los arribos de los alumnos a la cafetería

valores = {3 min., 3.5, 3.7, 3.6, 4, 7.1, ....., 8}

Las distribuciones más utilizadas en esta categoría son: Uniforme, Exponencial, Weibull, Triangular, Normal y Lognormal.

Función de densidad y función de distribución de probabilidad:

	<b>Var. Discreta</b>	<b>Var. Continua</b>
Función de densidad	$P(A)$	$f(x)$
Función de distribución de probabilidad	$\sum_{i=1}^n P(A) = 1$	$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

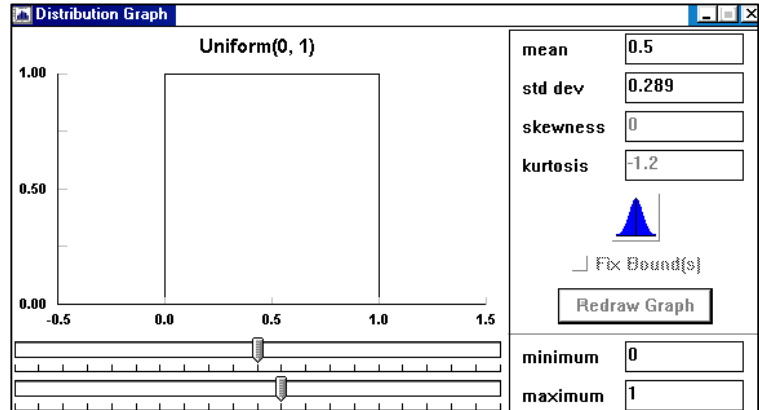


### 2.1.3 Distribución uniforme (continua)

Esta distribución, llamada también rectangular, se utiliza para describir un proceso en el cual es igualmente probable que el resultado caiga entre los valores de a y b. Se utiliza en las etapas tempranas de los proyectos de simulación porque es una fuente conveniente y bien entendida de la variación aleatoria. En el mundo real, es muy raro encontrar un tiempo de actividad que sea uniformemente distribuido dado que la mayoría posee una tendencia central o moda.

$$f(X) = \frac{1}{b - a}$$

**a** = valor mínimo de x  
**b** = valor máximo de x  
**Media** =  $(a + b) / 2$   
**Varianza** =  $(b - a)^2 / 12$   
**Parámetros:** U(a, b)



#### Aplicaciones:

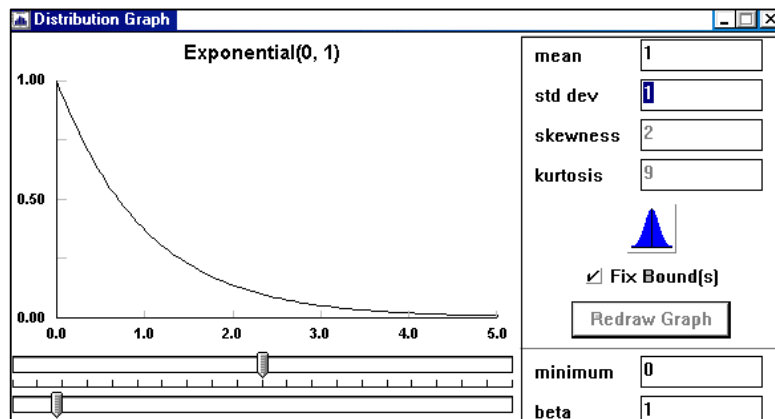
- Para representar el tiempo de duración de una tarea cuando se conoce un mínimo de información de los tiempos actuales de las tareas. Se considera que el tiempo para completar una tarea varía al azar y entre dos valores.
- Es utilizada para realizar pruebas críticas de variación durante análisis de sensibilidad.

### 2.1.4 Distribución exponencial (continua)

La distribución exponencial es una distribución de probabilidad para variables continuas. Es utilizada frecuentemente en simulación para generar números aleatorios para representar el tiempo entre ocurrencias aleatorias y que sucede independientemente uno de otro, por ejemplo el tiempo entre arribos de clientes a un sistema. También se le llama distribución exponencial negativa, porque esta decrece a medida que X se incrementa rápidamente.

$$f(X) = \lambda e^{-\lambda X}$$

$1 / \lambda$  = Media  
 $1 / \lambda^2$  = Varianza  
**Parámetros:**  
**E(min.x, media)**





**Aplicaciones:**

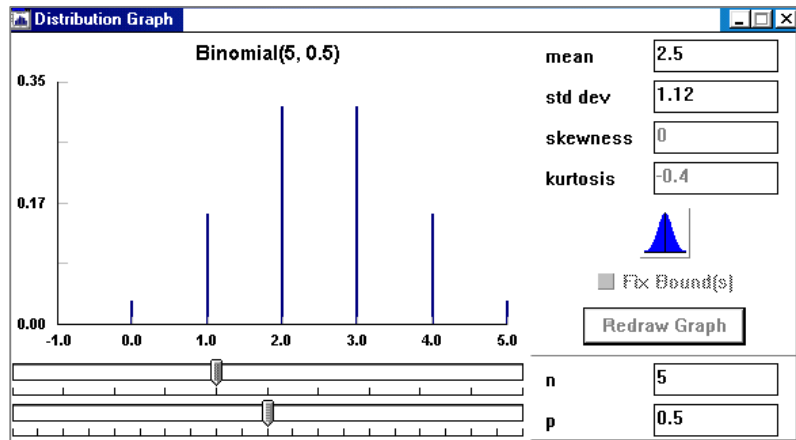
- Los tiempos entre arribos a una locación en un modelo de cola por lo general tienen esta distribución con una media determinada.
- Es utilizado para representar los tiempos de servicio de una operación específica.
- Duración de conversaciones telefónicas.
- Tiempo entre arribos de aviones en un aeropuerto.
- Tiempo entre fallas de un equipo electrónico.

**2.1.5 Distribución binomial (discreta)**

La distribución binomial está asociada con las pruebas repetidas de un mismo suceso. Se asume que cada ensayo genera dos posibles resultados (éxito y fracaso) y es independiente de los otros.

$$P(x) = \left( \frac{n!}{x!(n-x)!} \right) p^x q^{n-x}$$

**n:** # de ensayos  
**p:** probabilidad de éxito  
**q=1-p:** probabilidad de fracaso  
**Media** = np  
**Varianza** = npq  
 Parámetros: **BI( n, p )**



**Aplicaciones:**

La distribución binomial puede ser usada para describir:

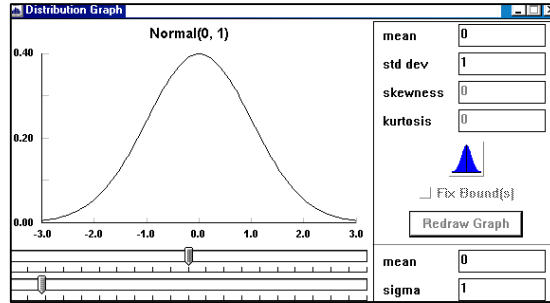
- El número de productos defectuosos en un lote.
- El número de personas en un grupo de un tipo particular.

**2.1.6 Distribución normal (continua)**

Esta distribución —a veces denominada gaussiana o curva de campana— describe fenómenos que varían simétricamente. Es utilizada para definir tiempos de actividad, los cuales, en la práctica, casi no son normalmente distribuidos sino que están sesgados a la derecha, esto es debido a que los tiempos de actividad toman valores mayores que el tiempo medio. En la industria es utilizada frecuentemente en operaciones de inspección en las que se requieren instrumentos calibrados para medir las dimensiones de varios componentes.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

$\mu$  = Media  
 $\sigma^2$  = Varianza  
 Parámetros:  $N(\mu, \sigma)$



**Aplicaciones:**

La distribución normal puede ser usada para describir:

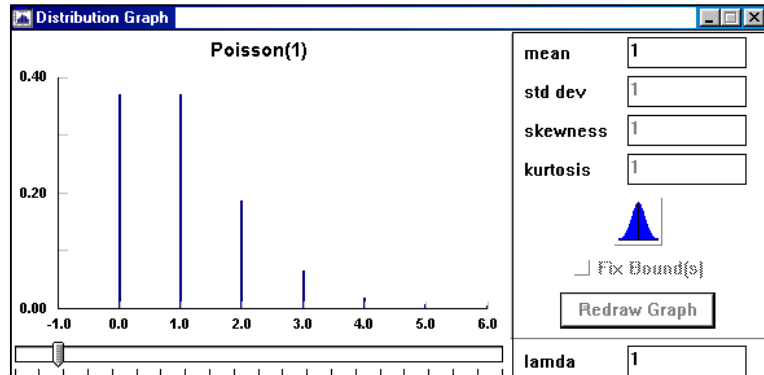
- Mediciones físicas: altura, longitud, diámetro, peso, etcétera.
- Ciertos tiempos de actividad.
- Data simétrica y no acotada en ambas direcciones.

**2.1.7 Distribución Poisson (discreta)**

La distribución Poisson representa la ocurrencia poco frecuente de eventos cuya tasa es constante; esto incluye muchos tipos de eventos en tiempo y espacio. Es un importante punto de partida en la teoría de colas. La distribución Poisson se asocia a la distribución exponencial debido a la relación que existe entre ambas. Si el lapso de llegadas tiene una distribución exponencial, entonces el número de llegadas en un intervalo de tiempo específico (digamos 3 horas) tiene una distribución de Poisson.

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

$\lambda$  = Media  
 $\lambda$  = Varianza  
 Parámetros:  $P(\lambda)$



**Aplicaciones:**

La distribución Poisson puede ser usada para describir sucesos como:

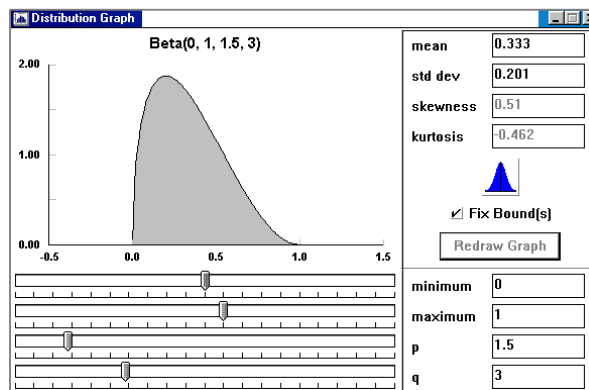
- Llegada de vehículos a una estación de servicio o arribo de aviones a un aeropuerto.
- Llegada de clientes a un restaurante.
- Llegadas de llamadas telefónicas a una central.

### 2.1.8 Distribución Beta (continua)

Es una distribución continua que requiere de cuatro parámetros para definir la distribución Beta, variando sus valores producirán una variedad de diferentes contornos de distribución. La distribución uniforme es un caso especial de la distribución beta cuando  $p=q = 1$ .

$$f(X) = \frac{1}{B(p, q)} \frac{(x - \min)^{p-1} (\max - x)^{q-1}}{(\max - \min)^{p+q-1}}$$

Parámetros:  
 **$B(\min.x, \max.x, p, q)$**



#### Aplicaciones:

- Modelar distribuciones de tiempos de actividad en el análisis Pert, dado que los tiempos de actividad pueden estar sesgados a la derecha, ya que estos toman valores mayores que el tiempo medio.
- Proporciones en mezclas de gases.
- Duración de una construcción.
- Proporción de ítems defectuosos encontrados en un determinado tamaño de lote.
- Representar el tiempo que se requiere para completar una actividad, cuando se dispone de muy poca o ninguna información acerca de la actividad.

### 3. PROCESO DE AJUSTE DE DATOS A UNA DISTRIBUCIÓN

Las pruebas de bondad de ajuste miden la compatibilidad de una muestra aleatoria con una función teórica de distribución de probabilidades. Estas pruebas demuestran cuánto se ajustan nuestros datos muestrales a la distribución seleccionada. La variabilidad de estos debe modelarse con ciertas ecuaciones matemáticas que sean capaces de reproducirla; en la mayoría de los casos dicha variabilidad puede clasificarse dentro de alguna distribución de probabilidad. Las pruebas que se realizan son las de Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Anderson-Darling.

#### *Ejemplo:*

Se han recolectado 100 observaciones que corresponden a valores obtenidos de un proceso:

0.05510036	0.45838955	0.02568446	0.05618719	0.34139546	0.16211486	0.95132377	0.70560432	0.80057981	0.52862125
0.58826161	0.3250562	0.43418325	0.2804422	0.31188974	0.4786784	0.06366636	0.94082602	0.22001115	0.85429271
0.07857071	0.53150058	0.86888506	0.8418346	0.37029126	0.15437929	0.26676948	0.39803029	0.65616401	0.66963088
0.13078692	0.80764886	0.57820958	0.05186507	0.72221164	0.65212411	0.74508103	0.13598755	0.30871853	0.80318678
0.61079237	0.18932893	0.39700417	0.09573217	0.77984771	0.51365121	0.75850752	0.18547472	0.82180777	0.39737404
0.81938561	0.56823216	0.92010558	0.6784145	0.15023593	0.39842571	0.78547878	0.08406213	0.26706779	0.91427103
0.2413912	0.8386142	0.39330285	0.24001446	0.16322459	0.38305182	0.32758087	0.61878793	0.03466118	0.96057666
0.61966696	0.08587805	0.05924799	0.8239332	0.04537345	0.04529417	0.22226188	0.0606874	0.31105278	0.14816207
0.66102605	0.23250684	0.51288272	0.6746056	0.83489087	0.61771954	0.58073581	0.06907335	0.78768534	0.12082032
0.77720288	0.59816372	0.91216646	0.27896353	0.15538821	0.08807087	0.03134882	0.9667875	0.75356435	0.06043603

Con esta data se debe realizar un análisis estadístico, antes de representarla por medio de una distribución de probabilidad, para que pueda utilizarse en un modelo de simulación.

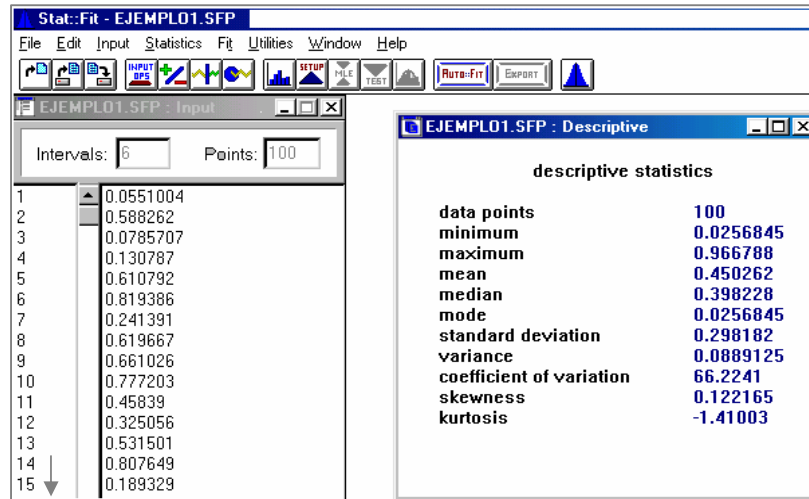
#### **3.1 Metodología<sup>2</sup>**

En general, para que esta data pueda utilizarse como *input* para el modelo de simulación del sistema, por medio de una distribución de probabilidad, debe ser analizada estadísticamente para determinar su grado de independencia (aleatoriedad), homogeneidad (en qué medida se identifica con alguna distribución de probabilidad) y si pertenece a un estado estacionario (en qué medida la data no cambia con el tiempo).

##### **3.1.1 Análisis de la estadística descriptiva**

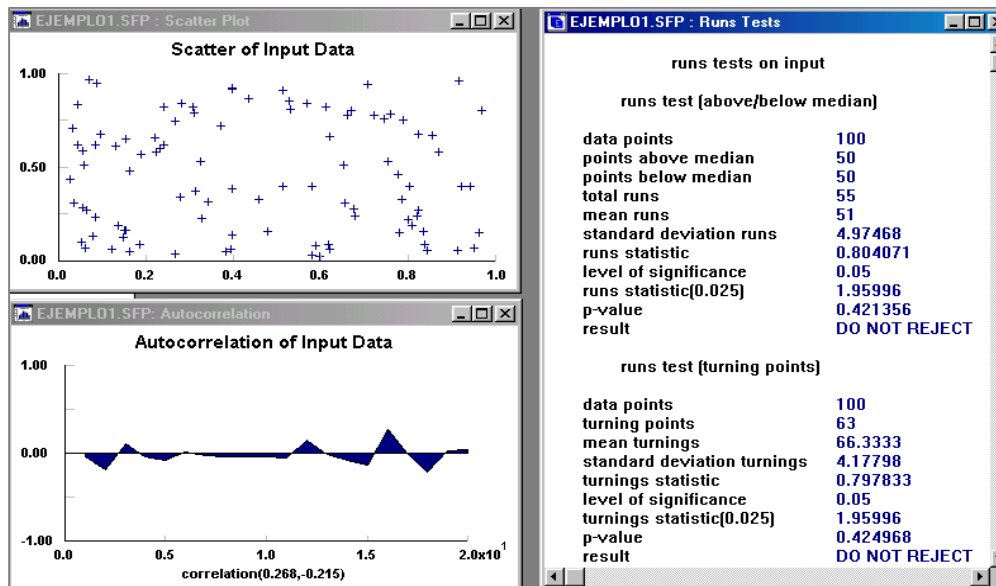
Este estudio preliminar describe características generales claves acerca de los datos, como la media, la varianza, la desviación estándar, la moda, etcétera, que nos indican, de manera preliminar, cuán apropiada es esta data, para utilizarse en un modelo de simulación, o qué tan cerca están estos valores representativos de los que suceden realmente.

<sup>2</sup> Software Stat::Fit®, Geer Mountain Software Corp. Versión 2.0, 2001.



### 3.1.2 Análisis de independencia o aleatoriedad

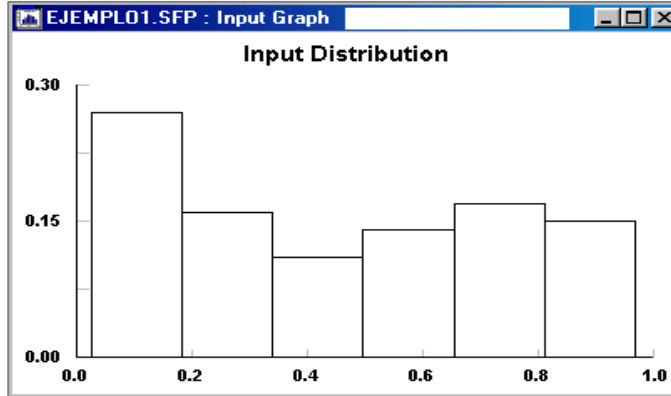
Este es el paso previo al ajuste de la data a una distribución de probabilidad, es decir se requiere que la ocurrencia de un dato sea independiente de la ocurrencia del otro. Existen algunas pruebas para medir la dependencia o correlación entre los datos:



- En la gráfica de Scatter se aprecia que no hay ningún patrón en los datos y que están totalmente dispersos.
- En la segunda gráfica se realiza la prueba de autocorrelación. El valor de autocorrelación varía entre 1 y -1, si este valor está cerca de los extremos, entonces la data está autocorrelacionada. En nuestro caso no sucede eso.
- En el *run tests on input* se realizan dos pruebas de hipótesis: a) el *test* de la mediana mide el número de corridas, que es una secuencia de números arriba o debajo de la mediana. b) La segunda prueba o *run test* se realiza sobre un único número arriba o debajo de la mediana.

### 3.1.3 Prueba de bondad de ajuste

Consiste en analizar si la data está idénticamente distribuida, es decir si se ajusta a alguna distribución de probabilidad, para ello es muy útil representar previamente los datos mediante un histograma y analizar el comportamiento de los datos.



### 3.1.4 Ajuste de una distribución de probabilidad

Para realizar este ajuste se realizan ciertas pruebas como los análisis de Kolmogorov-Smirnov, Chi-cuadrado y Anderson Darling.

Distribution	Chi Squared	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling
Beta(0, 0.967, 0.905, 1.03)	3.44 (5)	0.064	2.61
Erlang(0, 2, 0.225)	19.9 (5)	0.138	3.94
Exponential(0, 0.45)	13.2 (5)	0.14	3.63
Gamma(0, 1.56, 0.289)	10.8 (5)	0.135	2.54
Log-Logistic(0, 1.77, 0.355)	36.1 (5)	0.145	3.33
Lognormal(0, -1.15, 0.978)	17.6 (5)	0.15	3.82
Pareto	no fit	no fit	no fit
Triangular(0, 1.17, 0.047)	11.8 (5)	0.142	2.64
Uniform(0, 0.967)	5.84 (5)	0.101	3.48

Finalmente, es posible obtener un ranking sobre las distribuciones que se ajustan mejor a nuestros datos. Para nuestro caso resultó ser la distribución Beta:

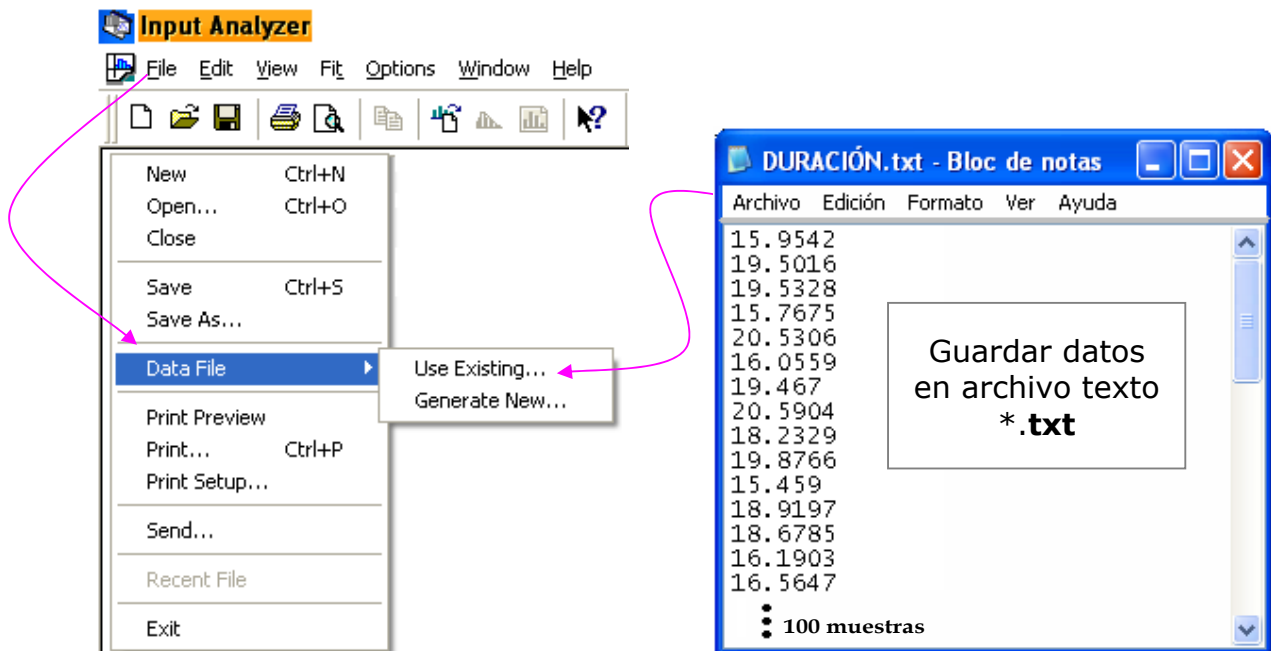
Distribution	rank	acceptance
Beta(0, 0.967, 0.905, 1.03)	100	accept
Uniform(0, 0.967)	9.97	accept
Weibull(0, 1.42, 0.492)	2.13	accept
Gamma(0, 1.56, 0.289)	1.04	reject
Erlang(0, 2, 0.225)	0.671	reject
Triangular(0, 1.17, 0.047)	0.363	reject
Log-Logistic(0, 1.77, 0.355)	0.33	reject
Exponential(0, 0.45)	0.306	reject
Lognormal(0, -1.15, 0.978)	0.139	reject

## 4. ANÁLISIS DE DATOS EN ARENA: INPUT ANALYZER

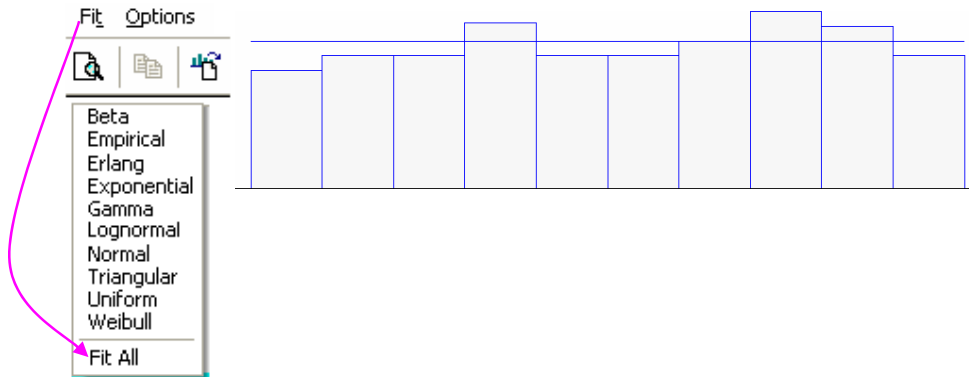
El software Arena<sup>3</sup> soporta el proceso de ajuste de funciones de distribuciones de probabilidad a muestras de datos. Es decir, posee un analizador de datos denominado Input Analyzer, que entre otras funciones establece las hipótesis y realiza las pruebas de Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov (K-S) en forma automática, brindando de esta manera información referente a la calidad del ajuste de los datos, con relación a una distribución de probabilidad.

*Ejemplo:*

Se tiene un archivo conteniendo 100 muestras que corresponde a la duración de una determinada actividad:

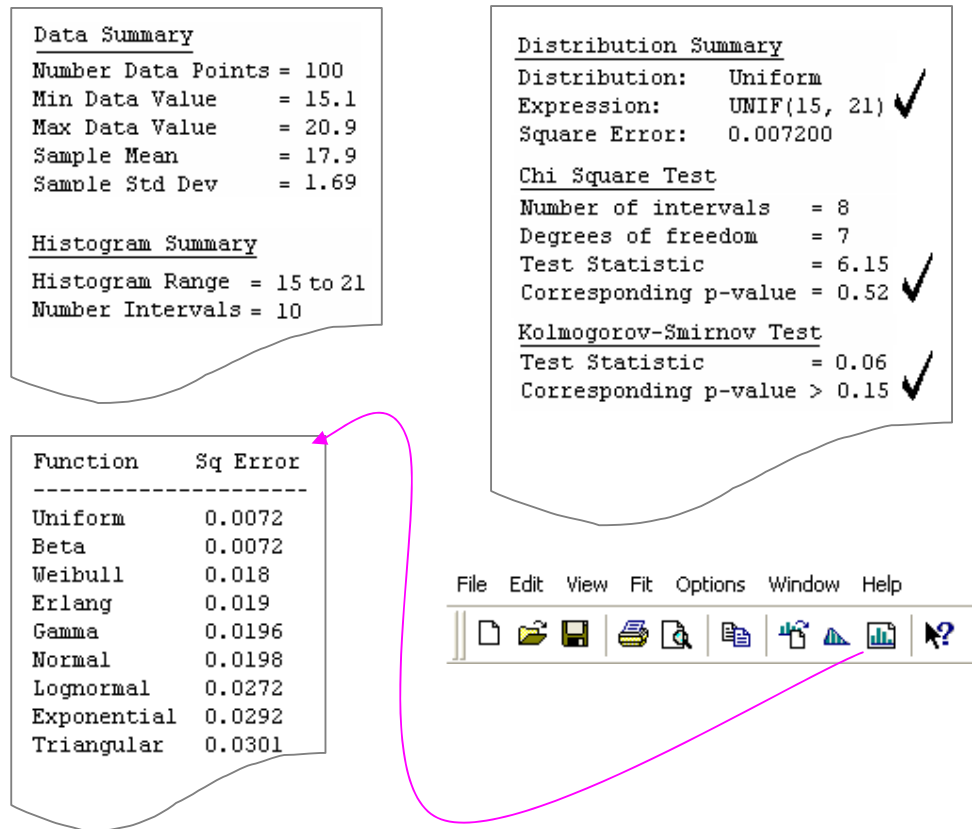


El proceso de ajuste es automático en el Input Analyzer, mediante la opción del menú: Fit / Fit All. Veamos:



<sup>3</sup> Software Arena®, Rockwell Software. Versión 10.0, 2005.

Los resultados del proceso de ajuste se muestran a continuación:



### Interpretación:

- Observando la forma del histograma de frecuencias de los datos y luego de aplicar las pruebas de bondad de ajuste, la distribución de probabilidad que mejor representa a nuestros datos es la Uniforme(15,21) minutos: p-value=0.52 (Chi cuadrado) y p-value > 0.15 (K-S). En ambas pruebas el indicador p es mayor que el riesgo (5%); valores menores indican que no hay un buen ajuste. Valores de  $p$  mayores a 0.10 son aceptables; valores más grandes indican mejores ajustes.
- Se concluye que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos analizados se ajustan a una distribución uniforme.
- Si el valor de  $p$  es menor que el riesgo se puede pensar en utilizar una distribución empírica que represente de una mejor manera las características de nuestros datos. Por lo general esto sucede cuando los datos presentan "máximos múltiples" o Multimodal, o quizá cuando existen "valores atípicos"; es decir, cuando hay valores que difieren significativamente del grueso de las observaciones.
- La diferencia entre ambas pruebas es que la Chi-cuadrado es eficiente con tamaño de muestras grandes, mientras que la K-S es eficiente con tamaños de muestras pequeños. Ambas pruebas son No Paramétricas, por lo tanto no tienen muchas limitaciones o restricciones. En una prueba paramétrica la hipótesis está dada en términos de parámetros.



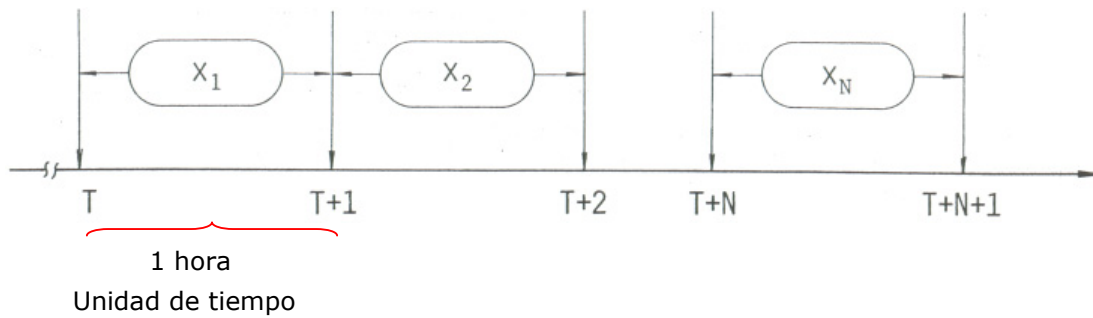
- Una medida de la calidad de ajuste de la distribución a los datos es el error cuadrado. En nuestro ejemplo, la distribución Uniforme presenta el mínimo error cuadrado. La distribución que tiene el ajuste más pobre es la Triangular.

**Ejemplo:**

Suponga que se está realizando un estudio de tiempos sobre los arribos de pasajeros a un *counter* de una aerolínea, con el objetivo de que sirvan como soporte de un proyecto de simulación que se espera realizar.



Sea  $X_1$ : Número de arribos observados por unidad de tiempo



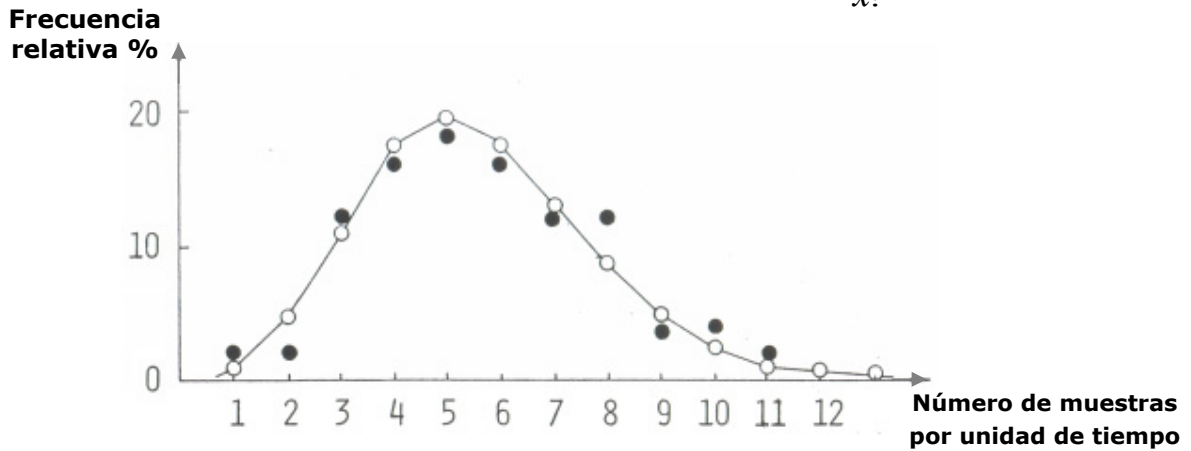
Considerar una unidad de tiempo adecuada, puede ser una hora o dos horas. En este caso, tomar un minuto como unidad de tiempo sería un período muy corto.

Se tomaron 11 muestras consecutivas de una hora cada una. Los resultados fueron los siguientes:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$
Frecuencia	1	1	6	8	9	8	6	6	2	2	1

Según el cuadro, llegó un solo cliente en la primera hora, en la segunda hora igualmente llegó un solo cliente, durante la tercera hora llegaron 6 clientes, así sucesivamente. Mediante una gráfica podemos hacer la siguiente representación:

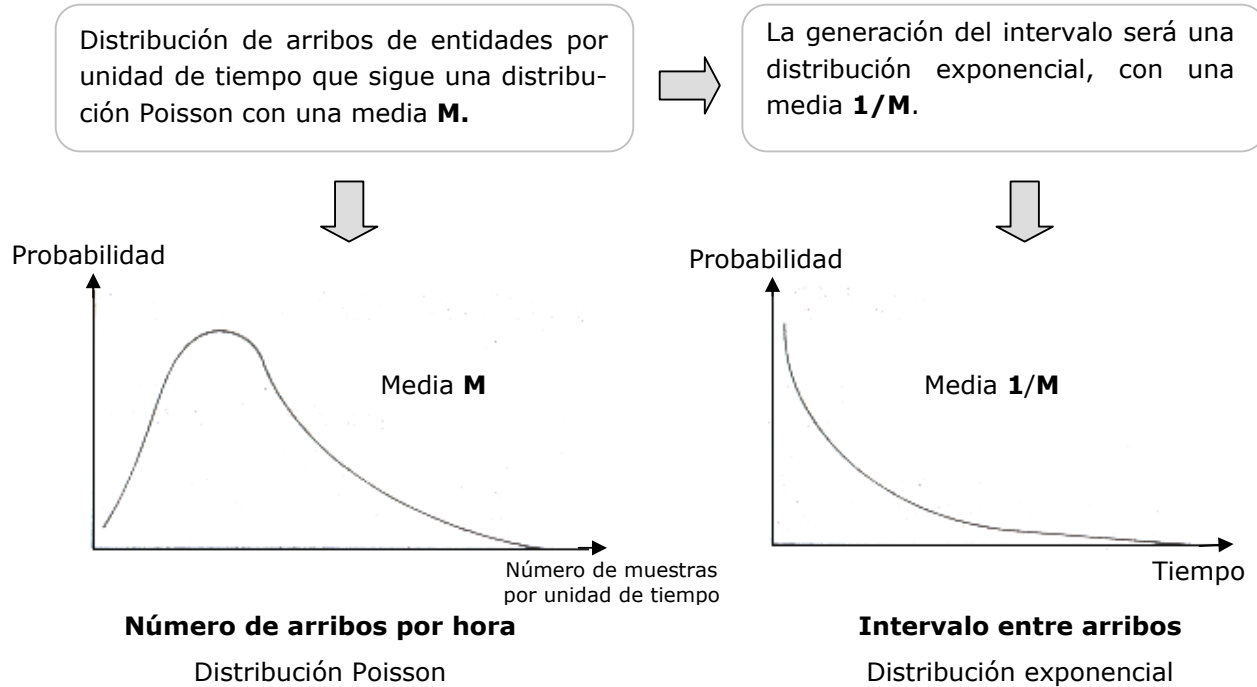
- Valores observados (Media = 4.5)
- Valores teóricos:  $p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$ ; (Media = 4.5)



$$p(x) = \frac{4.5^x e^{-4.5}}{x!}$$

VALORES OBSERVADOS			VALORES TEÓRICOS		
INTERVALO	FRECUENCIA	FRECUENCIA RELATIVA	X	DIST. POISSON	FRECUENCIA RELATIVA
0 - 1	1	2%	0	0.01111	1.11%
1 - 2	1	2%	1	0.04999	5.00%
2 - 3	6	12%	2	0.11248	11.26%
3 - 4	8	16%	3	0.16872	16.89%
4 - 5	9	18%	4	0.18981	19.00%
5 - 6	8	16%	5	0.17083	17.10%
6 - 7	8	16%	6	0.12812	12.82%
7 - 8	6	12%	7	0.08236	8.24%
8 - 9	6	12%	8	0.04633	4.64%
9 - 10	2	4%	9	0.02316	2.32%
10 - 11	2	4%	10	0.01042	1.04%
11 - 12	1	2%	11	0.00426	0.43%
12			12	0.00160	0.16%
Total -->	<b>50</b>	<b>100%</b>	Total -->	<b>0.9992</b>	100.00%
Media -->	<b>4.5</b>				

La distribución de los arribos de las entidades al sistema siguen a menudo una distribución Poisson, suposición que podemos probarla. En nuestro ejemplo, la frecuencia en cada intervalo representa el número de clientes que arriban por unidad de tiempo, es decir, en una hora. Para probar la suposición planteada compararemos los valores actuales observados con los valores teóricos obtenidos de la distribución Poisson. Si las diferencias entre ambos son pequeñas, entonces la suposición de que los arribos se ajustan a la distribución Poisson es correcta. Un buen procedimiento es utilizar un valor para la media que reduzca al mínimo las diferencias entre los valores observados y los teóricos.



**Conclusiones:**

- La distribución de Poisson es una distribución discreta, es decir es capaz de modelar la aleatoriedad de una variable que solo puede tomar valores enteros. En general, puede ser utilizada para describir el número de eventos que ocurren en un intervalo de tiempo.
- Algunos textos representan a la distribución Poisson de una manera no tradicional, en todo caso, las siguientes expresiones son equivalentes:

$$p(x) = \frac{(1/\lambda)^x e^{-(1/\lambda)}}{x!} \qquad p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

- Los arribos de las entidades a un sistema se producen en forma aleatoria y son independientes entre ellas. Dichas características hacen que el tiempo entre arribos de las entidades posea mucha variabilidad, es decir este puede ser tan corto o tan largo. Esta situación puede ser modelada por medio de una distribución exponencial.
- Los tiempos entre arribos también pueden ser representados mediante la distribución Weibull, cuyo ajuste puede ser de similar calidad al de la distribución exponencial. Sin embargo, es preferible utilizar una distribución más conocida, más sencilla de usar y más identificada con el proceso de llegadas de entidades a un sistema.

## 5. ESCENARIO DE INCERTIDUMBRE TOTAL

Si el sistema por modelar todavía no existe, es decir no hay datos de llegadas, de demoras ni de procesos, entonces es necesario realizar algunas estimaciones preliminares. Por ejemplo, el caso de estimación de los arribos es un tanto diferente a estimar un tiempo de proceso. Es necesario conocer la razón de las llegadas, para luego generar el patrón de llegadas en la simulación; en este sentido, se podría estimar una tasa preliminar o tentativa acerca del número de llegadas de entidades por unidad de tiempo, esto será un punto de partida, que podremos después afinar y finalmente traducirla a una distribución exponencial con una determinada media.

En el caso de las demoras o *delays* y tiempos de operación, si no existen datos empíricos, entonces, hay un consenso en priorizar las distribuciones uniforme, triangular y normal. La ventaja de estas es la facilidad de comprender sus parámetros y estimarlos de un rango de valores. Esto simplificará el proceso de estimación.

### Ejemplo:

Supongamos una situación de incertidumbre respecto del modelado de un sistema inexistente, del que no se disponen datos. Sin embargo, después de consultar a expertos en el tema, se ha recogido sus opiniones con relación al ritmo de llegadas de las entidades al nuevo sistema. Sobre la base de estas se ha estimado que la razón de los arribos se producirán de acuerdo a las siguientes tasas:

8:00 – 13:00 hrs.: 150 unidades/hora

13:00 – 16:00 hrs.: 90 unidades/hora

Esta estimación será el punto de inicio, ya que servirá de base para comenzar a construir el modelo; es decir, ahora procedemos a generar el patrón preliminar de llegadas en Arena, veamos:

**Botón Derecho**

	Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1	TASAS DE ARRIBO PRELIMINARES	Duration	Arrival	Hours	1.0	2 rows

**Schedule**

Name: TASAS DE ARRIBO    Format Type: Duration

Type: Arrival

Time Units: Hours    Scale Factor: 1.0

Durations:

150, 5  
90, 3  
<End of list>

150 unid/hora (durante 5 horas)  
90 unid/hora (durante 3 horas)

Name: ARRIBOS    Entity Type: UNIDADES

Type: Schedule    Schedule Name: TASAS DE ARRIBO PRELIMINARES

Entities per Arrival: 1    Max Arrivals: Infinite

**Nota:** Dado que la media de la distribución exponencial es la inversa de la media de la Poisson, los arribos pueden expresarse como EXPO(0.4) y EXPO(0.66) minutos, que son equivalentes a las tasas 150 y 90 unid/hora, respectivamente.

## 5.1 Método Delphi<sup>4</sup>

En el contexto de una incertidumbre total acerca del sistema por modelar, también es importante disponer de la utilización sistemática del juicio intuitivo de un grupo de expertos. En este sentido, el método Delphi<sup>1</sup> puede ser de mucha utilidad para lograr nuestro objetivo; consiste en la interrogación a expertos con el fin de poner en evidencia las convergencias de opiniones y de obtener eventuales consensos de opiniones informadas. Es imprescindible que estas opiniones no se encuentren influenciadas por criterios de algunos expertos y resulta más efectivo si se garantiza el anonimato, la retroalimentación controlada y la respuesta estadística de grupo.

### 5.1.1 ¿Cuándo se aplica?

- Como previsión del comportamiento de variables conocidas; es decir, para evaluar el comportamiento de una variable conocida y así se puedan inferir posibles formas de comportamiento.
- En la determinación perspectiva de la composición de un sistema. Por ejemplo, en el caso de que los elementos del sistema por estudiar no sean conocidos, o que nunca hayan sido aplicados al objeto de estudio y la muestra se orienta a la determinación de la estructura posible del sistema o modelo por aplicar.

### 5.1.2 Desventajas

1. Permite la formación de un criterio con mayor grado de objetividad.
2. El consenso logrado sobre la base de los criterios es muy confiable.
3. La tarea de decisiones sobre la base de los criterios de expertos tiene altas probabilidades de ser eficiente.
4. Permite valorar alternativas de decisión.
5. Evita conflictos entre expertos al ser anónimo (lo que constituye un requisito imprescindible para garantizar el éxito del método) y crea un clima favorable a la creatividad.
6. El experto se siente involucrado plenamente en la solución del problema y facilita su implantación. Por ello, es importante el principio de voluntariedad del experto en participar en la investigación.
7. Garantiza libertad de opiniones (por ser anónimo y confidencial). Ningún experto debe conocer que a su igual se le están solicitando opiniones.

---

<sup>4</sup> MORÁGUEZ IGLESIAS, A. *Método Delphi*, 2006.

### **5.1.3 Ventajas**

1. Es muy laborioso y su aplicación demanda tiempo, debido a que se requiere como mínimo de dos vueltas para obtener el consenso necesario.
2. Es costoso en comparación con otros, ya que requiere el empleo de tiempo de los expertos, hojas, impresoras, teléfono, etcétera.
3. Precisa de buenas comunicaciones para economizar tiempo de búsqueda y recepción de respuestas.
4. Debe ser llevado a cabo por un grupo de análisis: los expertos como tales.
5. Se emiten criterios subjetivos, por lo que el proceso puede estar cargado de subjetividad, sometido a influencias externas.
6. De aquí la necesidad de aplicar varias vueltas, buscar técnicas variadas de análisis para obtener un consenso y pruebas estadísticas para determinar su grado de confiabilidad y pertinencia.

### **5.1.4 ¿A quiénes se puede considerar expertos?**

Se define como experto al individuo en sí, grupo de personas u organizaciones capaces de ofrecer valoraciones conclusivas de un problema en cuestión y hacer recomendaciones respecto a sus momentos fundamentales con un máximo de competencia.

De esta definición se infiere, como requisito básico para la selección de un experto, que tenga experiencia en el tema por consultar, dados sus años de trabajo (*praxis*), y que puedan ser complementados con conocimientos teóricos adquiridos a través de las distintas formas de superación, y grado académico o científico alcanzado en relación con el tema, entre otros.

# 1

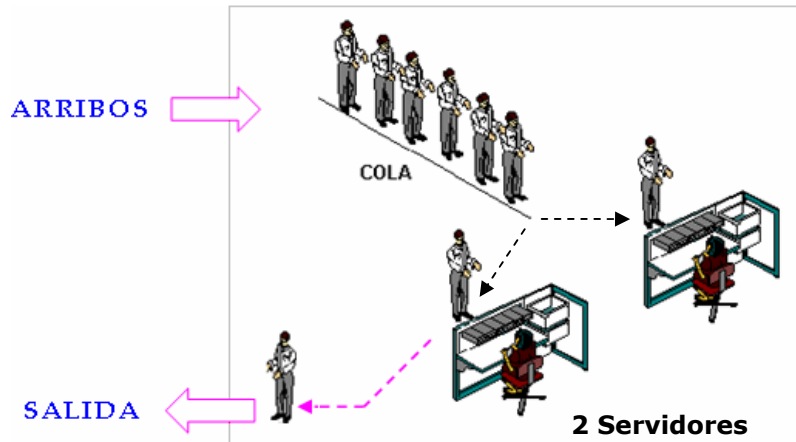
## Caso de estudio

### Ajuste de datos a distribuciones de probabilidad

**Objetivos:**

- o Análisis de los datos de entrada de la simulación y pruebas de ajuste.
- o Uso del software de soporte Arena: Input Analyzer.
- o Interpretación de los resultados de las pruebas de ajuste a una distribución de probabilidad: Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov.

Una consultora está desarrollando un proyecto de simulación y ha realizado una recolección de 100 datos de un sistema, por muestreo. Actualmente se encuentra en la etapa de análisis de los datos y las pruebas de ajuste.



**Hora de arribo (minutos)**

0	1.919	8.6159	9.1582	13.3581	16.9567	26.7171	49.7804	50.5358	55.7351
57.5342	59.9673	75.3134	84.9642	97.6494	109.1606	114.9662	133.7715	137.1232	137.7895
150.8904	153.922	154.1704	157.3554	165.4544	191.222	197.4771	200.7981	201.7438	217.2445
217.4044	222.1335	228.029	234.4795	244.529	246.3928	252.6865	254.4921	255.5802	263.0189
263.7679	265.461	270.1673	272.156	294.4025	295.7014	301.6728	303.3929	311.4686	315.1002
320.5921	321.6042	323.1597	328.1734	328.6417	328.9163	334.3784	334.6967	341.9377	355.041
358.8631	361.0628	370.0088	371.4213	390.957	391.1589	391.4436	392.8501	393.7212	405.0924
406.0092	408.3518	415.3314	419.4934	423.1651	432.9304	439.6687	452.621	464.5954	465.7782
468.1265	473.1742	475.8355	485.4762	492.5213	496.6938	499.6068	520.4413	535.2861	540.4478
548.2283	548.9668	564.9744	569.565	582.5219	584.5036	584.9783	595.1811	598.3683	601.3689
601.4736									

**Tiempo de servicio (minutos)**

17.6207	18.4162	17.0717	20.215	22.0788	17.0332	18.0054	19.5779	14.1625	19.4916
20.2214	19.2215	16.5017	17.7647	19.5815	20.1753	19.4535	19.5832	18.2376	20.1063
18.4756	15.6331	19.3055	17.4723	17.8405	19.3293	17.8301	20.316	19.1956	18.5177
19.4532	17.8659	18.5051	19.5811	16.7296	19.7286	15.3617	18.1435	19.586	15.496
16.5624	16.9024	17.2887	19.2479	21.7422	21.204	18.8582	19.6963	17.7036	16.2339
17.0687	18.9081	18.0621	16.841	19.2757	17.1194	21.4686	17.9123	16.6239	18.1015
15.9922	16.5089	17.4374	18.3379	18.818	14.3588	20.1829	15.4409	16.2228	20.4151
17.0591	18.4277	18.8298	18.5488	19.2973	18.0688	17.6553	16.0937	17.7281	20.3876
17.2332	17.4139	20.6933	17.172	18.4338	19.2277	18.8568	18.3887	16.1746	18.7084
16.4017	17.5388	19.8725	17.6583	16.569	17.1415	17.7234	18.422	17.2934	18.036

- a) Utilizando el software Input Analyzer determinar los mejores ajustes a los datos recolectados.
- b) Con la información obtenida, simular el sistema, considerando que el final de la simulación se da en el instante en que el cliente número 100 sale del sistema.

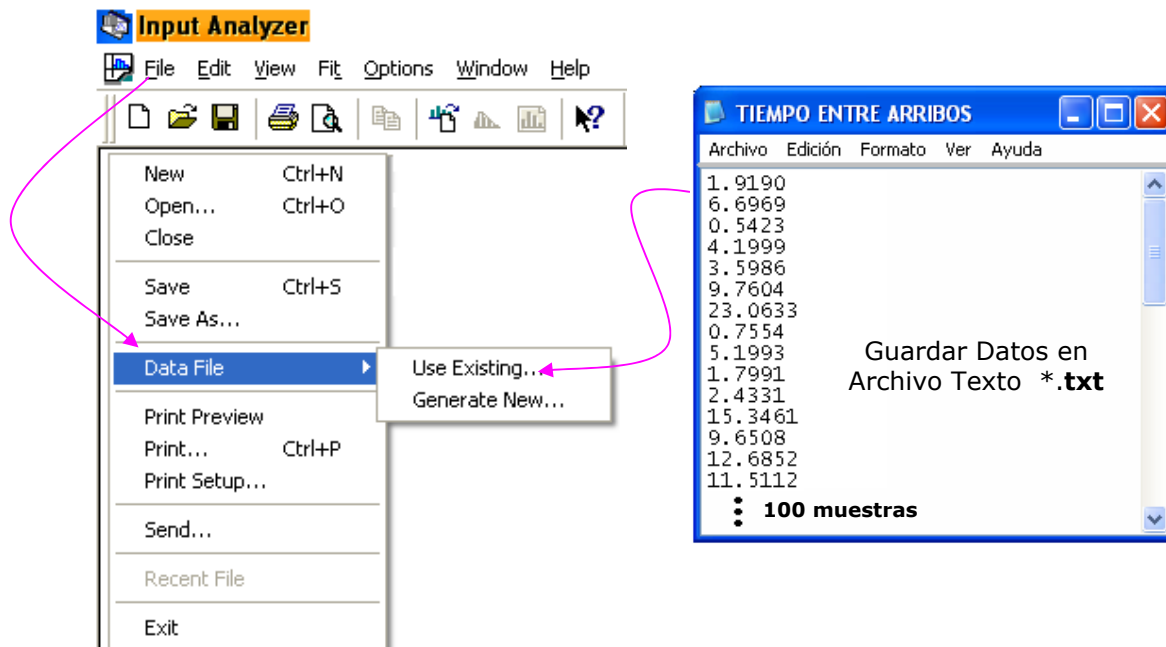
## Solución

Una vez recolectados los datos, estos deben acondicionarse de acuerdo a los requerimientos del modelo, en caso de que fuera necesario. En las tomas realizadas para la hora de arribo sí es necesario, ya que lo que se requiere son los tiempos entre arribos, es decir los intervalos.

### Tiempo entre arribos:

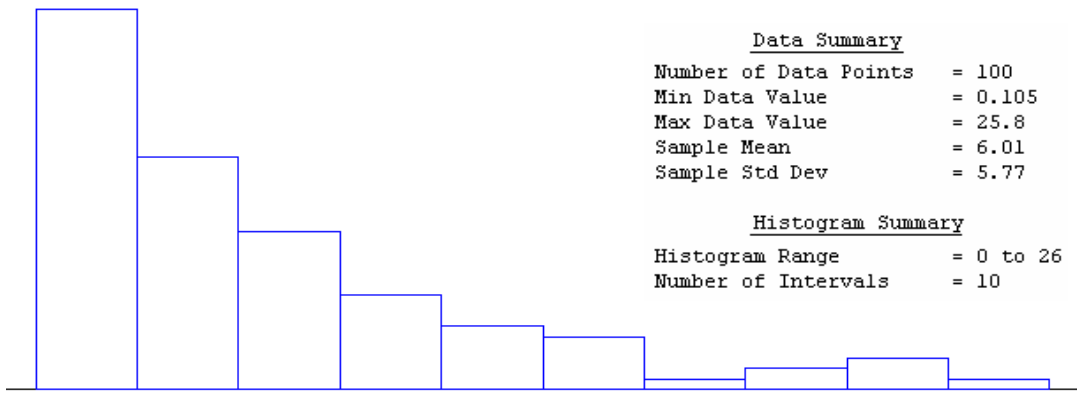
El tiempo que transcurre entre la llegada del primer cliente y el segundo fue de 1.919 minutos. En forma análoga, el intervalo entre la llegada del segundo y del tercer cliente fue de 6.6969 minutos. En total, son 100 *intervalos* (101 clientes), veamos:

1.919	6.6969	0.5423	4.1999	3.5986	9.7604	23.0633	0.7554	5.1993	1.7991
2.4331	15.3461	9.6508	12.6852	11.5112	5.8056	18.8053	3.3517	0.6663	13.1009
3.0316	0.2484	3.185	8.099	25.7676	6.2551	3.321	0.9457	15.5007	0.1599
4.7291	5.8955	6.4505	10.0495	1.8638	6.2937	1.8056	1.0881	7.4387	0.749
1.6931	4.7063	1.9887	22.2465	1.2989	5.9714	1.7201	8.0757	3.6316	5.4919
1.0121	1.5555	5.0137	0.4683	0.2746	5.4621	0.3183	7.241	13.1033	3.8221
2.1997	8.946	1.4125	19.5357	0.2019	0.2847	1.4065	0.8711	11.3712	0.9168
2.3426	6.9796	4.162	3.6717	9.7653	6.7383	12.9523	11.9744	1.1828	2.3483
5.0477	2.6613	9.6407	7.0451	4.1725	2.913	20.8345	14.8448	5.1617	7.7805
0.7385	16.0076	4.5906	12.9569	1.9817	0.4747	10.2028	3.1872	3.0006	0.1047

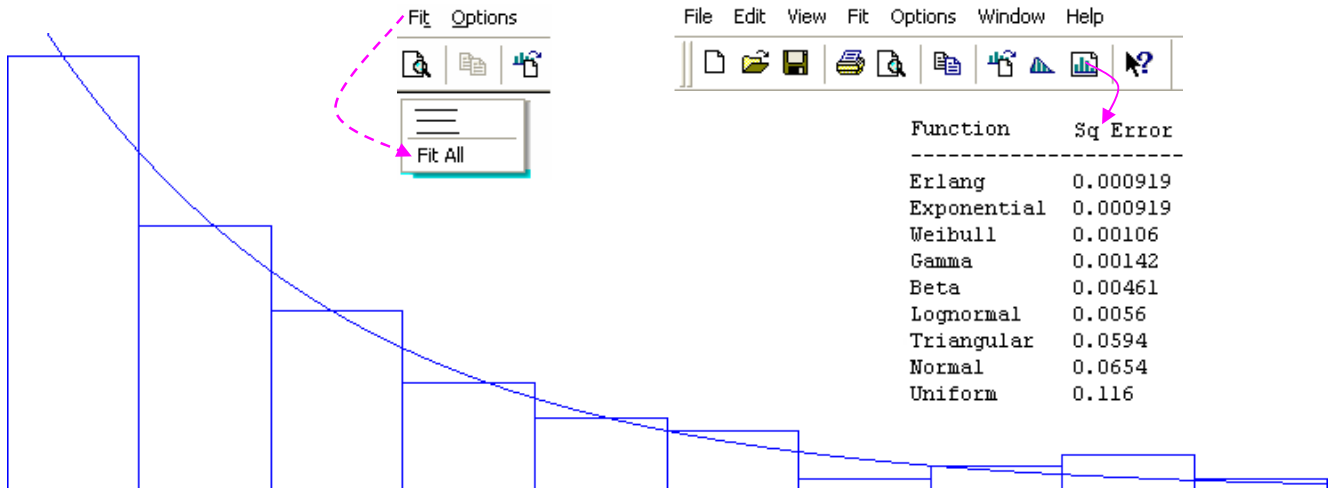


A continuación se muestra la gráfica y la estadística descriptiva, que genera el software Input Analyzer a un nivel preliminar. Esto representa simplemente una tendencia, antes de realizar el proceso de ajuste, veamos:





El siguiente paso es realizar el proceso de ajuste de los datos muestrales a una distribución teórica poblacional; el reporte del Input Analyzer también presenta los resultados de las pruebas Chi Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, veamos:



**Distribution Summary**

Distribution: Exponential ✓  
 Expression: EXP0(6.01) ✓  
 Square Error: 0.000919

**Chi Square Test**

Number of intervals = 5  
 Degrees of freedom = 3  
 Test Statistic = 0.417 ✓  
 Corresponding p-value > 0.75 ✓

**Kolmogorov-Smirnov Test**

Test Statistic = 0.0387 ✓  
 Corresponding p-value > 0.15 ✓

Según el reporte, la distribución teórica que logra una mejor representación de nuestros datos es la exponencial, con una media de 6.01 minutos. Las pruebas Chi-cuadrado y K-S arrojan un indicador  $p$  mayor que 0.75 y 0.15, respectivamente, ambos valores son mayores que el valor del riesgo 0.05 (5%). Valores de  $p$  más grandes, indican mejores ajustes. Según el *ranking*, la distribución exponencial tiene el menor error cuadrado (0.000919), solamente igualado por la distribución Erlang, que también presenta una buena calidad de ajuste, sin embargo se prefiere a la distribución exponencial, que es más conocida e identificada con los arribos.

**Tiempos de servicio:**

Con relación a los datos recolectados que corresponden a los tiempos de servicio, procederemos a realizar la prueba de bondad de ajuste, veamos:

Data Summary

Number of Data Points = 100  
 Min Data Value = 14.2  
 Max Data Value = 22.1  
 Sample Mean = 18.2  
 Sample Std Dev = 1.56

Distribution Summary

Distribution: Normal  
 Expression: NORM(18.2, 1.55) ✓  
 Square Error: 0.002543

Chi Square Test

Number of intervals = 5  
 Degrees of freedom = 2  
 Test Statistic = 1.36 ✓  
 Corresponding p-value > 0.509 ✓

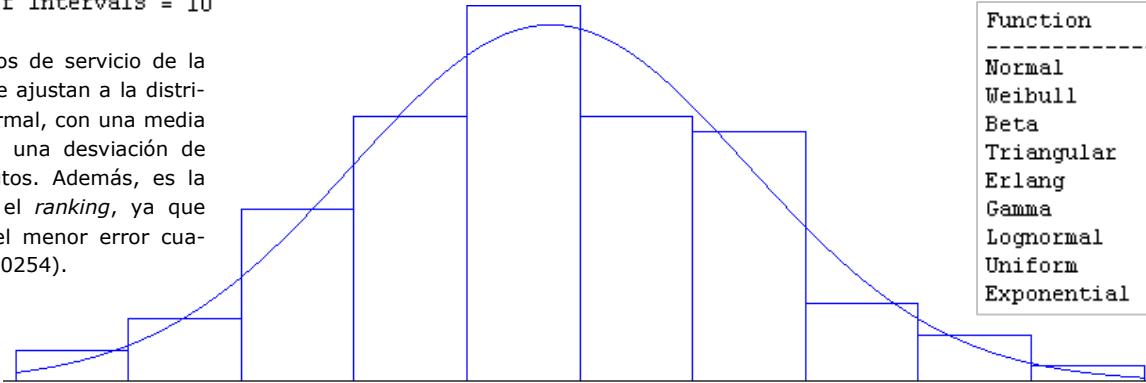
Kolmogorov-Smirnov Test

Test Statistic = 0.057 ✓  
 Corresponding p-value > 0.15 ✓

Histogram Summary

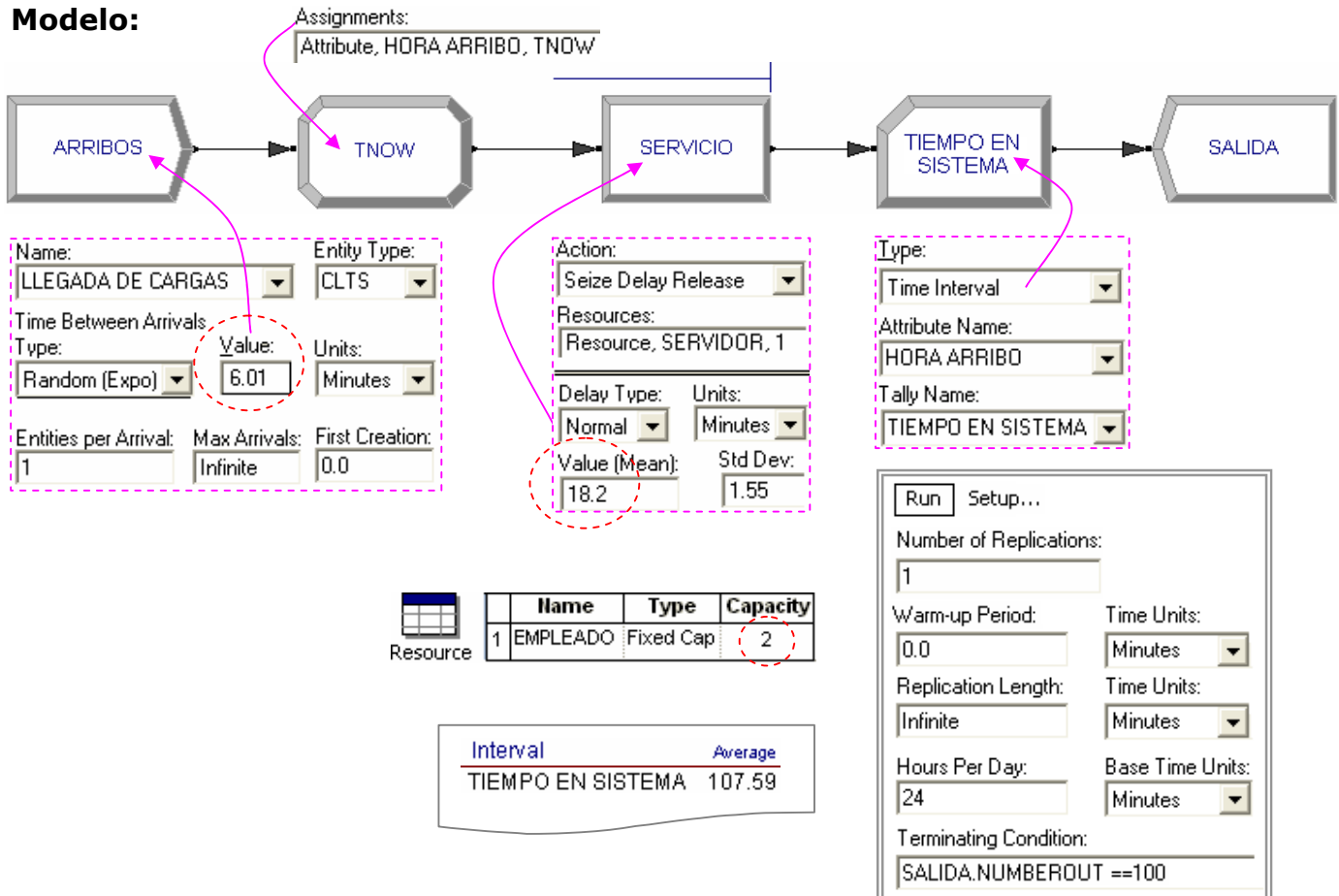
Histogram Range = 14 to 22.9  
 Number of Intervals = 10

Los tiempos de servicio de la muestra se ajustan a la distribución Normal, con una media de 18.2 y una desviación de 1.55 minutos. Además, es la mejor en el ranking, ya que presenta el menor error cuadrado (0.00254).



Function	Sq Error
Normal	0.00254
Weibull	0.00286
Beta	0.00345
Triangular	0.00689
Erlang	0.00948
Gamma	0.00952
Lognormal	0.0216
Uniform	0.0586
Exponential	0.0946

**Modelo:**

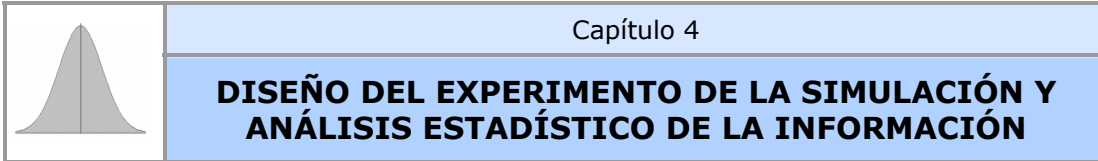


## Capítulo 4

# Diseño del experimento de simulación y análisis estadístico de la información

- Condiciones de inicio y fin de la simulación
- Especificaciones estadísticas
- Determinación del número de réplicas
- Técnicas de reducción de varianza
- Comparación de escenarios
- Prueba de normalidad
- Ejecución y análisis estadístico

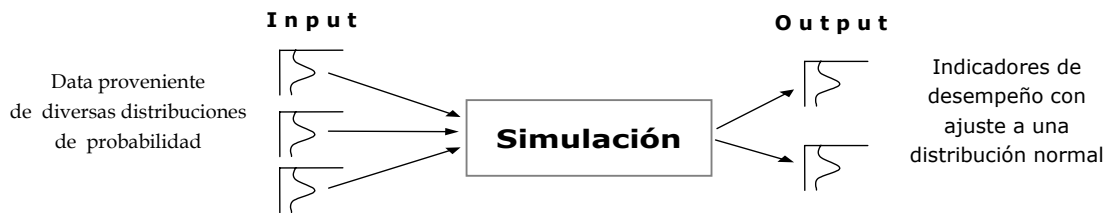
Desde que la simulación es de naturaleza estocástica, se presentan los aspectos fundamentales que se deben tomar en cuenta para configurar el experimento de simulación, identificando si el interés del estudio se centra en el conocimiento del comportamiento transitorio del sistema en el tiempo o en el comportamiento del sistema en el largo plazo. También se requiere cierto nivel de confiabilidad en el indicador que se está midiendo, por ello es necesario ejecutar múltiples réplicas al modelo, en función del nivel de precisión que se desee lograr y que afecte el intervalo de confianza del indicador. Asimismo, se presentan las técnicas de reducción de varianza de los resultados, con lo cual se logra un mayor factor aleatorio entre los valores y una disminución de la dependencia entre ellos. Realizado el experimento, el análisis estadístico de los resultados es un factor crítico para obtener conclusiones o comparaciones estadísticamente válidas. En este sentido, los valores obtenidos deben pasar la prueba de normalidad, solo así se podrá realizar inferencia estadística y las conclusiones serán válidas para un determinado nivel de confianza.



La simulación por sí misma no optimiza un sistema ni provee soluciones, este es trabajo del modelador y del usuario del modelo. La simulación simplemente evalúa soluciones proveyendo estimados e indicadores de cómo se desempeña el sistema en estudio. Para bosquejar conclusiones útiles de los resultados de la simulación es necesario que se genere información relevante y confiable, y que la información obtenida sea correctamente analizada e interpretada.

Lo que se busca en los resultados de la simulación depende de las respuestas que estemos buscando. Si solo deseamos conocer el concepto del sistema dinámico, entonces con la animación del modelo es suficiente; si lo que se busca es conocer su comportamiento transitorio en el tiempo, entonces cada período individual del tiempo durante la simulación puede ser de interés. Para el análisis de los sistemas de estado estable las condiciones iniciales se descartan y la atención se centra en el comportamiento del sistema en el largo plazo.

Para lograr un cierto nivel de confiabilidad en el indicador de desempeño que se está midiendo es necesario ejecutar  $N$  réplicas al modelo de simulación. Así, sobre la base del Teorema del Límite Central los  $N$  valores promedio del indicador que se logren, producto de las  $N$  réplicas conforman un conjunto de valores que se ajustarán a una distribución de probabilidad normal. Esto es imperativo que se cumpla, por ello, los resultados deben pasar la prueba de normalidad, solo así el analista podrá realizar inferencia estadística al indicador y las conclusiones a las que lleguemos serán válidas para un determinado nivel de confianza.



El análisis estadístico<sup>1</sup> de los resultados de la simulación es requerido cuando se desea ejecutar uno de los siguientes tipos de experimentos:

- Encontrar el desempeño esperado de un diseño particular del sistema.
- Comparar alternativas en cuanto a la configuración de sistemas.
- Encontrar el valor óptimo para una variable de decisión en particular.
- Hallar la combinación de valores óptimos para dos o más variables de decisión.
- Determinar la sensibilidad del modelo debido a cambios en una o más variables.

<sup>1</sup> Basado en HARRELL, CH. y K. TUMAY. *Simulation made easy. A managers guide*, 1995.

## 1. CONDICIONES DE INICIO Y FIN DE LA SIMULACIÓN

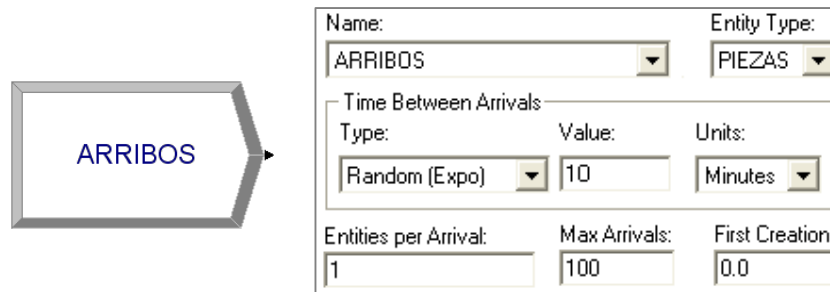
Cuando decidimos cuál será la longitud de la simulación, es decir, durante cuánto tiempo vamos a simular o ejecutar el modelo, por lo general nos encontramos con dos situaciones diferentes: simulación de estado transitorio y simulación de estado estable.

### 1.1 Simulación de estado transitorio

La simulación es de estado transitorio cuando el sistema empieza vacío y después de un tiempo de funcionamiento termina por ausencia de eventos, es decir cuando el sistema queda vacío. Se produce porque durante la simulación, por alguna condición del modelo, ya no habrá más ingresos de entidades al sistema, esto origina que en el transcurso del tiempo las entidades todavía en proceso irán saliendo una por una, hasta que el sistema queda vacío, entonces termina la simulación. Finaliza porque ya no se generan más eventos, pues ya no hay entidades dentro del sistema. El sistema terminó como empezó, es decir vacío. Veamos algunos ejemplos.

#### Ilustración 1

La producción de una empresa metalmecánica que trabajará hasta cumplir con el pedido programado del día, por ejemplo 100 piezas. Las piezas llegan a la planta con un tiempo entre arribos que corresponde a una distribución exponencial con una media de 10 minutos. En este caso el inicio y el final están definidos. Si bien no se sabe la hora de finalización de la simulación, sí se tiene la certeza de que acabará cuando se haya cumplido con todo el pedido, es decir con las 100 unidades. No quedará producción en proceso.

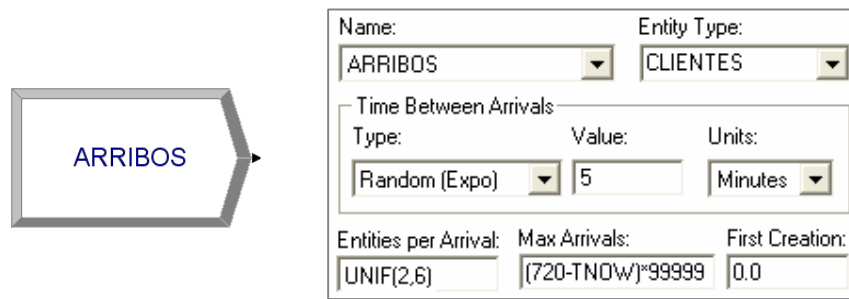


El diagrama muestra un evento de llegada etiquetado como 'ARRIBOS' con una flecha que apunta a un cuadro de configuración. El cuadro de configuración contiene los siguientes campos:

Name:	ARRIBOS	Entity Type:	PIEZAS
Time Between Arrivals			
Type:	Random (Expo)	Value:	10
		Units:	Minutes
Entities per Arrival:	1	Max Arrivals:	100
		First Creation:	0.0

#### Ilustración 2

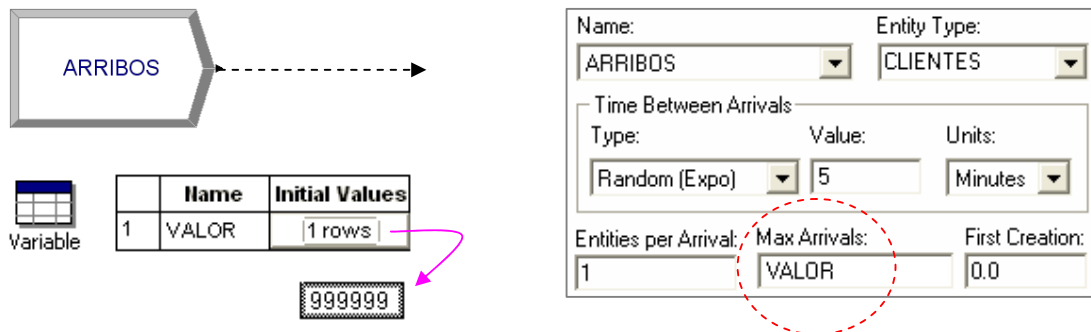
El arribo de los clientes a un restaurante se produce entre las 12 del día y las 12 de la noche, con un intervalo entre llegadas que se ajusta a una distribución exponencial, con una media de 5 minutos; en cada arribo llegan entre 2 y 5 personas, de manera uniforme. El local impide el ingreso de más clientes después de las 12 de la noche; sin embargo, la atención continúa para los clientes que quedan dentro del establecimiento, estos van saliendo a medida que transcurre el tiempo. Cuando sale el último cliente el sistema queda como al inicio, vacío, sin clientes, entonces termina la simulación.



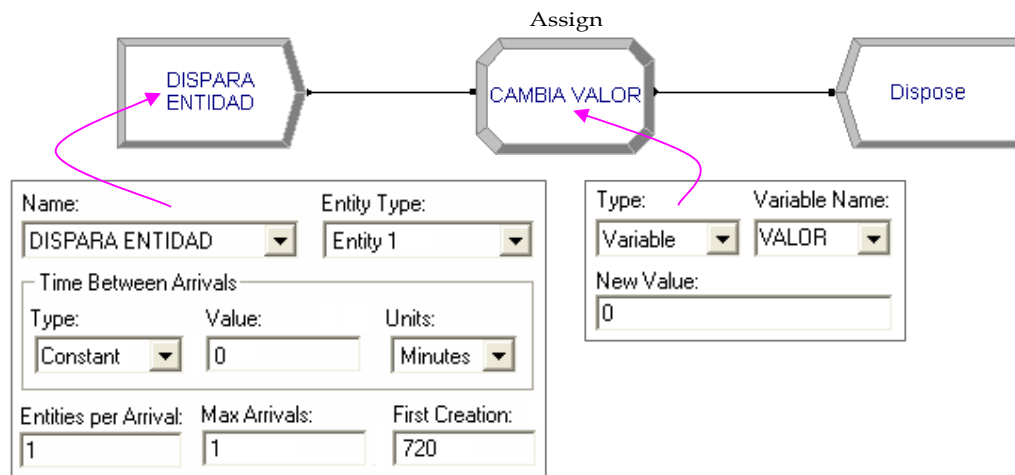
En este caso, el número de entidades por arribo pertenece a una distribución uniforme discreta, con intervalo abierto en el extremo derecho:  $2 \leq X < 6$ .

El objetivo de la expresión  $(720-tnow)*99999$  es impedir el ingreso de entidades al sistema. Cuando la variable Tnow alcanza el valor de 720 (12 horas), entonces la diferencia se hace cero. Este salto que toma el campo Max Arrivals, de un valor infinito (99999) a un valor cero, desactiva el módulo Create, impidiendo que genere más entidades. Mientras el tiempo de simulación no alcance las 12 horas, la cantidad de entidades que pueden ingresar al sistema es infinita.

Esta ilustración se puede modelar de una manera alternativa, veamos:



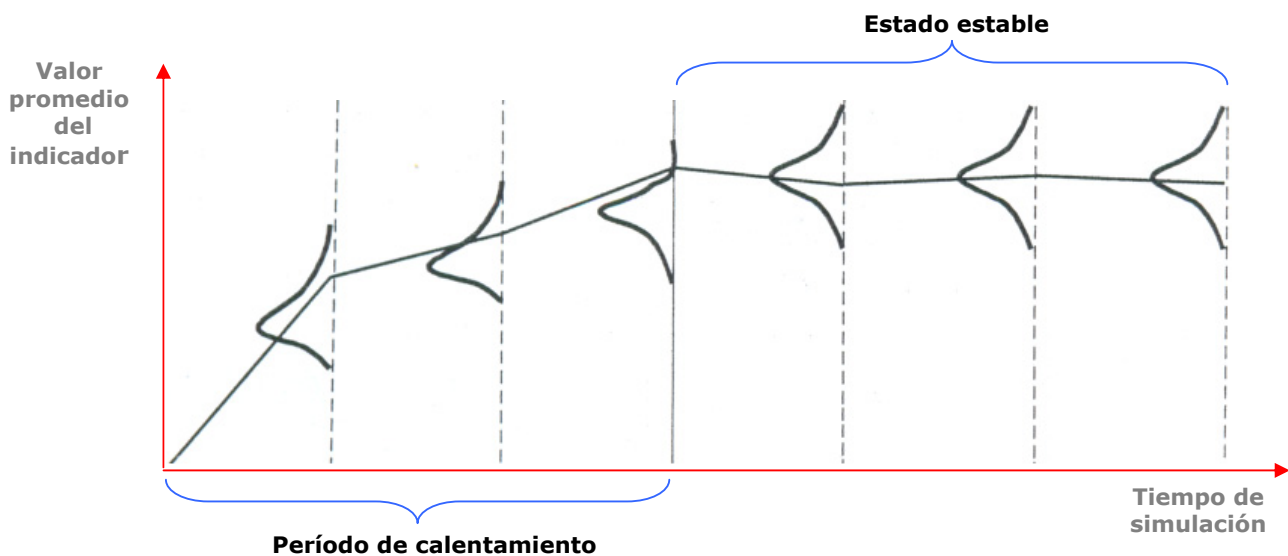
Añadimos al modelo una red auxiliar:



Observe que el módulo Create dispara una entidad a los 720 minutos (First Creation), luego esta ingresa al módulo Assign y cambia la variable valor a cero. Dado que valor es una variable global esta afecta a la red principal (arribos) y Max Arrivals se hace cero. Lo cual impedirá el ingreso de entidades al sistema.

## 1.2 Simulación de estado estable

La simulación es de estado estable cuando su funcionamiento no tiene término, o tiene a infinito. Imagínese el funcionamiento de la estación de bomberos, el funcionamiento de la comisaría de un distrito, el funcionamiento de las estaciones climáticas que tenemos todos los años o el funcionamiento del tanque de agua de un edificio; en estos casos, el funcionamiento se realiza durante las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 12 meses del año y siguen funcionando. En este contexto, la simulación se ejecuta por un período predeterminado, asegurándonos de que sea suficiente para lograr los objetivos del estudio. Por lo general se alcanza un estado estable después de un período de calentamiento o Warm-up, que parte de las condiciones iniciales. Es importante definir este período de calentamiento en el experimento de simulación, para recortarlo y no considerar las estadísticas que se generan en este período, por ser sesgadas y no representativas.



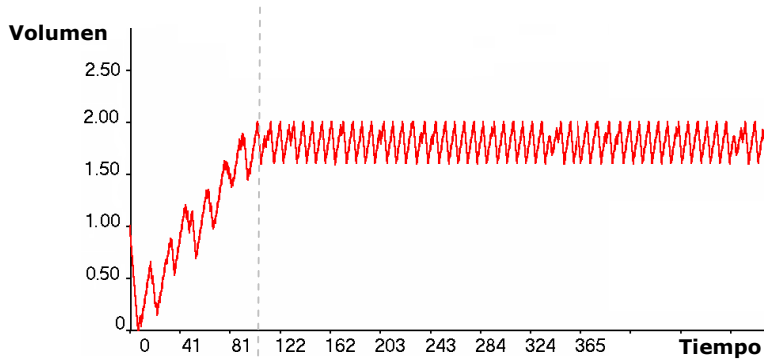
En un estado estable el interés se centra en identificar el instante en que el indicador alcanza estabilidad. Si un modelo empieza vacío, sin entidades, entonces tomará algún tiempo antes de que se encuentre el estado estable. Una condición para el estado estable es que la variable de respuesta (nuestro indicador) muestre cierta regularidad estadística. Observemos en la gráfica anterior que durante este estado la distribución de los valores de la variable de respuesta es aproximadamente la misma de un período de tiempo al siguiente, es decir, los cambios de la variable de respuesta son pequeños cuando se ha alcanzado el estado estable.

El tiempo que toma alcanzar el estado estable es una función de los tiempos de actividad y de la cantidad de actividades involucradas. Para algunos modelos el estado estable se puede alcanzar en pocas horas, sin embargo, en otros posiblemente tome cientos de horas. En el modelado del comportamiento del estado estable se tiene el problema de determinar cuándo el modelo encuentra el estado estable. Existen varios métodos para determinar en qué instante se obtiene el estado estable para el modelo; el más sencillo es ejecutar, en forma preliminar, unas pocas replicaciones (entre 5 y 10) para el modelo, luego, en forma progresiva en el tiempo, ir obteniendo valores promedio para el indicador, los cuales pueden dibujarse en una gráfica y observar el comportamiento del indicador en el tiempo.



*Ilustración 1*

El funcionamiento del tanque de un edificio que suministra agua a varios departamentos tiene una capacidad de 2 metros cúbicos y se abastece de una cisterna. Al inicio, durante su instalación, tiene un nivel de 1 metro cúbico, dado el consumo, entonces baja su nivel a cero. Inicialmente, durante algún tiempo, el nivel del tanque se mantendrá inestable.



En la gráfica de arriba observamos que el nivel se estabiliza aproximadamente a los 100 días y alcanza su capacidad, luego el volumen del tanque se mantendrá dentro de un rango de variación, es decir se impide que baje mas allá de un nivel mínimo, entonces el volumen se mantendrá estable dentro de un intervalo.

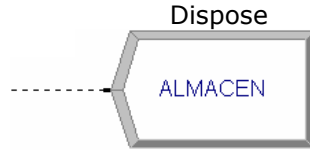
A la derecha se observa la configuración de la simulación con un período de calentamiento (Warm-up) de 100 días y una longitud de la réplica igual a 365 días. El reporte de estadísticas no considerará el período de calentamiento.

Run Setup		Replication Parameters	
Number of Replications:	40	Initialize Between Replications:	
		<input checked="" type="checkbox"/> Statistics	<input checked="" type="checkbox"/> System
Start Date and Time:	Viernes, 12 de Septiembre de 2008 03:57:21 p.m.		
Warm-up Period:	100	Time Units:	Days
Replication Length:	365	Time Units:	Days
Hours Per Day:	24	Base Time Units:	Minutes
Terminating Condition:			

*Ilustración 2*

Suponga que la finalización de la simulación de un determinado proceso de producción sucederá cuando salgan 200 unidades terminadas del sistema.

Esta situación podemos modelarla de diversas formas. Una primera alternativa es mediante una condición de terminación, que haga referencia al paso de 200 entidades por el módulo Dispose, veamos:



La simulación se configura para que termine cuando se dé una condición:

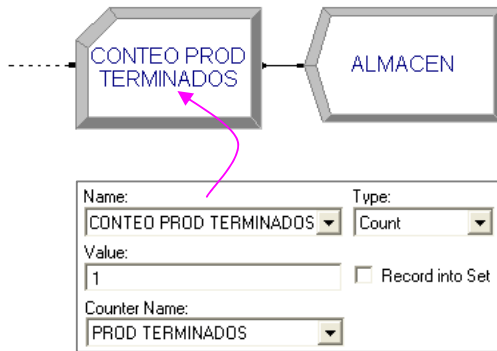
$$\text{ALMACEN.NumberOut} == 200$$

En el instante que sale la entidad número 200 se interrumpe la ejecución del modelo y finaliza la simulación. Esta terminación es forzada y dejará unidades en proceso o inconclusas. A diferencia de una terminación natural como la de un estado transitorio.

The 'Run Setup' dialog box contains the following fields:
 

- Number of Replications: 1
- Warm-up Period: 0.0, Time Units: Hours
- Replication Length: Infinite, Time Units: Hours
- Hours Per Day: 24, Base Time Units: Minutes
- Terminating Condition: ALMACEN.NumberOut == 200

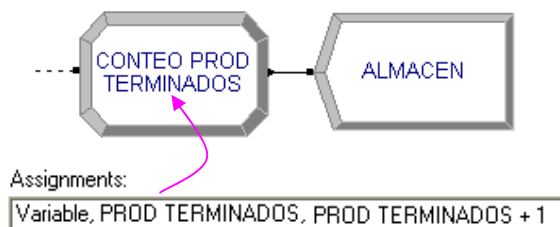
Otra alternativa que modela nuestra ilustración puede ser incluyendo la condición en el módulo de datos Statistic, que hace referencia al contador del módulo Record:



The 'Run Setup' dialog box is identical to the previous one, but the 'Terminating Condition' field is currently empty.

Statistic	Name	Type	Counter Name	Limit
1	PARAR SIMULACION	Counter	PROD TERMINADOS	200

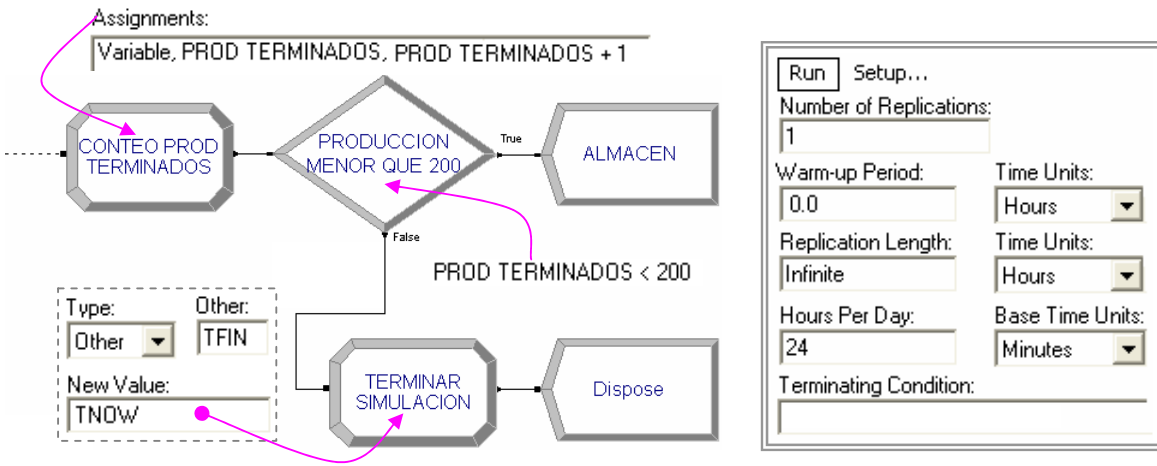
Una alternativa más puede ser incluyendo una variable global como contador y hacer referencia de ella en el Run Setup, veamos:



The 'Run Setup' dialog box is identical to the previous one, but the 'Terminating Condition' field is now set to:
 

```
PROD TERMINADOS == 200
```

Una última alternativa que plantearemos será la inclusión de la variable TFIN. Si una condición es verdadera, entonces, desde el modelo podemos interrumpir y terminar la simulación; veamos:



## 2. ESPECIFICACIÓN DE ESTADÍSTICAS

La decisión de cuán precisos deben ser los datos de la simulación depende de la naturaleza del problema, la importancia de la decisión y el grado de validez de los datos de entrada. Podemos clasificar en dos tipos de reporte de salida de la simulación:

### 2.1 Estadísticas por observaciones

Reportan el número de ocurrencias de un determinado incidente. El reporte estadístico muestra el número de observaciones por unidad de tiempo.

*Ejemplo 1:*

El número de entidades procesadas por hora, a través del sistema. Esto se obtiene contando todas las entidades que abandonaron el sistema durante la simulación y dividiendo dicho valor entre el tiempo de simulación.

*Ejemplo 2:*

El tiempo promedio que las entidades permanecen en el sistema. Cada vez que sale una entidad del sistema se registra su tiempo de permanencia; es decir, restando la hora de salida menos la hora de ingreso. Para obtener el tiempo promedio en el sistema simplemente se suman los registros de permanencia individuales y el tiempo acumulado se divide entre el número de entidades que salieron del sistema.

## 2.2 Estadísticas dependientes del tiempo

Reportan el valor de una variable de respuesta con relación al tiempo, es decir reportan valores persistentes en el tiempo. Durante la simulación se mantiene el valor actual de la variable.

### *Ejemplo:*

El número promedio de entidades en el sistema (WIP). En este caso, cada vez que una entidad ingresa o sale del sistema el valor actual del contador se multiplica por el tiempo desde el último cambio, este producto (entidad\*tiempo) se va acumulando y el contador se actualiza. El indicador se obtiene al finalizar la simulación, dividiendo el valor del producto acumulado entre el tiempo de la simulación.

## 2.3 Otras medidas particulares

Las estadísticas por observaciones y las dependientes del tiempo proveen información útil acerca del comportamiento del sistema; sin embargo, se pueden obtener del reporte algunas medidas específicas de los elementos del modelo. Veamos:

- Estadísticas sobre entidades
  - Total de entidades que ingresaron y salieron del sistema, clasificadas por tipo.
  - Tiempo promedio que las entidades expendieron en proceso efectivo, en espera, en transporte, etcétera.
  - Número de entidades en proceso, durante la simulación (Work in Process)
- Estadísticas sobre colas
  - Tiempo promedio, mínimo y máximo de permanencia en cola.
  - Tamaño promedio, mínimo y máximo de la cola.
- Estadísticas sobre recursos
  - Número de veces utilizado.
  - Porcentaje de utilización, etcétera.

### 3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE RÉPLICAS<sup>2</sup>

Los resultados de una réplica del modelo de simulación representan solo una muestra del comportamiento del sistema real. La pregunta es: ¿a partir de esta muestra se podría inferir sobre él?, ¿podríamos tomar decisiones a partir de una sola réplica?

Un método esencial para mejorar la fiabilidad de los resultados es ejecutar más de una réplica independiente. Múltiples e independientes réplicas del modelo son siempre requeridas cuando se trabaja en simulación estocástica (aleatoria).

El análisis estadístico del reporte generado es un factor crítico para hacer conclusiones válidas. Los valores obtenidos de las variables de interés se analizarán mediante intervalos de confianza y pruebas de hipótesis para la comparación de escenarios.

#### 3.1 Muestras preliminares (n)

Un primer paso en la determinación del número de réplicas es fijar una cantidad de réplicas que represente una muestra piloto. Este número de réplicas preliminares se define a criterio del analista y los resultados servirán como punto de partida para la obtención de algunos parámetros preliminares como la media y la desviación estándar, que se utilizarán para la obtención del número de réplicas y los intervalos de confianza.

#### 3.2 Determinación del número de réplicas (N)

Los parámetros obtenidos al ejecutar el modelo con un número de réplicas preliminares (n) nos servirán para determinar el tamaño del experimento de simulación. La distribución por utilizar depende del número de réplicas preliminares adoptado.

$$n < 30 \quad N = \left[ \frac{t_{(n-1, 1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2 \quad n > 30 \quad N = \left[ \frac{Z_{(1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2$$

**N:** Número de réplicas que el modelo necesita para alcanzar un nivel de confianza deseado.

**n:** Muestra preliminar (número de réplicas preliminares).

**S<sub>(n)</sub>:** Valor estimado de la desviación estándar  $\sigma$ , en base a la muestra preliminar n.

**e:** Es la mitad del ancho del intervalo de confianza para  $\mu$  (HalfWidth). Es un factor de precisión, representa el error entre la media estimada  $\bar{X}(n)$  y la media verdadera  $\mu$  (media teórica), que estamos dispuestos a tolerar.

**t<sub>(n-1, 1- $\alpha$ /2)</sub>:** Es un valor de tabla de la distribución t de Student con n-1 grados de libertad y  $\alpha$  es un parámetro usado para definir la probabilidad que el error entre la media estimada  $\bar{X}(n)$  y la media verdadera  $\mu$  excederá en una cantidad específica "e".

**Z<sub>(1- $\alpha$ /2)</sub>** Es un valor de tabla de la distribución Normal,  $\alpha$  es la probabilidad que el error entre la media estimada  $\bar{X}(n)$  y la media verdadera  $\mu$  excederá en una cantidad específica "e".

<sup>2</sup> Basado en ProModel Corporation. Manual de referencia, 1998.

### 3.3 Intervalos de confianza para $\mu$

Un intervalo de confianza para la media verdadera es un intervalo de valores calculado a partir de los datos de la muestra, que se espera contenga la verdadera media con un cierto valor de probabilidad denominado nivel de confianza o confiabilidad.

$$n < 30 \quad \bar{X} \pm t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad \bar{X} \pm Z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad n > 30$$

Este intervalo nos dirá qué tan seguros podemos estar que el parámetro de la media verdadera  $\mu$  está contenida dentro de nuestro intervalo calculado.

#### 3.3.1 Factor de precisión

El HalfWidth es la mitad del ancho del intervalo de confianza y representa un factor de precisión.

$$HalfWidth = \frac{L_S - L_I}{2}$$

HalfWidth: Mitad del ancho del intervalo de confianza para  $\mu$

$L_S$ : Límite superior del intervalo de confianza

$L_I$ : Límite inferior del intervalo de confianza

Para el ejemplo anterior tenemos:  $HalfWidth = \frac{11.16 - 11.0}{2} = 0.08$

Existe una relación inversa entre la mitad del ancho del intervalo (HalfWidth) y el tamaño de  $n$ :

$$HalfWidth = Z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}}$$

a menor número de réplicas mayores son el riesgo y el ancho del intervalo. Una manera de reducir el intervalo de confianza es aumentar el número de réplicas  $n$ .

Conclusión:

A mayor número de réplicas mayor precisión y menor HalfWidth.

$$\text{Intervalo de confianza} = \bar{X} \pm HalfWidth \rightarrow [11, 11.16]$$

### 3.4 Teorema del Límite Central

Dada una variable aleatoria cualquiera, si extraemos muestras de tamaño  $m$  ( $m > 30$  observaciones) y calculamos los promedios muestrales, entonces:

- Dichos promedios tienen distribución aproximadamente normal.
- La media de los promedios muestrales es la misma que la de la variable original.

- La desviación típica de los promedios disminuye en un factor "raíz de m" (error estándar).
- Las aproximaciones anteriores se hacen exactas cuando m tiende a infinito.

Este teorema justifica la importancia de la distribución normal. El objetivo de estas pruebas es verificar que se aplica el Teorema del Límite Central (TLC) para el indicador del estudio. Dado que el tamaño de la muestra m es el número de observaciones que hay en una réplica y N es el número de réplicas que el modelo necesita para alcanzar un nivel de confianza deseado, podemos afirmar en base al Teorema del Límite Central que los N valores promedio que se logren producto de las N réplicas, conforman un conjunto de valores que se ajustarán a una distribución de probabilidad normal, siempre que m sea grande (m > 30 observaciones) por cada réplica.

*Ejemplo 1:* Uso de la distribución "t de Student" (n < 30)

El esquema siguiente representa la solución a un caso supuesto, cuya variable de interés es la estimación del tiempo de ciclo promedio del proceso de producción de engrajes:

- **Muestra preliminar** (n = 5 réplicas)

Un primer paso para determinar el número de réplicas "N" del experimento de simulación consiste en establecer, en forma preliminar, una cantidad "n" de réplicas que nos servirán para obtener algunos parámetros que se requieren para obtener "N". En nuestro caso hemos fijado un experimento de 5 réplicas, los resultados promedio son los siguientes:

Para n = 5                      Tiempo de ciclo promedio = 30.56 minutos  
     Desviación estándar  $S_{(5)}$  = 8.01 minutos

- **Determinación del número de réplicas (N)**  
   n = 5

$S(n) = 8.01$

**Grados de libertad** = n-1 = 4

**Nivel de confianza propuesto:**  $1-\alpha = 90\%$

**Probabilidad de error:**                       $\alpha = 10\%$

$t_{(n-1, 1-\alpha/2)} = t_{(4, 0.95)} = 2.132$  (ver tabla t de Student)

**Error** e = 3 minutos error propuesto  $\bar{X} \pm e$  respecto a la media verdadera  $\mu$ .

$$N = \left[ \frac{t_{(n-1, 1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2 \quad \rightarrow \quad N = \left[ \frac{2.132 * 8.01}{3} \right]^2 = 32.4$$

**N = 33 Réplicas**

• **Determinación del intervalo de confianza para  $\mu$**

Nivel de confianza propuesto:  $1-\alpha = 90\%$

$$\bar{X} \pm t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad \rightarrow \quad 30.56 \pm 2.132 \sqrt{\frac{8.01^2}{5}}$$

Intervalo para un nivel de confianza del 90%: [22.93, 38.19]

Elegimos un  $\mu$  puntual dentro del intervalo de confianza, por ejemplo  $\mu = 30$ , tal que:

$$\mu \pm e = 30 \pm 20 \quad \rightarrow \quad [10, 50]$$

**Interpretación:**

La lectura del intervalo [10, 50] nos dice que si realizamos, por ejemplo, 100 experimentos con diferente secuencia de números aleatorios para cada uno, y considerando 33 réplicas por cada experimento, la probabilidad de que ese intervalo contenga el valor de la media verdadera  $\mu$  es del 90%. La probabilidad de que se salga de dicho intervalo es del 10%.

*Ejemplo 2:* Uso de la distribución Normal ( $n > 30$ ).

Suponga el caso de un procesador central donde la variable de interés es la estimación del tiempo de ciclo promedio que demora un mensaje en ser procesado. El resultado para una sola corrida es el siguiente:

Muestra preliminar Ejemplo:  $n = 40$  réplicas

En forma análoga al ejemplo 1, establecemos un número de réplicas preliminares, que para el caso hemos fijado en 40. A continuación se presentan los resultados promedio:

Para $n = 40$	Tiempo de ciclo promedio = 11.08 minutos
	Desviación estándar $S_{(40)} = 0.257$ minutos

**Determinación del número de réplicas (N)**

$n = 40$

Media estimada  $\bar{X} = 11.08$

$S(n) = 0.257$

**Nivel de confianza** propuesto:  $1-\alpha = 95\%$

**Probabilidad de error:**  $\alpha = 5\%$

$Z_{(1-\alpha/2)} = Z_{(0.975)} = 1.96$

**Error:**  $e = 0.1$  minutos, error propuesto:  $\bar{X} \pm e$  respecto a la media verdadera  $\mu$

$$N = \left[ \frac{Z_{(1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2 \quad \rightarrow \quad N = \left[ \frac{1.96 * 0.257}{0.1} \right]^2 = 25.37 \quad \boxed{N = 26 \text{ réplicas}}$$



**Determinación del intervalo de confianza para  $\mu$ :**

$$\bar{X} \pm Z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad \rightarrow \quad 11.080 \pm 1.96 \sqrt{\frac{0.257^2}{40}}$$

Intervalo de confianza: **[11, 11.16]**

Elegimos un  $\mu$  puntual dentro del intervalo de confianza, por ejemplo  $\mu = 11.1$ , tal que:

$$\mu \pm e = 11.1 \pm 0.1 \rightarrow [11.0, 11.2]$$

**Interpretación:**

La lectura del intervalo [11.0, 11.2] nos dice que si realizamos, por ejemplo, 10 experimentos con diferente secuencia de números aleatorios para cada uno, y considerando 26 réplicas por cada experimento, la probabilidad de que ese intervalo contenga el valor de la media verdadera  $\mu$  es de 95%. La probabilidad de que se salga de dicho intervalo es del 5%.

*Ejemplo 3:* Medición de tiempos de maquinado de piezas

Se desea determinar el número de réplicas (**N**) y el intervalo de confianza que tendrá nuestro experimento final de simulación, establecemos un número de réplicas preliminares (**n**) que tentativamente designamos en **10**. Se ha fijado un error de **20** minutos, que estamos dispuestos a aceptar, en la diferencia entre el tiempo promedio estimado  $\bar{x}$  y la media verdadera  $\mu$  (media teórica). Asumiremos un nivel de confianza del **90%** que  $\bar{x}$  no varía de  $\mu$  por más de **20** minutos. Resumiendo, tenemos:

**n** = 10

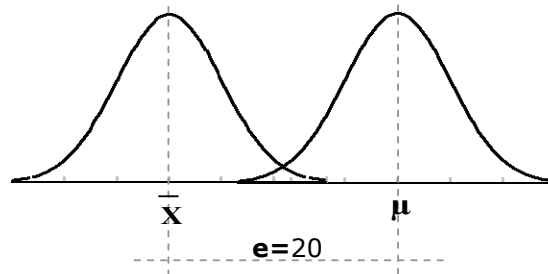
**Grados de libertad** = n-1 = 9

**Nivel de confianza propuesto:**  $1-\alpha = 90\%$

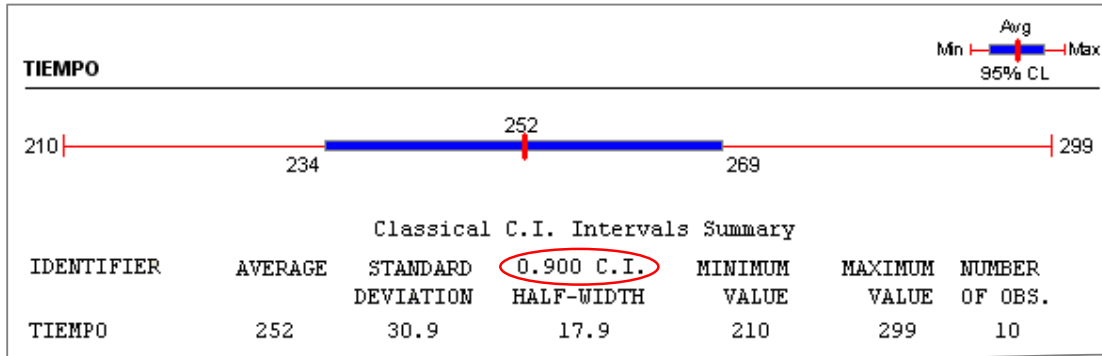
$t_{(n-1,1-\alpha/2)} = 1.833$  (ver tabla t de Student)

**Probabilidad de error:**  $\alpha = 10\%$

**Error:**  $e = 20$  minutos  $\bar{x} \pm e$  (respecto a la media verdadera  $\mu$ )



Seguidamente, ejecutamos el modelo sobre la base de las 10 réplicas preliminares y analizamos el reporte del Output Analyzer:

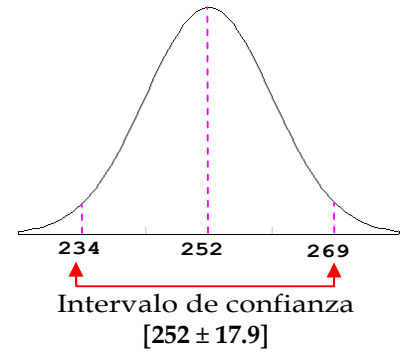


$\bar{X} = 252$  minutos (Media estimada)

$S_{(10)} = 30.9$  minutos (Desviación estándar)

HalfWidth = 17.9 minutos (Mitad del ancho del intervalo)

Intervalo de confianza para  $\mu$ :  $252 \pm 17.9 \rightarrow [234.1, 269.9]$



Si bien estos parámetros los obtenemos directamente del Output Analyzer, también podemos determinarlos en forma analítica, veamos:

Secuencia	Tiempos Promedios	$(x_i - \bar{X}_{(10)})^2$
10		
1	290.75	1535.88
R 2	227.12	597.30
E 3	210.22	1709.60
P 4	242.55	81.21
L 5	235.27	265.50
I 6	245.07	42.15
C 7	268.23	277.80
A 8	298.70	2222.21
S 9	218.62	1085.43
10	279.10	758.07

$$S^2_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_{(n)})^2}{n-1}$$

$$S^2_{(10)} = \frac{8575.16}{9} = 952.79556$$

$\bar{X}_{(10)}$	251.56	$\sum$	8575.16
------------------	--------	--------	---------

$$S_{(10)} = 30.9$$

$$HalfWidth = t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \rightarrow HalfWidth = t_{(9, 0.95)} \sqrt{\frac{30.9^2}{10}}$$

Existe una relación inversa entre la mitad del ancho del intervalo (HalfWidth) y el tamaño de n.

$$HalfWidth = 1.833 * 9.77 = 17.9$$

Intervalo de confianza para  $\mu$ :  $252 \pm 17.9 \rightarrow [234.1, 269.9]$

Con la información obtenida podemos conocer el número de réplicas que tendrá nuestro experimento de simulación:

$$N = \left[ \frac{t_{(n-1, 1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2 \qquad N = \left[ \frac{1.833 * 30.9}{20} \right]^2 = 8.020139 \qquad \boxed{N = 9 \text{ réplicas}}$$

Definido el número de réplicas procedemos a configurar el experimento de simulación. Se realizarán 10 experimentos independientes, cada uno con una secuencia diferente de números aleatorios que afecta los arribos de las entidades. Cada experimento consiste en 12 réplicas. Veamos los resultados:

		EXPERIMENTOS									
		Secuencia 1	Secuencia 2	Secuencia 3	Secuencia 4	Secuencia 5	Secuencia 6	Secuencia 7	Secuencia 8	Secuencia 9	Secuencia 99
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	1	231.68	289.24	339.56	243.42	264.48	216.43	241.37	235.81	243.07	263.15
E	2	239.69	229.45	246.00	271.78	229.79	312.40	283.37	259.83	189.42	222.26
P	3	248.00	297.64	236.06	296.42	264.10	246.10	283.21	211.44	160.13	205.69
L	4	220.70	229.04	231.21	259.16	248.43	264.07	271.60	280.54	234.02	247.62
I	5	276.18	268.28	232.83	182.85	250.08	261.53	239.14	259.48	215.49	208.44
C	6	219.41	254.85	227.08	243.37	242.25	268.72	246.74	259.65	271.97	286.80
A	7	210.49	196.05	232.39	265.92	247.15	218.39	220.01	230.60	223.07	267.25
S	8	296.27	243.94	227.32	235.24	217.71	242.72	208.87	223.84	291.76	255.01
	9	290.69	226.42	244.95	287.79	231.42	263.41	241.62	229.82	285.80	189.30
		248.12	248.32	246.38	254.00	243.93	254.86	248.44	243.45	234.97	238.39

En el cuadro anterior observamos la relación que existe entre el nivel de confianza y el número de réplicas requerido por el modelo. Elegimos un  $\mu$  puntual dentro del intervalo de confianza [234.1, 269.9], por ejemplo  $\mu = 255$ , tal que:

$$\mu \pm e = 255 \pm 20 \rightarrow [235, 275]$$

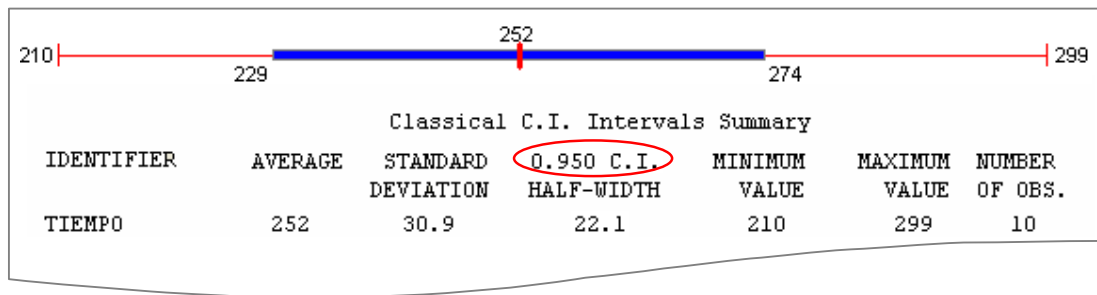
**Conclusiones:**

- En el cuadro anterior podemos observar que de los 10 experimentos realizados uno sale fuera del intervalo de confianza [235, 275] de la media teórica. Este corresponde al experimento número 9, cuya media estimada es de 234.97.
- Para lograr independencia entre los experimentos se les asigna una secuencia diferente de números aleatorios para cada uno. En cada experimento se ejecutan 9 réplicas, con lo cual se alcanza un nivel de confianza deseado.
- Del 100% de los experimentos, un 90% de ellos cae dentro del intervalo de confianza de la media teórica, con un error de  $\pm 20$  minutos. El valor del tiempo promedio estimado no varía de la media teórica por más de 20 minutos, con un nivel de confianza del 90%. Por lo tanto, existe una probabilidad del 10% que la media estimada supere a la media teórica por más de 20 minutos.
- Al determinar el número de replicas "N" que se deben ejecutar en el modelo de simulación se mejorará la fiabilidad de los resultados. Este aspecto representa un requisito fundamental para llegar a conclusiones válidas.
- En la medida en que tengamos un mayor conocimiento del sistema que está siendo modelado podemos definir, en forma más precisa, el error "e" que estamos dispuestos a aceptar, así como la probabilidad de error "α".
- El intervalo de confianza para  $\mu$  [234.1, 269.9] nos dirá qué tan seguros podemos estar de que el parámetro de la media verdadera  $\mu$  está contenida dentro de nuestro intervalo calculado.

- El uso de la distribución t de Student para determinar el intervalo de confianza para  $\mu$  requiere de la normalidad de los datos. De lo contrario, las conclusiones a las que se llega tendrían un nivel de fiabilidad muy pobre. Por este motivo, los resultados promedio de las réplicas del experimento preliminar se deben someter a la prueba de normalidad. Este tema se abordará más adelante.
- Dado que el tamaño de la muestra m es el número de observaciones por réplica y N el número de réplicas que el modelo necesita para alcanzar un nivel de confianza deseado podemos afirmar, sobre la base del Teorema del Límite Central que los N valores promedio que se logren producto de las N réplicas conforman un conjunto de valores que se ajustarán a una distribución de probabilidad normal, siempre que m sea grande (m>30 observaciones) por cada réplica.
- Existe una relación inversa entre la mitad del ancho del intervalo (HalfWidth) y el tamaño de n, a menor número de réplicas mayor es el riesgo. Una manera de reducir el intervalo de confianza es aumentando el número de réplicas n.

**Escenario**

Suponga que se realiza un cambio en las condiciones originales. Se reduce el porcentaje de error a un 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Se mantienen el número de réplicas preliminares en 10 y el error de 20 minutos. Veamos el efecto que produce este cambio:



Intervalo de confianza para  $\mu$ :  $252 \pm 22.1 \rightarrow [229.9, 274.1]$

$$N = \left[ \frac{t_{(n-1, 1-\alpha/2)} * S_{(n)}}{e} \right]^2 \quad N = \left[ \frac{2.262 * 30.9}{20} \right]^2 = 12.214 \quad \boxed{N = 13 \text{ réplicas}}$$

	EXPERIMENTOS									
	Secuencia 1	Secuencia 2	Secuencia 3	Secuencia 4	Secuencia 5	Secuencia 6	Secuencia 7	Secuencia 8	Secuencia 9	Secuencia 99
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	231.68	289.24	339.56	243.42	264.48	216.43	241.37	235.81	243.07	263.15
2	239.69	229.45	246.00	271.78	229.79	312.40	283.37	259.83	189.42	222.26
R 3	248.00	297.64	236.06	296.42	264.10	246.10	283.21	211.44	160.13	205.69
E 4	220.70	229.04	231.21	259.16	248.43	264.07	271.60	280.54	234.02	247.62
P 5	276.18	268.28	232.83	182.85	250.08	261.53	239.14	259.48	215.49	208.44
L 6	219.41	254.85	227.08	243.37	242.25	268.72	246.74	259.65	271.97	286.80
I 7	210.49	196.05	232.39	265.92	247.15	218.39	220.01	230.60	223.07	267.25
C 8	296.27	243.94	227.32	235.24	217.71	242.72	208.87	223.84	291.76	255.01
A 9	290.69	226.42	244.95	287.79	231.42	263.41	241.62	229.82	285.80	189.30
S 10	234.10	209.18	257.90	267.35	237.90	325.53	227.08	266.13	291.25	334.40
11	225.29	278.00	241.79	226.96	196.77	203.99	241.66	194.06	235.32	235.95
12	246.21	236.06	240.88	286.66	250.70	283.09	284.68	230.84	244.34	263.78
13	268.72	209.57	259.36	239.33	241.19	234.63	226.70	298.87	309.50	287.20
	246.73	243.67	247.49	254.33	240.15	257.00	247.39	244.69	245.78	251.30

Elegimos un  $\mu$  puntual dentro del intervalo de confianza [229.9, 274.1], por ejemplo  $\mu = 250$ , tal que:  $\mu \pm e = 250 \pm 20 \rightarrow [230, 270]$ .

Observe que ahora todos los valores se encuentran dentro del intervalo [230, 270], recordemos que se ha replanteado el nivel de confianza a 95%, sin embargo el 100% de los resultados están dentro del intervalo. Debido a que el número de experimentos es relativamente pequeño no podemos observar ese 5% que cae fuera del intervalo. Cuando el número de experimentos es muy grande y tiende hacia el infinito, comprobaremos que sí se cumple dicha probabilidad.

De cualquier modo, la interpretación es que la media estimada del Tiempo Promedio no varía de la media teórica por más de 20 minutos, con un 95% de confianza. Por lo tanto existe una probabilidad de 5% de que la media estimada supere a la media teórica por más de 20 minutos.

Método 2: Cálculo del número de réplicas para el experimento.

También es posible determinar el número de réplicas en base al HalfWidth obtenido de la muestra preliminar, mediante la expresión siguiente:

$$N = n \left( \frac{h_0}{e} \right)^2 \qquad N = 10 \left( \frac{22.1}{20} \right)^2$$

**N = 13 réplicas**

**Ejemplo 4:**

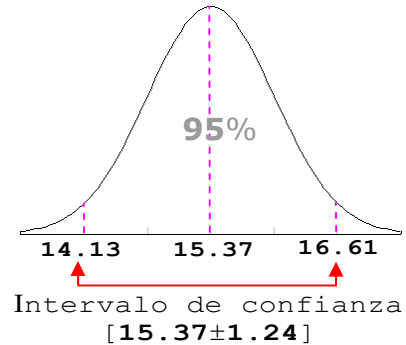
Se desea medir el valor promedio del indicador Tiempo de Permanencia en Sistema. Veamos:

Experimento:



	Name	Type	Expression
1	PERMANENCIA EN SISTEMA	Output	T.AVG(TIEMPO EN SISTEMA)

- 20 réplicas,
- Por cada réplica hubo entre 500 y 550 observaciones (entidades atendidas)



Por cada réplica se obtuvo un valor promedio, es decir, en total se obtuvieron 20 valores promedio. Luego se obtuvo el valor esperado de los valores promedio de las 20 repeticiones, así como el intervalo de confianza para un nivel determinado de probabilidad, que en nuestro caso es el 95%. El valor esperado obtenido 15.37 es un valor centrado que involucra a un universo de por lo menos 10.000 observaciones y la media verdadera  $\mu$  caerá en el intervalo comprendido entre los valores 14.13 y 16.61, con un 95% de probabilidad.

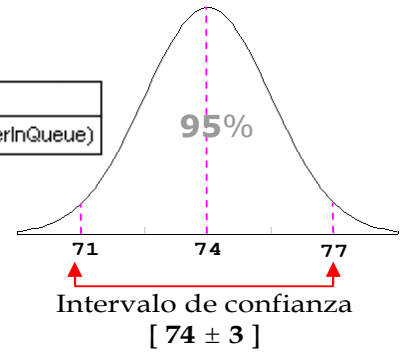
**Ejemplo 5:**

Se requiere diseñar la capacidad que debe tener la sala de espera del área de despacho de una empresa, para ello se desea medir el indicador Longitud Máxima de Cola. Veamos:

Experimento:



Name	Type	Expression
MAXIMO NUMER CLTS EN ESPERA	Output	DMAX(DESPECHO.Queue.NumberInQueue)



- 80 réplicas
- Por cada réplica hubo un valor máximo de cola (durante la simulación)

Por cada réplica se obtuvo un solo valor máximo, es decir, en total se obtuvieron 80 valores máximos. Luego se obtuvo el valor esperado de los valores máximos de las 80 replicaciones y el intervalo de confianza. En nuestro ejemplo existe un 95% de probabilidad de que el valor de la media verdadera  $\mu$  se encuentre entre 71 y 77, por lo tanto, un criterio sería establecer una capacidad para la sala de espera de 77 entidades. Este valor cubre el 97.5% de todos los casos posibles, dejando un error de 2.5% en la cola derecha para aquellos valores que sobrepasen dicha capacidad; tómesese en cuenta que el valor "máximo de los máximos" no coincide necesariamente con el límite superior del intervalo de confianza. Cualquier criterio que se adopte para diseñar la capacidad de la sala de espera debe considerar, por lo menos, el límite inferior del intervalo de confianza.

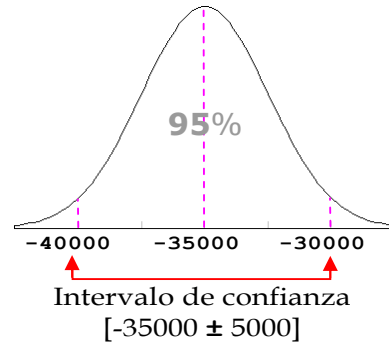
Ejemplo 6:

Se desea medir el indicador Deuda Máxima, representado por la variable Saldo, que durante la simulación puede tomar distintos valores que fluctúan entre cero y valores negativos, que representan diferentes niveles de deuda. El objetivo es conocer el monto mínimo que debe contar la empresa que respalde un nivel máximo de deuda.

Experimento:



Name	Type	Expression
DEUDA MAXIMA	Output	DMIN(SALDO Value)

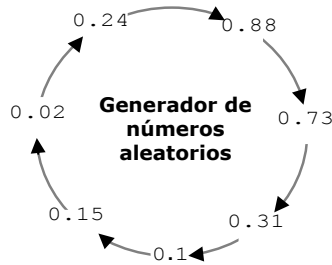


- 100 réplicas,
- Por cada réplica hubo un valor mínimo de la variable Saldo (deuda máxima)

Por cada réplica se obtuvo un solo valor mínimo, en total se obtuvieron 100 valores mínimos. Luego se obtuvo el valor esperado de los valores mínimos de las 100 replicaciones, así como el intervalo de confianza. Existe un 95% de probabilidad de que el valor de la media verdadera  $\mu$  se encuentre entre -40000 y -30000; por lo tanto, un criterio sería establecer un respaldo mínimo de \$40000. Este valor cubre el 97.5% de todos los casos posibles, dejando un error de 2.5% en la cola izquierda para aquellos niveles de deuda que sobrepasen los \$40000, tomar en cuenta que el valor "mínimo de los mínimos" no coincide necesariamente con el límite inferior del intervalo de confianza. Cualquier criterio que se adopte para definir el monto del respaldo debe considerar, por lo menos, el límite superior del intervalo de confianza.

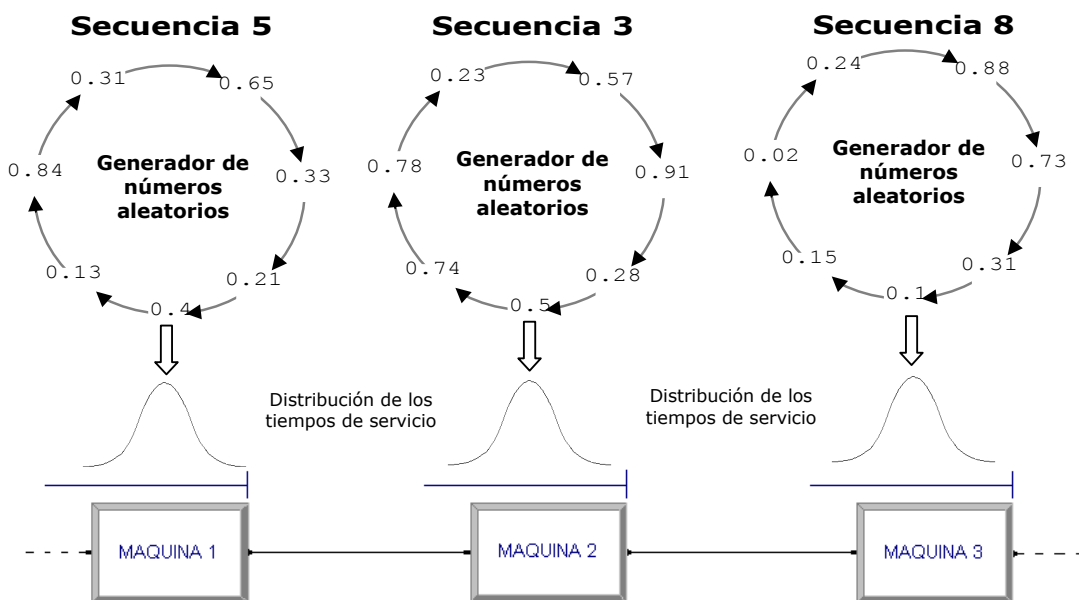
## 4. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VARIANZA

La generación de números aleatorios es una parte importante de las técnicas de simulación. El generador de números Random produce una secuencia cíclica de números aleatorios, que serán utilizados por varias distribuciones, como la Uniforme, Normal, Exponencial, etcétera, las cuales guiarán el proceso representado en el modelo de simulación, tales como arribos, tiempos de proceso, tiempos entre fallas u otros.



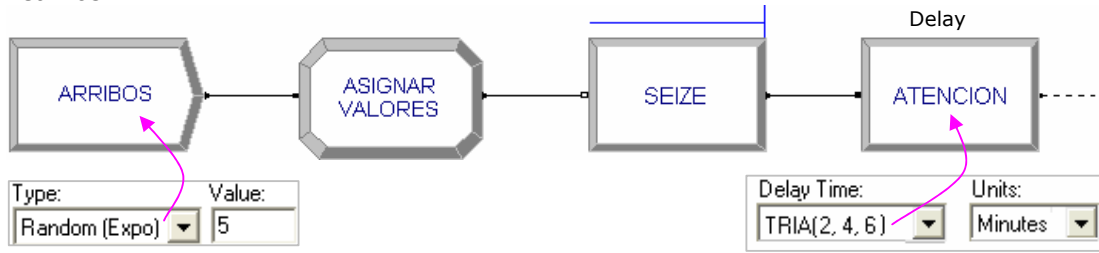
El generador de números aleatorios requiere de una semilla para comenzar a producir dichos números; cada número aleatorio producido le sirve al generador para producir el siguiente número aleatorio y así sucesivamente, hasta que se cumpla un ciclo (por lo menos dos billones de números), luego el ciclo se repite a través de la misma secuencia. Arena dispone de 99 secuencias de números aleatorios y por defecto utiliza la secuencia 10.

El objetivo del proceso de secuencia común es reducir la varianza de los resultados obtenidos al comparar escenarios. Desde que el uso de una secuencia determinada implica que todos los números se generan en base a una misma semilla, esto crea cierta dependencia entre los valores. En este sentido, este procedimiento intenta reducir dicha varianza, mediante el uso de diferentes secuencias en las distribuciones de probabilidad, lo cual genera un mayor factor aleatorio y disminuye dicha dependencia. Este concepto podemos expresarlo en el siguiente esquema, veamos:

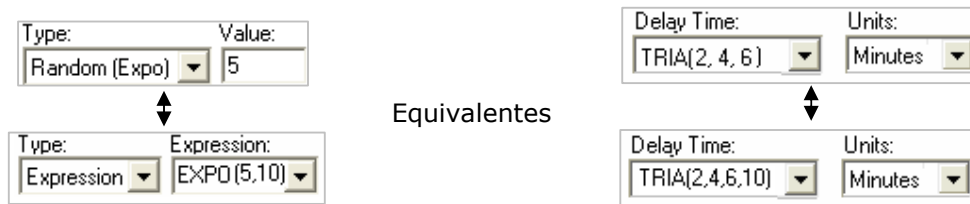


**Ejemplo:**

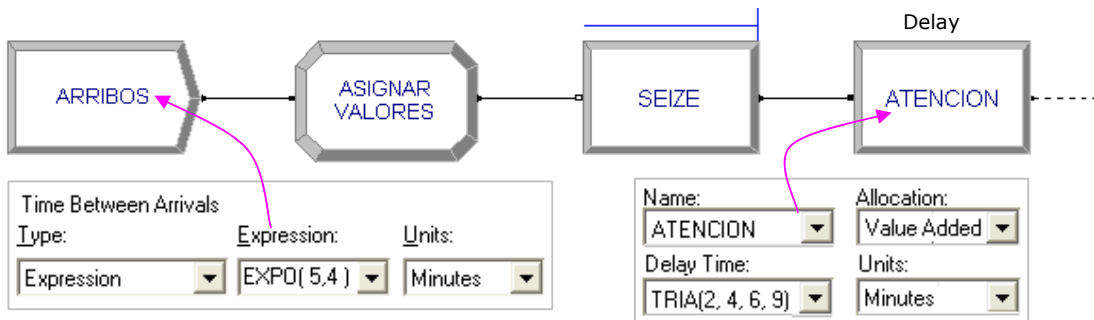
El siguiente segmento de un modelo trabaja con la secuencia por defecto que es la 10, veamos:



En el ejemplo anterior podemos observar que al iniciar la simulación se comenzarán a generar valores aleatorios para los Arribos y para la Atención, de acuerdo con la secuencia 10. Los valores que se generan de una misma secuencia no son completamente aleatorios, desde que se crea siempre un nuevo valor en base al valor anterior, por ello es que estos son llamados pseudoaleatorios. Así, el valor que se crea en la distribución TRIA(2,4,6) del módulo Delay se hace a partir del último valor generado por la distribución EXPO(5) en el módulo Create, con lo cual el concepto de "independencia" entre un valor y otro no se cumple. Para incluir una secuencia de números aleatorios en una distribución de probabilidad debemos utilizar la alternativa Expresión:



La inserción de una secuencia adicional de números aleatorios quiebra o elimina la dependencia que se genera cuando los valores creados por las distribuciones de probabilidad pertenecen a una misma secuencia. Respecto al ejemplo anterior, para el arribo de los clientes consideraremos la secuencia 4 y para el proceso de servicio la secuencia 9. El modelo queda de la siguiente manera:



Este cambio de secuencias debe realizarse en cada uno de los modelos que se está comparando. La secuencia 4 en los arribos asegura que el ritmo de llegadas sea similar en los escenarios. Con el cambio a la secuencia 9 en la Atención se rompe la dependencia respecto a la secuencia 4. Todo esto redundará en la reducción de la variación en los resultados y también se logra que la comparación de escenarios se realice en condiciones similares.



Un generador de números aleatorios que comience con la misma semilla, generará siempre la misma secuencia de números; diferentes semillas generarán diferentes secuencias. Para obtener valores esperados de las variables aleatorias se ejecutan varias réplicas al modelo. En cada una se utilizan diferentes secuencias de números e independientes entre sí. El valor de la muestra se expresa mediante un intervalo de confianza. Las técnicas de reducción de varianza son métodos que explotan nuestra capacidad de control de los generadores de números aleatorios que conducen nuestra simulación. Normalmente reutilizamos dichos números aleatorios para inducir correlaciones favorables que reduzcan el ruido en el output. A continuación mostraremos algunas de las técnicas de reducción de varianza más utilizadas.

#### 4.1 Técnica de secuencias comunes

Esta técnica utiliza las mismas series de números aleatorios en experimentos sucesivos de comparación de escenarios. Se trata de obtener una reducción de varianza de la diferencia a partir de la sincronización de las mismas series de números para distintas configuraciones. A partir de una misma semilla original los sistemas serán comparados en "las mismas circunstancias".

Se debe caracterizar cada uno de los generadores de las variables aleatorias que vamos a utilizar en la simulación mediante la identificación de una serie específica para cada tipo de fenómeno, a fin de obtener una máxima sincronización entre la carga de trabajo generada en los escenarios alternativos. Se trata de introducir correlación positiva entre las réplicas. Si  $Z=X-Y$ , tenemos que:

$$\text{Var}(Z) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) - 2\text{Cov}(X,Y)$$

En la expresión anterior observamos que si la  $\text{Cov}(X,Y)$  es grande, por haber introducido correlación positiva entre ambas series, entonces la varianza de la diferencia:  $\text{Var}(Z)$ , será mucho menor.

#### 4.2 Técnica de secuencias antitéticas

A diferencia de la técnica de secuencia común, el método antitético intenta introducir correlación negativa entre los elementos correspondientes a las cadenas de números aleatorios utilizados en las distintas réplicas, como estrategia para obtener respuestas estadísticamente más confiables que la generada con réplicas independientes. El método consiste en ejecutar una primera réplica con la serie de números aleatorios  $u_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). Luego, se ejecuta una segunda réplica con los valores antitéticos  $(1-u_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). Este muestreo complementario induce una correlación negativa entre las respuestas de ambas simulaciones. En principio, ambas "se compensan" y se conjetura que las respuestas  $y(1)$  e  $y(2)$  estarán correlacionadas negativamente, por lo que la varianza de sus promedios decrece. Tenemos  $n/2$  promedios de parejas  $(y(i), y(i+1))$ , lo que nos conduce a la expresión de la varianza de  $Y = Y(i) + Y(i+1)$ :

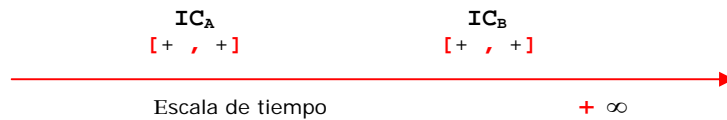
$$\text{Var}(Y) = \frac{1}{4}[\text{var}(Y(i)) + \text{var}(Y(i+1)) + 2 \text{Cov}(Y(i), Y(i+1))]$$

Si las réplicas son independientes desaparecen los términos de covarianza. Sin embargo, si hacemos negativa la suma de covarianzas, podemos producir una varianza menor de la que ofrecen réplicas independientes.

## 5. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

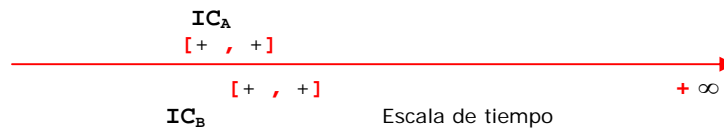
Supongamos que se desea comparar dos escenarios: Esc.A versus Esc.B, siendo la variable de interés el Tiempo de Ciclo. En cada escenario se ejecutaron 10 réplicas y se obtuvieron los intervalos de confianza  $IC_A$  e  $IC_B$ . Así tenemos:

Caso 1: Los intervalos de confianza no se traslapan



Como se observa, existe un desfase, una clara separación en el tiempo, entre los intervalos de confianza de cada escenario. Dado que la variable de interés es el Tiempo de Ciclo, se puede afirmar que el EscA es mejor que el EscB, porque posee un intervalo con menores tiempos.

Caso 2: Los intervalos de confianza se traslapan



En este caso se procede a realizar el análisis pareado.

### 5.1 Comparación de medias usando muestras relacionadas: prueba Paired-t

La comparación de medias usando muestras pareadas consiste en comparar dos métodos o tratamientos y se requiere que las unidades experimentales donde se aplican los tratamientos sean las mismas, para evitar influencia de otros factores en la comparación.

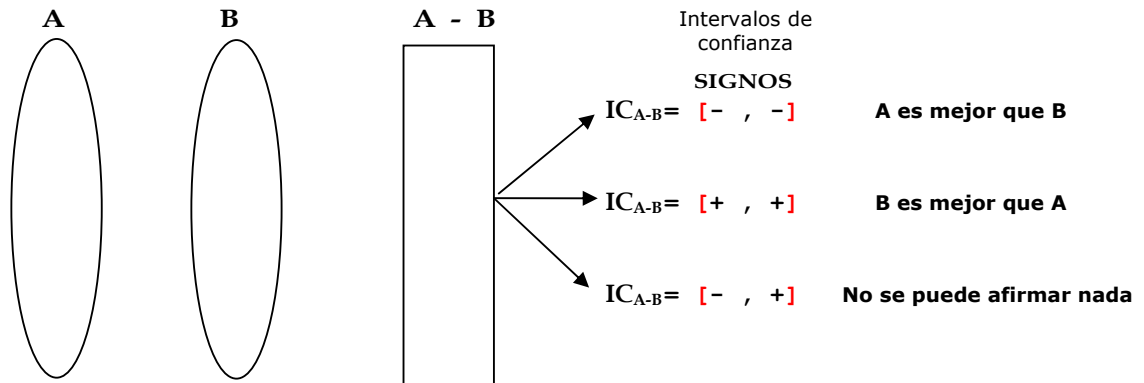
*Ejemplo:*

Supongamos que se brinda capacitación a los operarios del departamento de producción de una empresa y se desea evaluar la efectividad de dicha capacitación. El sentido común nos indica que algunos operarios entenderán mejor el material que otros quizá, debido a la preparación que tienen de antemano. Entonces, para medir la efectividad de la capacitación es más justo tomar un test antes y después del curso de capacitación y comparar estos resultados individuo por individuo.

*Ejemplo:*

Supongamos que un médico desea investigar si un medicamento tiene el efecto de bajar la presión sanguínea en los usuarios. En el experimento se eligió al azar 20 pacientes y les tomó la presión, luego les recetó la medicina por un periodo de 3 meses, y al final del mismo nuevamente les tomó la presión. Luego comparó resultados, paciente por paciente.

Respecto al caso 2, si se realiza la comparación de medias usando muestras pareadas, podría arrojar los siguientes posibles resultados:



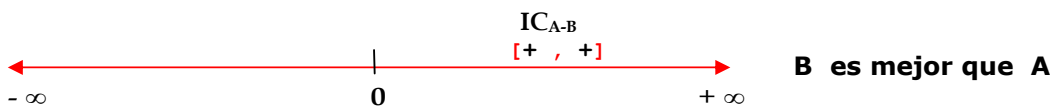
donde:

**A** : Columna que posee los 10 valores (tiempos de ciclo) del Escenario A

**B** : Columna que posee los 10 valores (tiempos de ciclo) del Escenario B

**A-B**: Columna que posee la diferencia entre los valores del EscA – EscB

**IC<sub>A-B</sub>** : Intervalo de confianza de los valores obtenidos en la columna A – B



Intervalo de confianza:

$$\left[ \bar{d} \pm t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$$

$\bar{d}$ : Promedio de las diferencias

$S_n$ : Desviación estándar de las diferencias

$$\bar{d} = \bar{X} - \bar{Y}$$

*Ejemplo:* Método Pareado

Los siguientes datos representan los valores promedio de 25 réplicas de un modelo en el que se desea comparar dos escenarios desde la óptica de tres indicadores de desempeño diferentes: Tiempo de Ciclo, Utilidades y Costos. Para ello, se ha creado, para cada indicador, una tercera columna que es la diferencia de las medias, veamos:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	TIEMPOS DE CICLO			UTILIDADES						COSTOS				
2	ESC1	ESC2	ESC1 - ESC2		ESCA	ESCB	ESCA-ESCB		ESC X	ESC Y	ESC X - ESC Y			
3	7.42423221	3.86647273	3.55775948		7.73294546	37.1211611	-29.3882156		13.5108063	7.9731365	5.53766985			
4	15.0084721	12.8143908	2.19408134		25.6267816	75.0423606	-49.413579		15.2216016	13.7943704	1.42723115			
5	13.972003	4.96906245	9.00294052		9.9381249	69.8600149	-59.9218899		14.9277323	13.632337	1.29539531			
6	10.6966111	7.87859944	2.81801166		15.7571989	53.4830555	-37.7258566		12.8986292	12.8664851	0.03214413			
7	14.71831	12.1187449	2.59956513		24.2374898	73.5915502	-49.3540604		16.677647	14.7458402	1.93180675			
8	9.02028828	8.96408421	0.03620407		17.9681684	45.1014414	-27.133273		24.3517753	12.9653119	11.3864634			
9	9.51491211	11.7288616	-2.21394944		23.4577231	47.5745606	-24.1168375		8.17418868	9.79260234	-1.61841366			
10	10.7627786	7.61975661	3.14302194		15.2395132	53.8138928	-38.5743795		8.27548755	8.83016096	-0.55467341			
11	5.6905357	4.41042599	1.28010971		8.82085198	26.4526785	-19.6318265		15.4998799	13.8985	1.60137997			
12	8.99677174	5.59271353	3.40405821		11.1854271	44.9838587	-33.7984316		8.02544512	11.5011744	-3.47572924			
13	12.377669	11.3799168	0.99775223		22.7598336	61.8883451	-39.1285115		10.0641714	7.40275395	2.66141744			
14	13.5485618	12.0899694	1.45859243		24.1799388	67.7428091	-43.5628703		6.9433546	10.3687341	-3.42537947			
15	4.74952015	4.46263865	0.28688151		8.92527729	23.7476008	-14.8223235		10.6056892	15.4796603	-4.87397109			
16	6.7419421	6.20472784	0.53721427		12.4094557	33.7097105	-21.3002548		7.38458328	14.9103778	-7.52579457			
17	13.3003839	12.07507	1.22531392		24.15014	66.5019196	-42.3517796		8.85312478	12.2835262	-3.43040141			
18	11.2652502	10.3147129	0.95053731		20.6294258	56.3262511	-35.6968253		13.3740012	13.18574	0.1882612			
19	12.7833148	10.0005434	2.78277144		20.0010867	63.916574	-43.9154873		12.1014923	15.3322454	-3.23075318			
20	13.2585751	9.07568881	4.18288634		18.1513776	66.2928757	-48.1414981		6.88473134	15.1087878	-8.22405647			
21	10.82737	9.70049925	1.12687078		19.4009985	54.1368501	-34.7358516		7.51236125	12.0641183	-4.55175705			
22	15.6785262	10.1962315	5.4822967		20.392463	78.3926411	-58.000178		8.53653479	14.5884312	-6.0498964			
23	12.9926716	12.9535765	0.03909515		25.907153	64.9633582	-39.0562052		7.92490055	14.604832	-6.67993141			
24	14.1188875	11.7976559	2.32123158		23.5953119	70.5944376	-46.9991257		7.0491762	12.8660436	-5.81686736			
25	6.72035696	6.46653491	0.25382205		12.9330698	33.6017848	-20.668715		4.8639934	11.1579421	-6.29394866			
26	10.2905409	9.12938992	1.16115093		18.2587798	51.4527043	-33.1939244		8.28275337	10.5727274	-2.28997399			
27	10.6631488	8.21500471	2.44814413		16.4300094	53.3157442	-36.8857348		9.18452661	12.2340221	-3.04949546			

Intervalos: [1.151, 2.935] [-41.93, -32.27] [-3.653, 0.051]

Conclusiones:

- Al comparar ESC1-ESC2 el intervalo resultante es [+,+], el escenario 1 es mayor que el 2. Entonces, el escenario 2 es mejor porque es menor el Tiempo de Ciclo.
- Al comparar ESCA-ESCB el intervalo resultante es [-,-], el escenario B es mayor que el A. Entonces el escenario B es mejor porque es mayor la Utilidad.
- Al comparar ESCX-ESCY el intervalo resultante es [-,+], no existe diferencia significativa. Se puede afirmar que estadísticamente son iguales en cuanto a los Costos.

### 5.2 Comparación de medias usando muestras independientes: prueba Two Sample-t

Supongamos que se tiene dos poblaciones distribuidas normalmente con medias desconocidas  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , respectivamente. Se puede aplicar una prueba t de Student para comparar las medias de dichas poblaciones basándonos en dos muestras independientes tomadas de ellas. La primera muestra es de tamaño m, con media  $\bar{x}$  y varianza  $s_1^2$  y la segunda muestra es de tamaño n, tiene media  $\bar{y}$  y varianza  $s_2^2$ . Así tenemos que el intervalo de confianza se determina mediante la expresión:

$$\left[ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{(n_1+n_2-2, 1-\alpha/2)} S_P \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right] \quad S_P = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Ejemplos:

Sp: Desviación estándar p ponderada (combinada).

- Se desea comparar si los estudiantes de escuelas privadas y públicas tienen igual rendimiento en matemáticas.
- Se desea comparar el número de años de educación entre los oficiales de la policía de la ciudad A y de la ciudad B. Para ello se toman muestras aleatorias de 38 policías (ciudad A) y 30 policías (ciudad B). Se desea saber si existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de educación de los policías de ambas ciudades.

## 6. PRUEBA DE NORMALIDAD

Al diseñar un experimento de simulación se deben definir principalmente la longitud de la simulación o la condición de fin, el período de calentamiento en caso de que sea de estado estable, el número de réplicas que ejecutará el modelo, y sobre todo se establecerá el indicador o los indicadores que servirán para medir la variable de estudio del proyecto. El conjunto de valores de cada indicador, que resulta de la ejecución del experimento de simulación, sea de estado estable o transitorio, deberá ser sometido a pruebas estadísticas de bondad de ajuste a la distribución Normal, es decir, básicamente a las pruebas de Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling.

El objetivo de estas pruebas es verificar que se aplica el Teorema del Límite Central (TLC) para el indicador del estudio. Dado que el tamaño de la muestra  $m$  es el número de observaciones que hay en una réplica y  $N$  es el número de réplicas que el modelo necesita para alcanzar un nivel de confianza deseado, podemos afirmar en base al Teorema del Límite Central que los  $N$  valores promedio que se logren producto de las  $N$  réplicas, conforman un conjunto de valores que se ajustarán a una distribución de probabilidad normal, siempre que  $m$  sea grande ( $m > 30$  observaciones) por cada réplica.

Al pasar la prueba de normalidad se puede afirmar que el valor de nuestro indicador no solo representa el promedio de las  $N$  replicaciones, sino también es uno de los parámetros de la distribución normal, la media. Por lo tanto, se podrá establecer un intervalo para  $\mu$  con un nivel de confianza deseado y será factible realizar inferencia estadística al indicador. Si, por el contrario, el conjunto de valores no pasa la prueba de normalidad, entonces no será posible aplicar inferencia estadística al indicador que se está midiendo, ni establecer algún intervalo de confianza para  $\mu$ , desde que el nivel de fiabilidad con que se cuenta es muy pobre o de baja calidad y las conclusiones que se obtendrían serán no válidas. Por ello, es fundamental que se aplique el TLC a los valores de nuestro indicador y, obviamente, también es fundamental realizar la prueba.

La prueba de normalidad consiste en ejecutar el modelo de simulación y analizar los resultados promedio de las réplicas. Para realizarla nos valemos, en primera instancia, del Output Analyzer, para exportar los valores resultantes de cada réplica. Los datos son exportados al software MS-Excel, desde allí se recuperan y se llevan al Block de Notas (Windows-Note Pad), con el propósito de que se graben en formato texto (\*.Txt). A partir de esta instancia hacia adelante el procedimiento es conocido, ya que con ayuda del Input Analyzer evaluaremos si los datos se ajustan a la distribución Normal, analizaremos también la calidad del ajuste mediante el indicador Error cuadrado.

### Ejemplo:

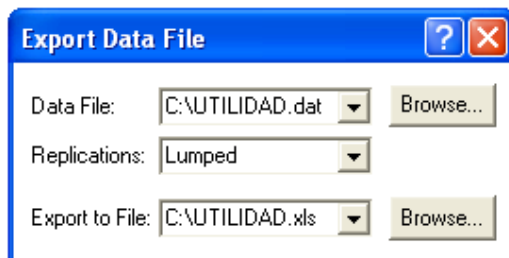
Supóngase un experimento de simulación que consiste en la ejecución de 30 réplicas al modelo. La variable en estudio que se mide es la utilidad diaria que genera una empresa. A continuación presentamos la secuencia de pasos:

1. Ejecutar el modelo en Arena, asegurarse de que está configurado para el número de réplicas deseado y que el destino de los valores será un archivo de datos, como se muestra a continuación:

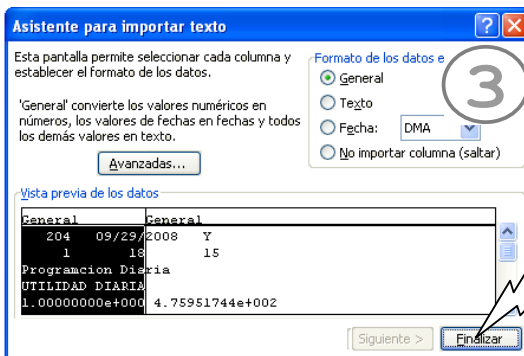
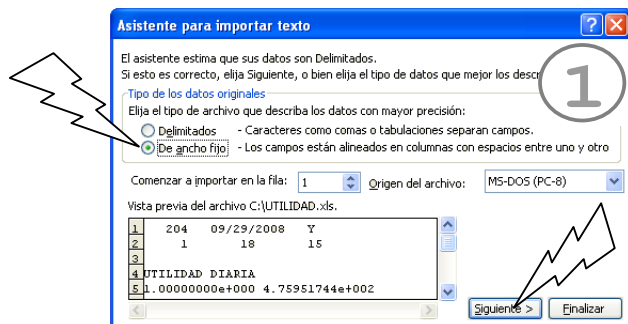
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	UTILIDAD DIARIA	Output	VENTAS*0.35 + 500	UTILIDAD DIARIA	C:\UTILIDAD.dat



2. Una vez ejecutado el modelo, abrir el Output Analyzer e ingresar a la opción: File/DataFile/Export. Ingresar el nombre del archivo a exportar, es decir UTILIDAD.dat, en el segundo campo ingresar Lumped. Finalmente, ingresar el nombre del archivo que recibirá los datos, con la extensión de MS-Excel: UTILIDAD.xls.

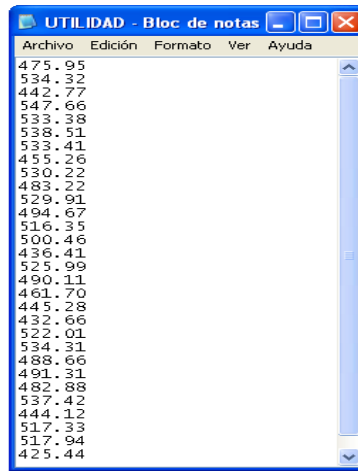


3. Una vez exportados, cargamos el software MS-Excel y procederemos a recuperar nuestro archivo, buscándolo en la ruta que le dimos en el paso anterior, es decir en C:\UTILIDAD.xls. Nos encontraremos con la siguiente pantalla:

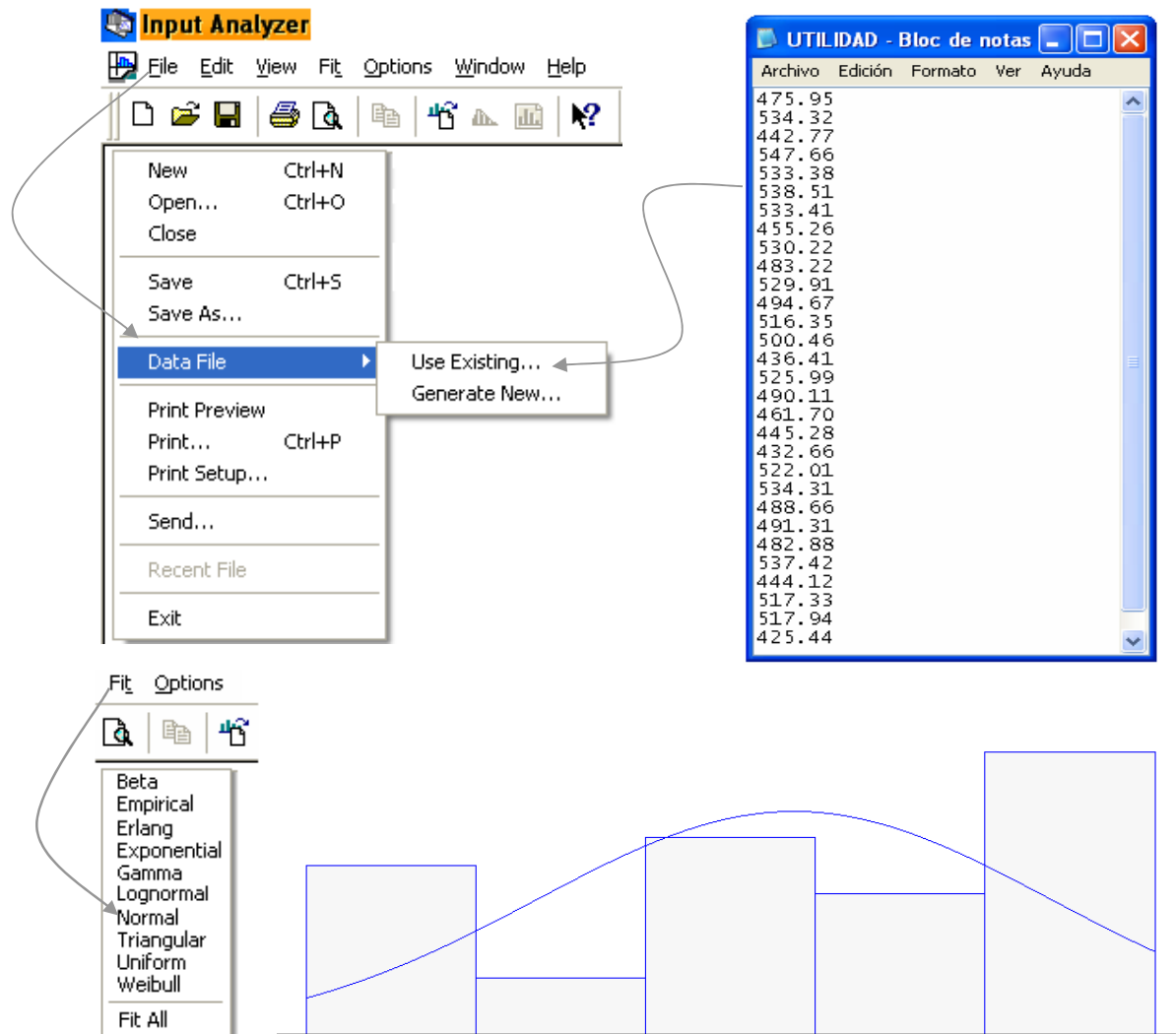


	A	B	C
4	UTILIDAD		
5	1.00E+00	4.76E+02	
6	2.00E+00	5.34E+02	
7	3.00E+00	4.43E+02	
8	4.00E+00	5.48E+02	
9	5.00E+00	5.33E+02	
10	6.00E+00	5.39E+02	
11	7.00E+00	5.33E+02	
12	8.00E+00	4.55E+02	
13	9.00E+00	5.30E+02	
14	1.00E+01	4.83E+02	
15	1.10E+01	5.30E+02	
16	1.20E+01	4.95E+02	
17	1.30E+01	5.16E+02	
18	1.40E+01	5.00E+02	
19	1.50E+01	4.36E+02	
20	1.60E+01	5.26E+02	
21	1.70E+01	4.90E+02	
22	1.80E+01	4.62E+02	
23	1.90E+01	4.45E+02	
24	2.00E+01	4.33E+02	
25	2.10E+01	5.22E+02	
26	2.20E+01	5.34E+02	
27	2.30E+01	4.89E+02	
28	2.40E+01	4.91E+02	
29	2.50E+01	4.83E+02	
30	2.60E+01	5.37E+02	
31	2.70E+01	4.44E+02	
32	2.80E+01	5.17E+02	
33	2.90E+01	5.18E+02	
34	3.00E+01	4.25E+02	
35	-1.00E+00	0 -1.00000000e+000	

4. El siguiente paso es darles el formato adecuado a los datos, llevarlos al Block de Notas de Windows (Note Pad) y grabar el archivo: UTILIDAD.txt.



5. Finalmente, desde el Input Analyzer se recupera el archivo UTILIDAD.txt y se procede a realizar la prueba de normalidad de los datos. Veamos:



Veamos los siguientes reportes:

Data Summary

Number Data Points = 30  
 Min Data Value = 425  
 Max Data Value = 548  
 Sample Mean = 496  
 Sample Std Dev = 37.8

Histogram Summary

Histogram Range = 425 to 548  
 Number Intervals = 5

Distribution Summary

Distribution: Normal  
 Expression: NORM(496, 37.2)  
 Square Error: 0.065948

Chi Square Test

Number of intervals = 3  
 Degrees of freedom = 0  
 Test Statistic = 1.71  
 Corresponding p-value < 0.005

Kolmogorov-Smirnov Test

Test Statistic = 0.177  
 Corresponding p-value > 0.15

Function	Sq Error
Beta	0.0146
Uniform	0.0378
Triangular	0.0516
Normal	0.0659
Weibull	0.083
Gamma	0.0929
Erlang	0.0933
Exponential	0.108
Lognormal	0.118

### Conclusiones:

- Los datos obtenidos del experimento de simulación, producto de la ejecución del modelo por 30 réplicas para el indicador que se está midiendo, no pasan la prueba de normalidad. En primera instancia podemos observar en el indicador  $p$  de la prueba Chi cuadrado es menor que 0.005. Es decir, es menor que el riesgo que equivale al 5%.
- Como era de esperarse, el valor del error cuadrado 0.0659 de la distribución Normal no es el más bajo, comparando con otras distribuciones de la lista o *ranking*. El error cuadrado es una medida de la calidad de ajuste, de la distribución a los datos y se espera que sea mínimo. Según el reporte, la distribución Beta se ajusta mejor a nuestros datos porque posee un menor error cuadrado.
- Sobre la base de lo anterior, se concluye que no es posible aplicar inferencia estadística al indicador "utilidad diaria" que se está midiendo, por lo tanto, no será posible establecer algún intervalo de confianza para  $\mu$ , desde que el nivel de fiabilidad con que se cuenta es muy pobre o de baja calidad y las conclusiones que se obtendrían serán no válidas.
- Tómese en cuenta que el hecho de que un indicador no pase la prueba de normalidad no invalida el modelo ni a otros potenciales indicadores. Si no pasa la prueba el indicador es solo el promedio de los valores de las replicaciones, pero no representa ningún parámetro de la distribución normal, es decir no se ajusta a ella. En este caso, lo que procede es desistir de utilizarlo en el estudio y buscar otro indicador diferente.



## 7. EJECUCIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 7.1 Configuración del experimento de simulación en Arena

Antes de ejecutar el modelo de simulación se establecen las condiciones iniciales y parámetros o alcances que tendrá el modelo durante su ejecución. En este sentido, podemos establecer los siguientes elementos:

**Setup... Replication Parameters**

- Number of Replications:** [Empty field] - Número de ejecuciones al modelo (réplicas). Cada réplica es una muestra.
- Initialize Between Replications:**
  - Statistics
  - System - Si se activa, entonces el sistema se inicia vacío, sin entidades y con recursos inactivos.
- Start Date and Time:** lunes , 01 de enero de 2007 0:00:00 - Fecha y hora de inicio de la simulación.
- Warm-up Period:** [Empty field] - Período de calentamiento, hasta que el sistema logra estabilidad. No se recolecta estadísticas en este período.
- Time Units:** Hours - Si se activa, entonces borra estadísticas al final de cada réplica o ejecución al modelo.
- Replication Length:** [Empty field] - Tiempo al cabo del cual finaliza la simulación.
- Time Units:** Hours
- Hours Per Day:** 24
- Base Time Unit:** Minutes
- Terminating Condition:** [Empty field] - Condición para que finalice la simulación.

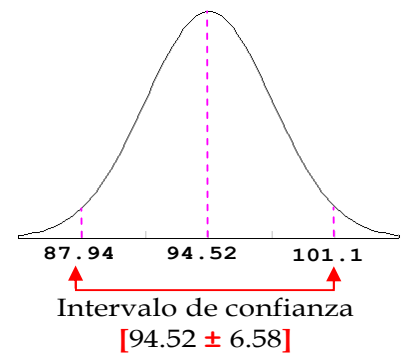
### 7.2 Análisis de los resultados en Arena

Una vez ejecutado el modelo se procede a realizar un análisis estadístico y una interpretación de los resultados obtenidos respecto a la variable de estudio.

Ejemplo:

Replications:	10	Time Units:	Minutes			
<b>User Specified</b>						
<b>Tally</b>						
Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO PROM. EN SISTEMA	94.5263	6,58	79.7884	107.62	6.3809	197.70

Valor promedio de 10 promedios o muestras.



Promedios mínimo y máximo, que corresponden a algunas de las 10 muestras.

Valores mínimo y máximo asociados al universo de las 10 réplicas.

### 7.3 Output Analyzer<sup>3</sup>

Como se puede observar en el ejemplo anterior, si bien podemos obtener información del reporte que genera Arena, este brinda estadísticas solo para un 95% de nivel de confianza. En este sentido, se utilizará el módulo Output Analyzer de Arena para el análisis e interpretación de los resultados de salida. Con él podemos establecer intervalos para  $\mu$ , con diferentes niveles de confianza, también permite realizar el análisis pareado (comparación de medias) para la comparación de escenarios, entre otros utilitarios y herramientas.

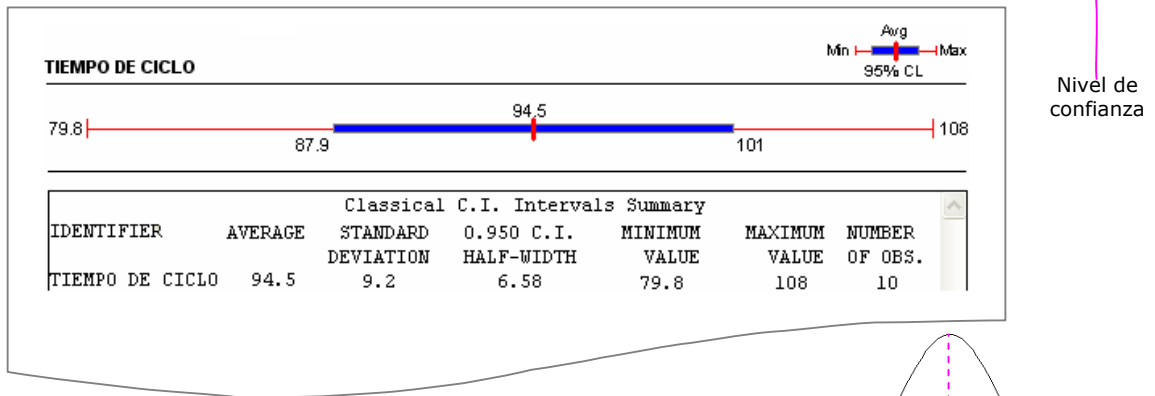
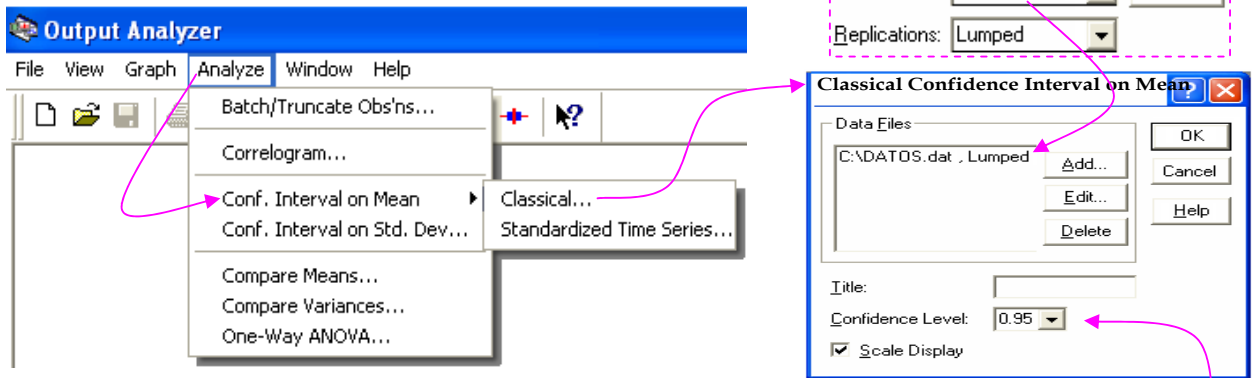
#### 7.3.1 Determinación del intervalo de confianza para $\mu$

1. Ordenar estadísticas de la variable en estudio:

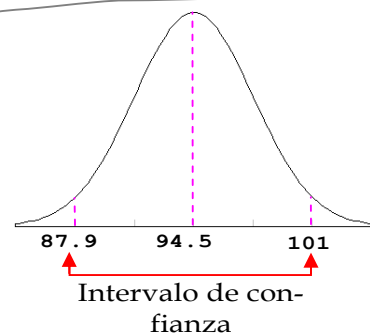
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File	
Statistic	1	TIEMPO DE CICLO	Output	TAVG(TIEMPO PROM. EN SISTEMA)	TIEMPO DE CICLO	C:\DATOS.dat

2. Ejecutar el modelo de simulación.

3. Ejecutar el software Output Analyzer:



En el reporte podemos observar que el segmento azul representa el intervalo de confianza para  $\mu$ : [87.9, 101]. También se suministra, entre otros indicadores, la media y el HalfWith, que representa la mitad del intervalo.



<sup>3</sup> Software Arena®, Rockwell Software. Versión 10,0, 2005.

### 7.3.2 Comparación de escenarios: Muestras relacionadas

#### Análisis Pareado (Output Analyzer)

El software Arena soporta el análisis de los resultados de la simulación mediante el Output Analyzer. A continuación se muestra el procedimiento para realizar la comparación de escenarios mediante el Método Pareado:

1. Ordenar estadísticas en cada modelo:

Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1 TIEMPO DE CICLO	Output	TAVG(TIEMPO PROM. EN SISTEMA)	TIEMPO DE CICLO	C:\ESC1.dat

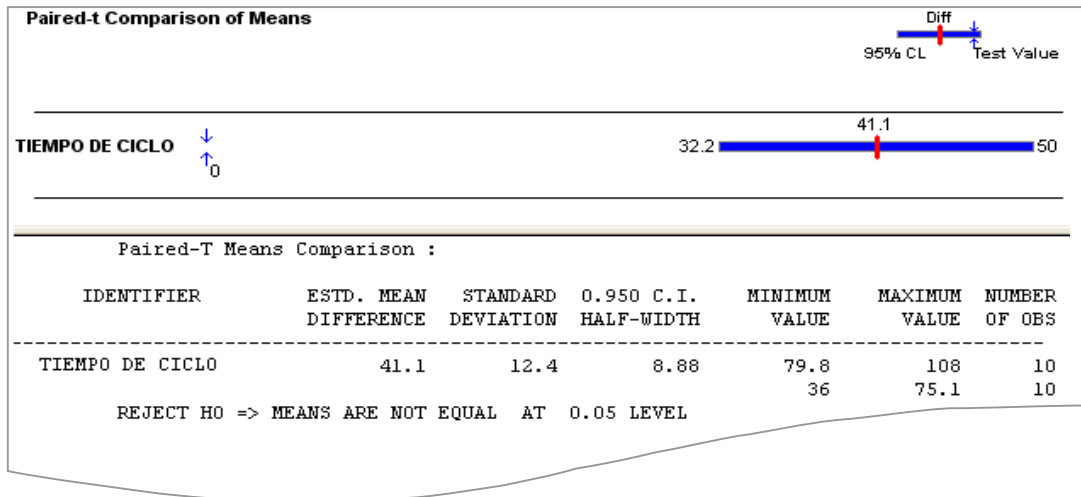
Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1 TIEMPO DE CICLO	Output	TAVG(TIEMPO PROM. EN SISTEMA)	TIEMPO DE CICLO	C:\ESC2.dat

2. Ejecutar cada escenario:

**Nota:** Tomar en cuenta que para poder realizar la comparación de medias (análisis pareado) los valores de las replicaciones del indicador en ambos escenarios deben pasar la prueba de normalidad.

3. Ejecutar Output Analyzer:

#### ESC1 – ESC2

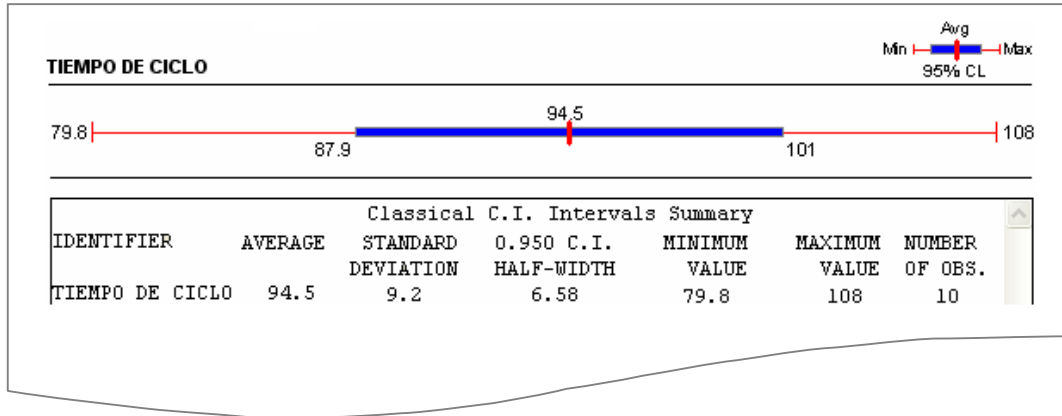


**Interpretación:** Dado que la variable de estudio es el tiempo de ciclo y analizando el intervalo resultante vemos que es [+,+], es decir, el segmento azul está a la derecha del valor cero de la escala. En todos los casos el ESC1 siempre es mayor que el ESC2, lo que significa que el escenario 2 es mejor porque es menor.

### 7.3.3 Cálculo de probabilidades

¿Cuál es la probabilidad de que el tiempo promedio muestral alcance o sobrepase los 100 minutos?

Veamos:

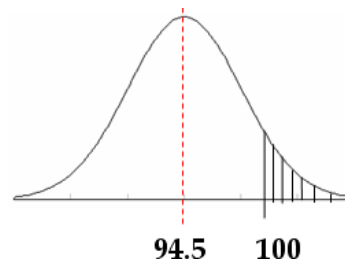


Según el reporte tenemos:

$$\bar{x} = 94.5 \text{ minutos}$$

$$\sigma = 9.2 \text{ minutos}$$

$$P(x \geq 100) = ?$$



Utilizando la fx DISTR.NORM de MS-EXCEL, tenemos:

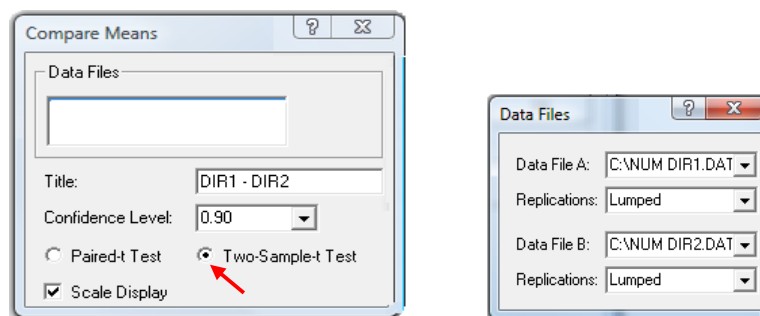
$$P(X \geq 100) = 1 - \text{DISTR.NORM}(100, 94.5, 9.2, 1) \rightarrow 0.275$$

Existe una probabilidad del 27.5% de que el tiempo promedio muestral alcance o sobrepase los 100 minutos.

### 7.3.4 Comparación de escenarios: Muestras independientes

*Prueba Two Sample-t (Output Analyzer)*

El procedimiento para realizar la comparación de medias utilizando muestras no relacionadas es similar al análisis pareado (véase acápite 2.3.2), la diferencia está sólo en la configuración de la prueba, tal como se muestra a continuación:



1

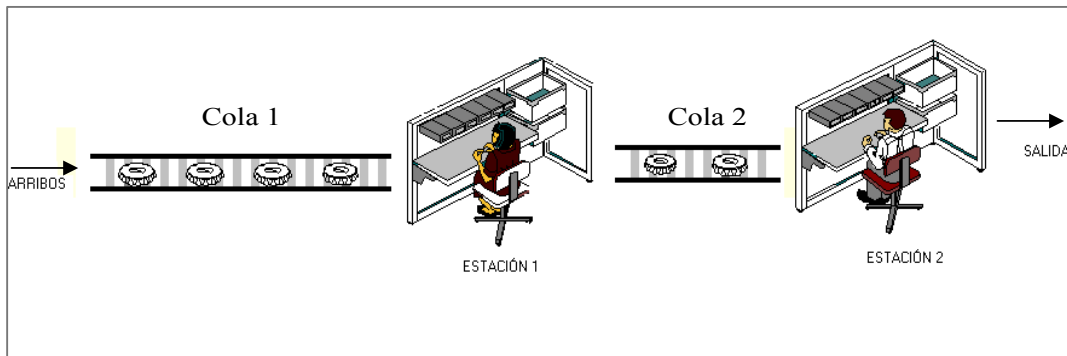
Caso de estudio

**Comparación de escenarios**

Objetivos:

- o Análisis estadístico de los resultados de la simulación: Output Analyzer.
- o Método Pareado para la comparación de escenarios.
- o Uso de Secuencia Común. Análisis e interpretación de los resultados.
- o Variable TAVG(Tally Name), en el módulo Statistic tipo Output.

Al departamento de servicios de una empresa industrial llegan unas piezas. Cada pieza debe pasar por cada estación de trabajo; es decir, se deben ejecutar dos operaciones en serie. Véase el siguiente esquema que describe el proceso:



Según data histórica, las piezas arriban al sistema de acuerdo con una distribución de probabilidad EXPO(2) minutos. El tiempo de servicio en la estación 1 es una distribución NORM(5,0.5) minutos y para la estación 2 es una UNIF(2, 4) minutos. Las piezas son transportadas en forma automática por cada una de las estaciones.

Dado que los operarios pueden procesar una pieza a la vez, frecuentemente se forman colas antes de cada estación de trabajo. Considerar tres escenarios con las siguientes características de capacidad en las estaciones:

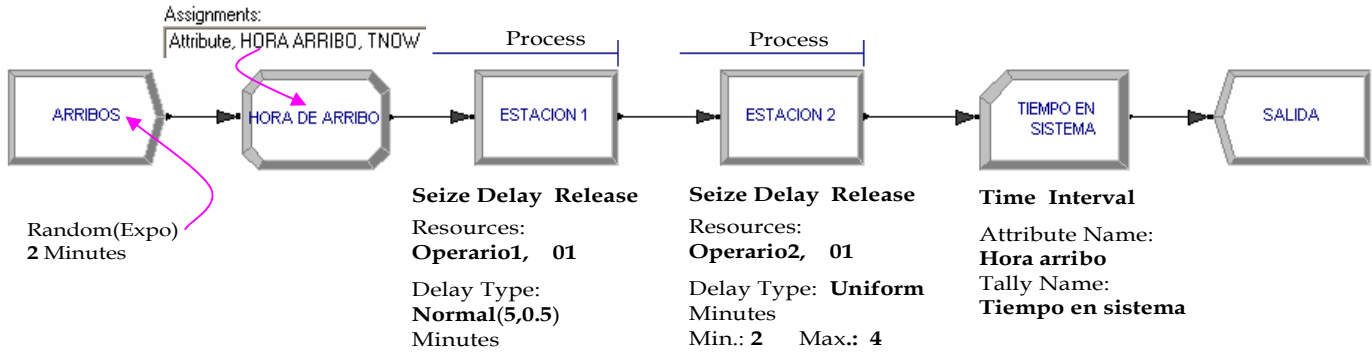
	Número de operarios	
	Estación 1	Estación 2
Escenario 1	1	1
Escenario 2	2	1
Escenario 3	1	2

Simular cada uno de los tres escenarios durante 300 minutos y 10 réplicas. La variable en estudio por medir es el tiempo de ciclo de las piezas.

Se pide:

1. Con un nivel del 95% determinar el intervalo de confianza para el indicador tiempo de ciclo, en cada escenario.
2. Comparar los escenarios 1, 2 y 3 para poder tomar una decisión respecto al número de operarios que debe haber en cada estación.

**Solución**



ESC1 ESC2 ESC3					
	Name	Type	Capacity	Capacity	Capacity
1	OPERARIO1	Fixed Capacity	1	2	1
2	OPERARIO2	Fixed Capacity	1	1	2

	Name	Type	Expression	Output File
1	TIEMPO DE CICLO	Output	TAVG(TIEMPO EN SISTEMA)	C:\ESC1.dat
				C:\ESC2.dat
				C:\ESC3.dat

Run Setup...

Number of Replications: 10

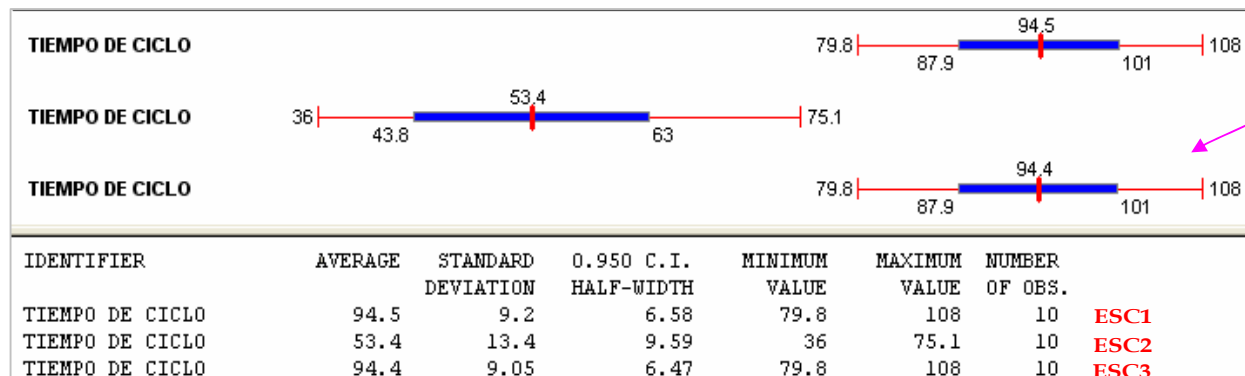
Replication Length: 300 Time Units: Minutes

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

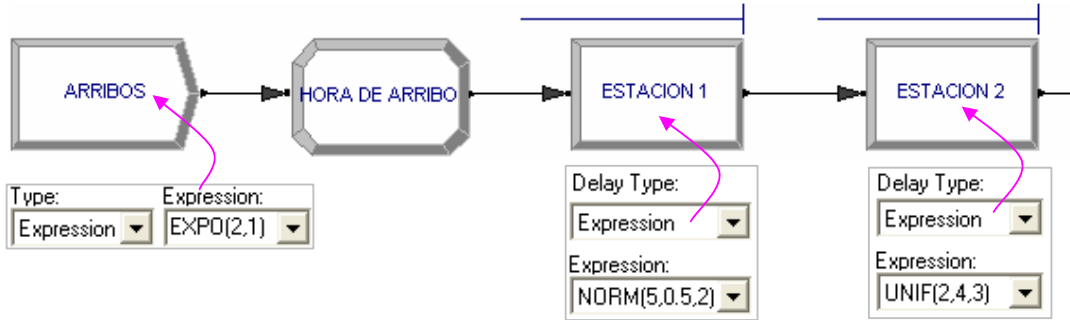
Terminating Condition:

Seguidamente, ejecutamos cada uno de los tres escenarios y realizamos la inferencia estadística mediante la aplicación Output Analyzer, veamos:

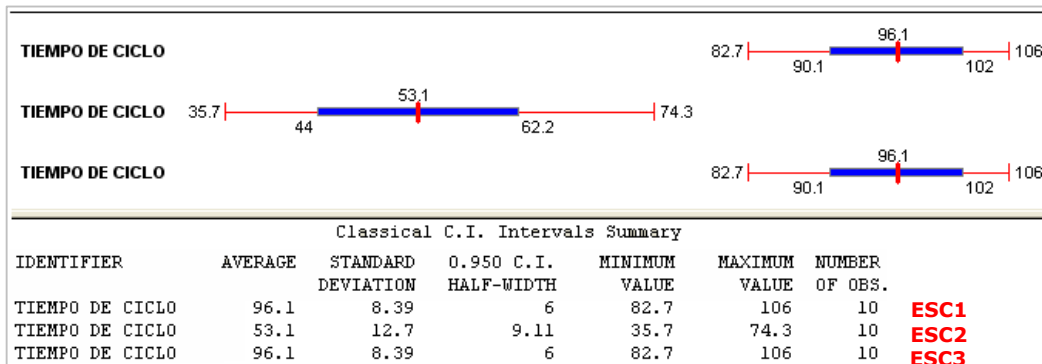
Intervalos de confianza:



Con el propósito de neutralizar la dependencia que se crea entre los valores generados por las distribuciones de probabilidad pertenecientes a una misma secuencia de números aleatorios, una alternativa sería cambiar la secuencia del proceso de la estación 1 para interrumpir la secuencia 10. Otra alternativa es utilizar la secuencia 1 para los arribos y las secuencias 2 y 3 para los procesos, respectivamente. Incluiremos esta última alternativa en el modelo:

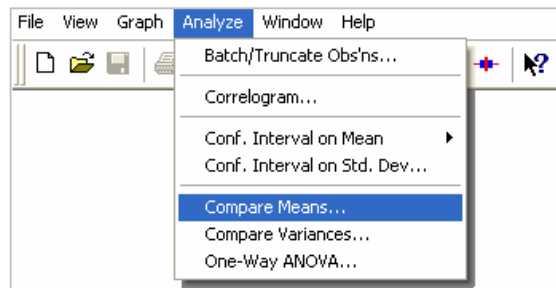


Esta inserción de secuencias se debe realizar en los tres escenarios. Si el objetivo es hacer una comparación de escenarios es importante que se asigne la misma secuencia para los arribos en todos los escenarios, esto asegura que el ritmo de las llegadas sea homogéneo en los escenarios. En general, lo que se debe buscar es realizar las comparaciones en condiciones similares para todos los escenarios a comparar. A continuación se muestran los nuevos resultados:

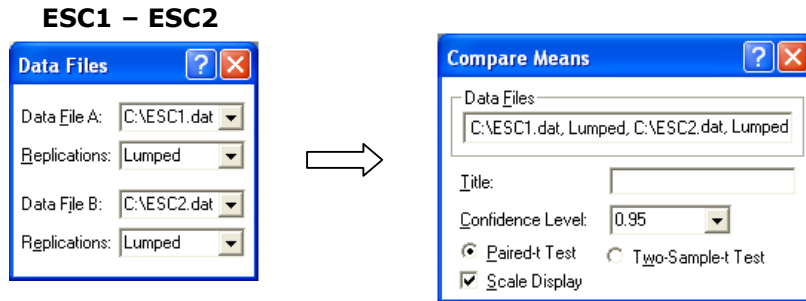


En el reporte anterior se puede observar que ha habido una reducción en la desviación estándar de los escenarios, respecto al primer reporte, lo que se traduce en una reducción del HalfWidth o mitad del intervalo. Esto implica un intervalo más pequeño y con menor riesgo y, por lo tanto, con mayor precisión.

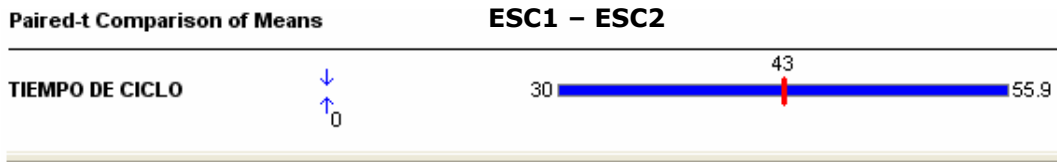
Con la ayuda del Output Analyzer realizaremos el método pareado o comparación de medias, para comparar los tres escenarios:



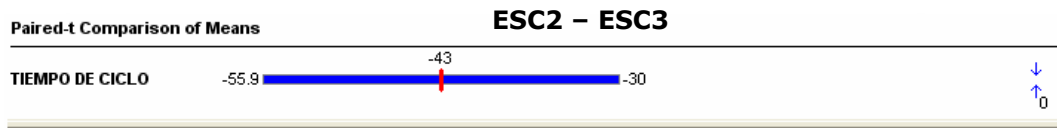
La comparación se realizará por pares, por ejemplo el escenario 1 con el escenario 2. Entonces la expresión se representa mediante la resta del escenario 1 menos el escenario 2:



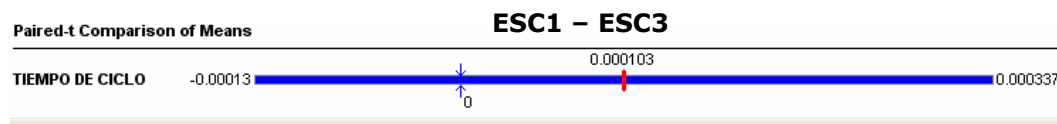
El orden al restar puede ser cualquiera, por ejemplo el escenario 2 menos el escenario 1; sin embargo, debemos tener cuidado al interpretar los resultados. En forma análoga se procede en la comparación de los escenarios 2 y 3 y de los escenarios 1 y 2. Así, obtenemos los siguientes reportes (observe la ubicación del valor cero):



Al comparar ESC1 – ESC2 el intervalo resultante es [+ ,+] es decir [30, 55.9]. El ESC2 es mejor porque es menor que el ESC1, ya que la diferencia es positiva.



Al comparar ESC2 – ESC3 el intervalo resultante es [- , -] es decir [-55.9, -30]. El ESC2 es mejor porque es menor que el ESC1, ya que la diferencia es negativa.



Al comparar ESC1 – ESC3 observe la ubicación del valor cero, el intervalo resultante es [- ,+] es decir [-0.00013,+0.000337]. No existe evidencia suficiente para afirmar que uno es mejor que el otro, las diferencias entre el ESC1 y el ESC3 son insignificantes. Estadísticamente se asume igualdad.

**Interpretación:** Al ejecutar los modelos y observar la animación se puede observar que en el ESC1 la estación 1 se congestiona mucho más que la estación 2. En el ESC2 la situación mejora ya que se agrega un operario a la estación 1, con lo cual se descongestiona. En el ESC3 es irrelevante el cambio, no hay ninguna mejora al aumentar un operario a la estación 2, pues la congestión está en la estación 1. El mejor escenario es el ESC2; entre los ESC1 y ESC3 no existen diferencias significativas.



2

Caso de estudio

**PERT versus simulación de duración de un proyecto<sup>4</sup>**

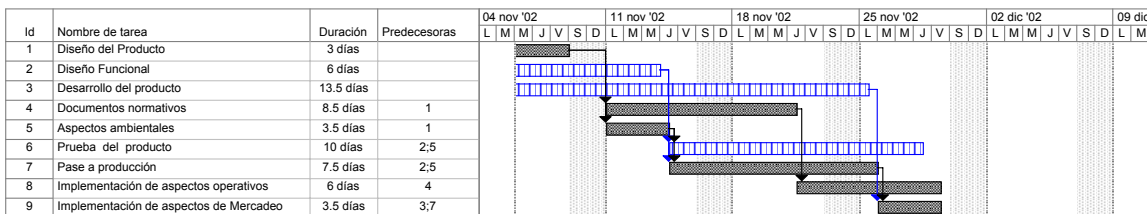
Objetivos:

- Modelado de las actividades de un proyecto.
- Duración promedio del proyecto e intervalo de confianza.
- Análisis estadístico con Múltiples Réplicas: Output Analyzer.
- Uso del módulo Statistic tipo Output file.

El equipo técnico de una empresa se encuentra en la etapa de planeamiento de un proyecto para el lanzamiento de un nuevo producto. En base a datos estadísticos de proyectos anteriores se ha obtenido la duración optimista, más probable y pesimista de las actividades involucradas; luego, mediante la técnica Pert se logra la duración promedio de las actividades. Dado que estas son de naturaleza probabilística, la fecha de finalización del proyecto se convierte en una variable aleatoria. A continuación se muestra la información técnica del proyecto:

<b>I d</b>	<b>Tarea</b>	<b>Tarea predecesora</b>	<b>a</b>	<b>m</b>	<b>b</b>	<b>Tiempo estimado <math>t = (a + 4m + b)/6</math></b>	<b>Costo directo</b>
A	Diseño del producto	-	1	3	5	3	\$15000
B	Diseño funcional	-	3	6	9	6	20000
C	Desarrollo del producto	-	10	13	19	13.5	35000
D	Documentos normativos	A	3	9	12	8.5	4000
E	Aspectos ambientales	A	1	3	8	3.5	2500
F	Prueba del producto	B, E	8	9	16	10	10800
G	Pase a producción	B, E	4	7	13	7.5	2000
H	Implementar aspectos operativos	D	3	6	9	6	1500
I	Implementar aspectos mercadeo	C, G	1	3	8	3.5	3000

Duración estimada del proyecto: 17.5 días (utilizando la técnica Pert-CPM)      \$ 93800



Formular un modelo para simular los tiempos de actividad del proyecto y comparar la duración promedio resultante con la obtenida mediante el Pert. Ejecutar 20 réplicas.

- Determinar el intervalo de duración del proyecto, con nivel de confianza del 95%.
- Determinar la probabilidad de que el proyecto se retrase 2 o más días.

**Escenario 1**

Supóngase que las actividades C, F y H requieren, para su ejecución, del uso de una máquina. Si la empresa dispone solo de una, estimar la duración del proyecto.

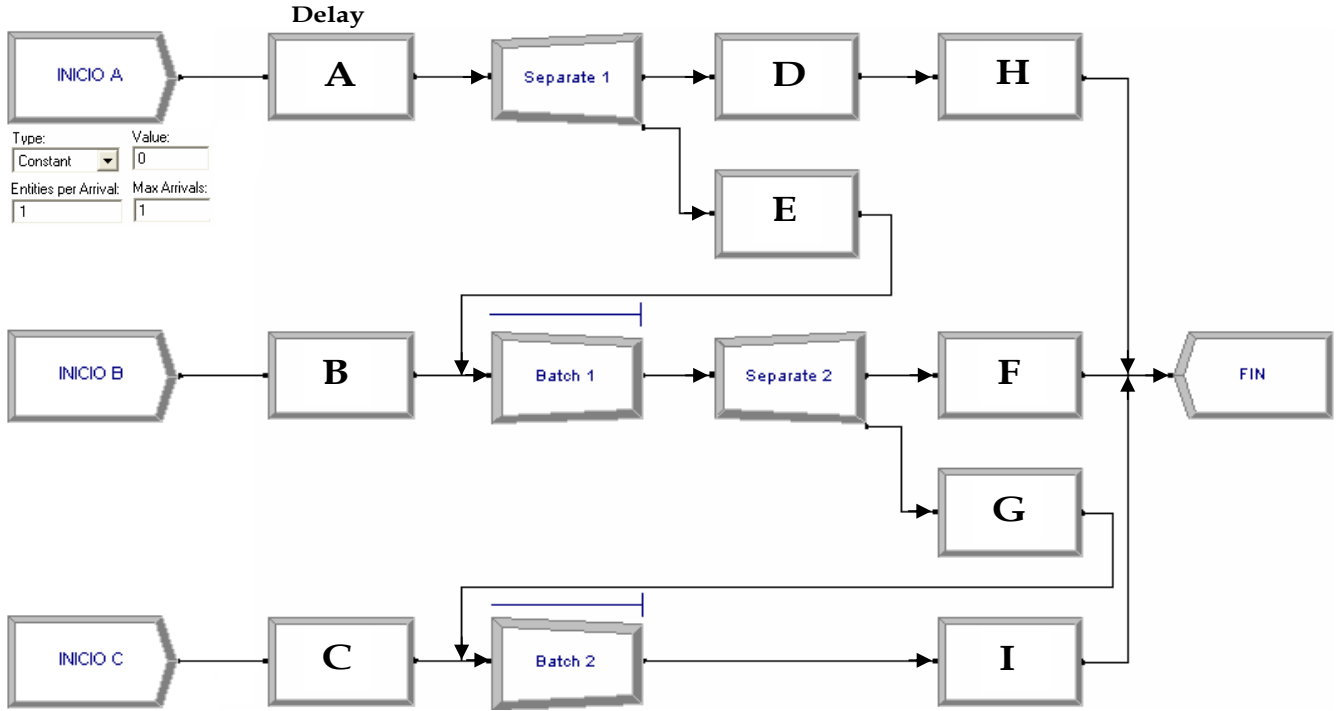
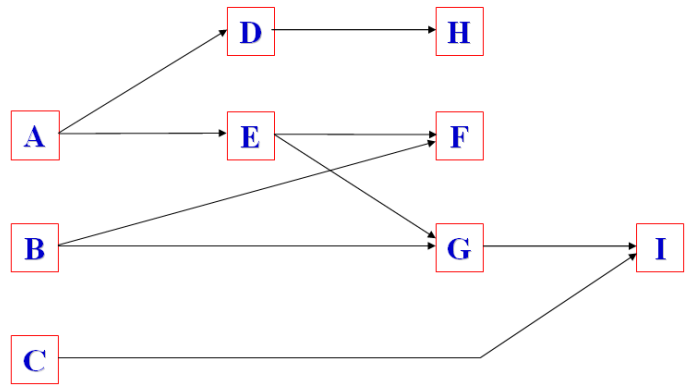
**Escenario 2**

Respecto al escenario inicial, supóngase que se desea estimar el costo total asociado al proyecto (costo directo + costo indirecto). Considerar que además de los costos directos (véase cuadro en la parte superior) también se incurre en un costo de licencia municipal por ejecutar el proyecto, equivalente a \$100 por día.

<sup>4</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. *Simulation with visual SLAM and AweSim*, 1999.

**Solución**

Id	Tarea predecesora	Delay
A	-	TRIA( 1, 3, 5 ) días
B	-	TRIA( 3, 6, 9 ) días
C	-	TRIA(10, 13, 19) días
D	A	TRIA( 3, 9, 12 ) días
E	A	TRIA( 1, 3, 8 ) días
F	B, E	TRIA( 8, 9, 16 ) días
G	B, E	TRIA( 4, 7, 13 ) días
H	D	TRIA( 3, 6, 9 ) días
I	C, G	TRIA( 1, 3, 8 ) días

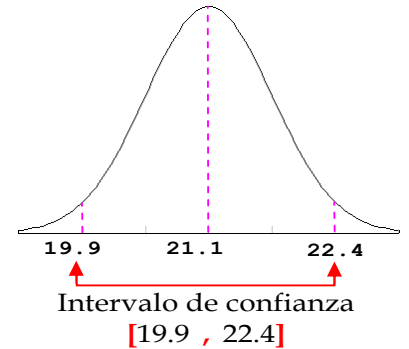
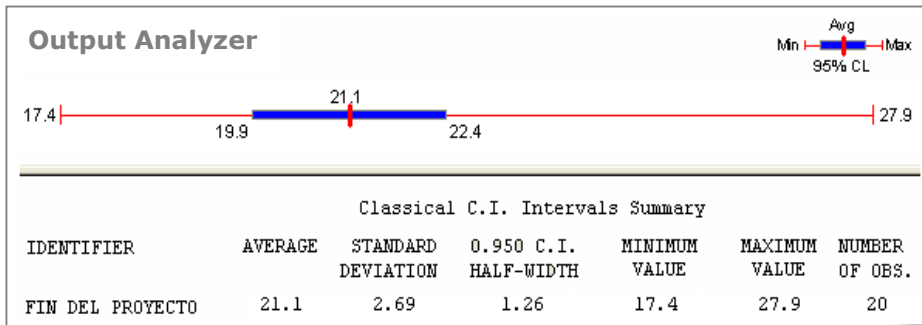


Type: Constant Value: 0  
 Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: 1

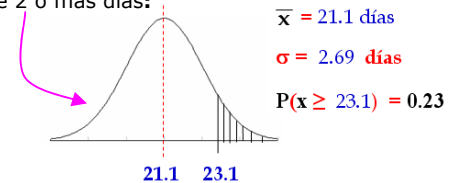
Run Setup...  
 Number of Replications: 20  
 Hours Per Day: 24 Base Time Units: Days  
 Terminating Condition:



Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1 FIN DEL PROYECTO	Output	TNOW	FIN DEL PROYECTO	C:\ESCO.dat



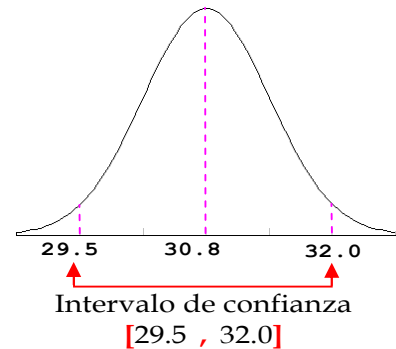
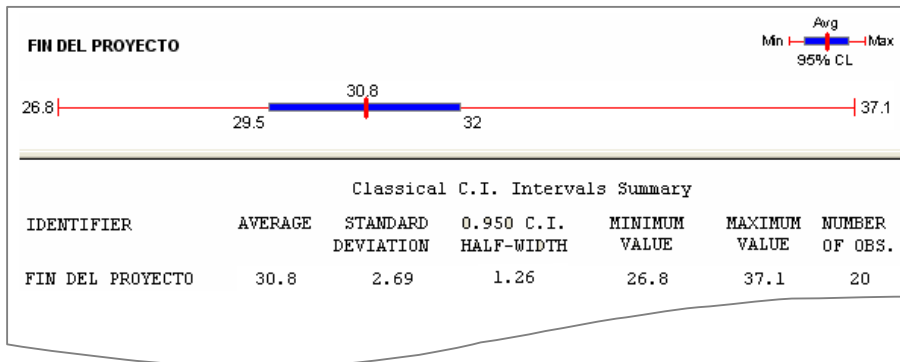
Probabilidad de que el proyecto se retrase 2 o más días:



**Análisis:** La duración promedio para el proyecto es de 21.1 días; esta difiere con los 17.5 días obtenidos con la técnica PERT-CPM. La simulación se basa en la generación de tiempos aleatorios para las actividades y en el número de replicaciones, mientras que la técnica PERT-CPM asigna los tiempos a las actividades como un promedio ponderado de valores previamente estimados.

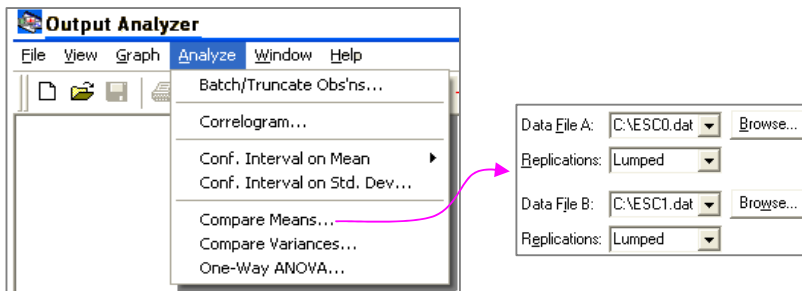
### Escenario 1

En el módulo Process de las actividades C, F y H cambiamos a un Seize-Delay-Release y asignamos un recurso Máquina. Los nuevos resultados son los siguientes:

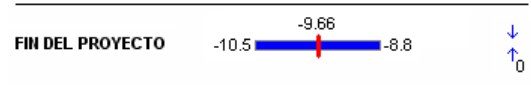


Con una sola máquina y tres actividades que compitan por esta, era de esperarse que la duración inicial del proyecto se prolongue hasta 30.8 días.

Comparación de escenarios: **ESCO** vs **ESC1**



#### Paired-t Comparison of Means



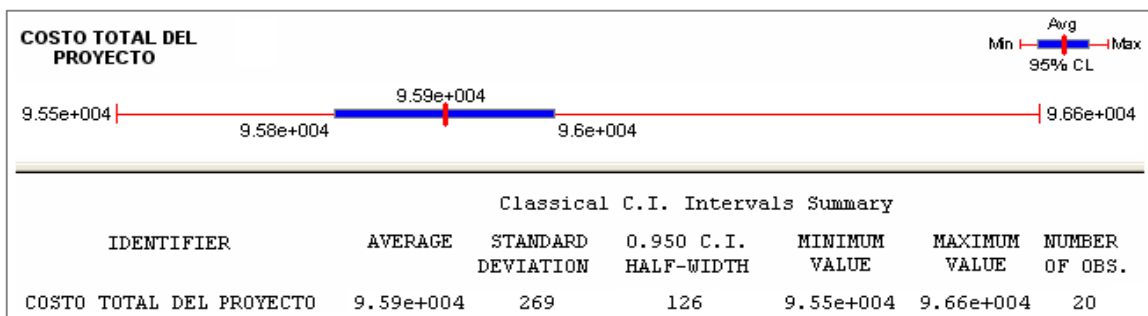
Dado que ambos límites del intervalo son negativos, entonces el ESC0 es menor, por lo tanto es mejor que el ESC1.

### Escenario 2:



	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	COSTO TOTAL DEL PROYECTO	Output	TNOW*100 + 93800	COSTO TOTAL DEL PROYECTO	C:\COSTO TOTAL PROJ.dat

User Specified				
Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	95913.27	125,70	95538.55	96585.7



**Análisis:** El reporte nos proporciona el costo total promedio que demandará el proyecto: \$95913.27; este monto incluye los costos directos e indirectos. Además, nos proporciona el intervalo de confianza en que podría oscilar el costo del proyecto, con un nivel de confianza del 95%.

## 3

## Caso de estudio

**Control de inventarios y venta con entrega diferida<sup>5</sup>**

## Objetivos:

- Modelado de sistemas de inventario con entregas diferidas.
- Variables MR y NR. Cálculo de la disponibilidad del recurso.
- Determinación e interpretación de principales indicadores de desempeño.
- Análisis estadístico con múltiples réplicas: Output Analyzer.
- Módulo Statistic (Output file).

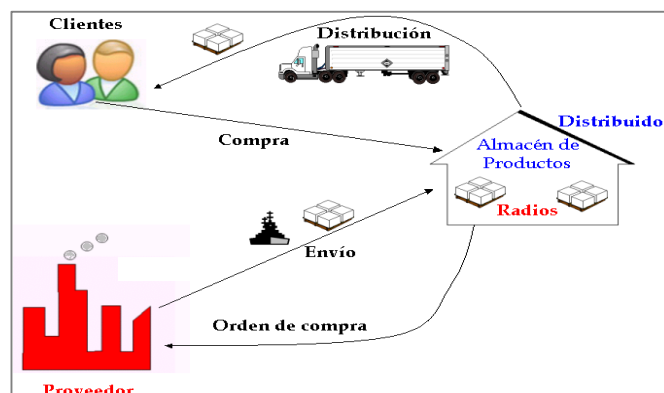
Una empresa distribuidora de radios planea instalar un sistema de control de inventarios. El tiempo entre demandas para su producto está exponencialmente distribuido con una media de 0.2 semanas.

En el caso en el que los clientes demandan el producto pero este no está en *stock* el 80% de estos cancela su pedido y se dirige al distribuidor más cercano, mientras que el otro 20% realizará siempre el pedido, y en todo caso acepta que la entrega sea diferida hasta el arribo del próximo embarque.

La distribuidora emplea un sistema de revisión periódico para realizar un nuevo pedido, de tal forma que el estado del inventario es revisado cada 4 semanas para decidir si se debe emitir una orden de pedido. Esta solo se emite si la cantidad en *stock* es igual o inferior a 18 unidades (punto de reorden).

Por política de la empresa, la magnitud de cada pedido es hasta completar el nivel máximo de *stock* de 72 radios, para cualquier nivel de inventario en que se encuentre. El tiempo desde que se emite la orden de pedido hasta que llega la mercadería (*Lead Time*) es constante y de 3 semanas.

Las condiciones iniciales para la simulación corresponden a un nivel de inventario de 72 radios y no existen entregas diferidas al inicio.



Simular el sistema de inventario por un período de 6 años (312 semanas). Obtener e interpretar los principales indicadores asociados a un sistema de inventarios.

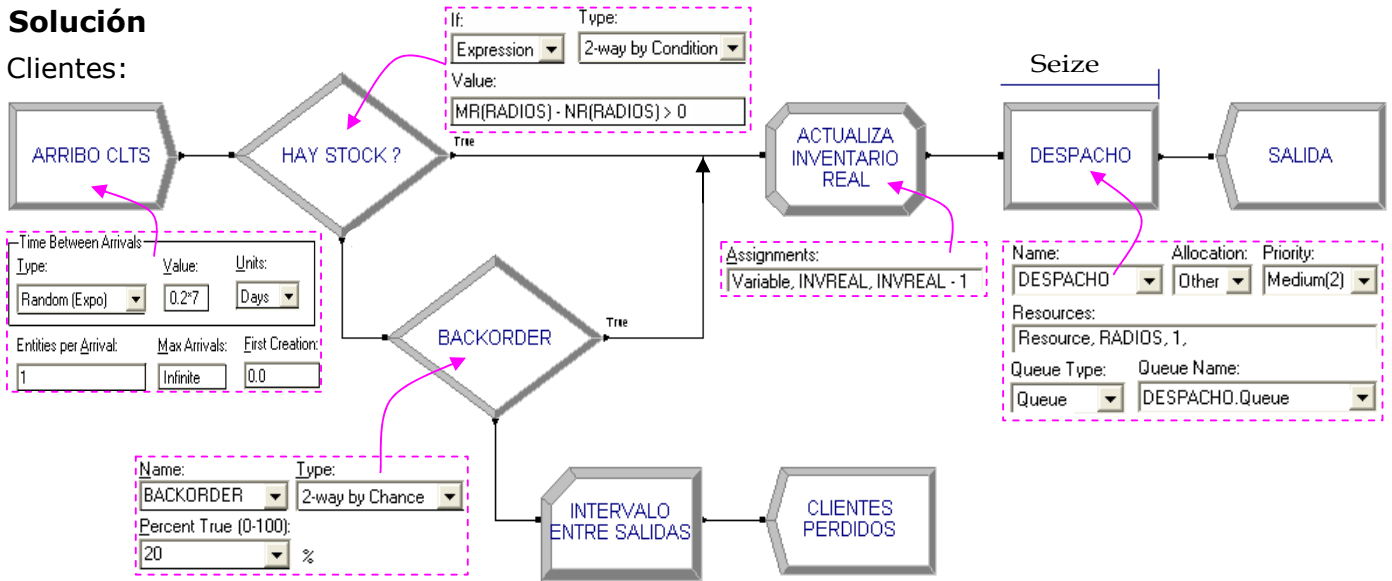
**Escenario 1**

Con el fin de reducir el sesgo en las estadísticas debido a las condiciones iniciales, todas las estadísticas del primer año deben ser eliminadas. Ejecutar 10 réplicas y determinar los intervalos de confianza para el Inventario Promedio, Venta Total y la Rotación del Inventario, para un nivel de confianza del 95%.

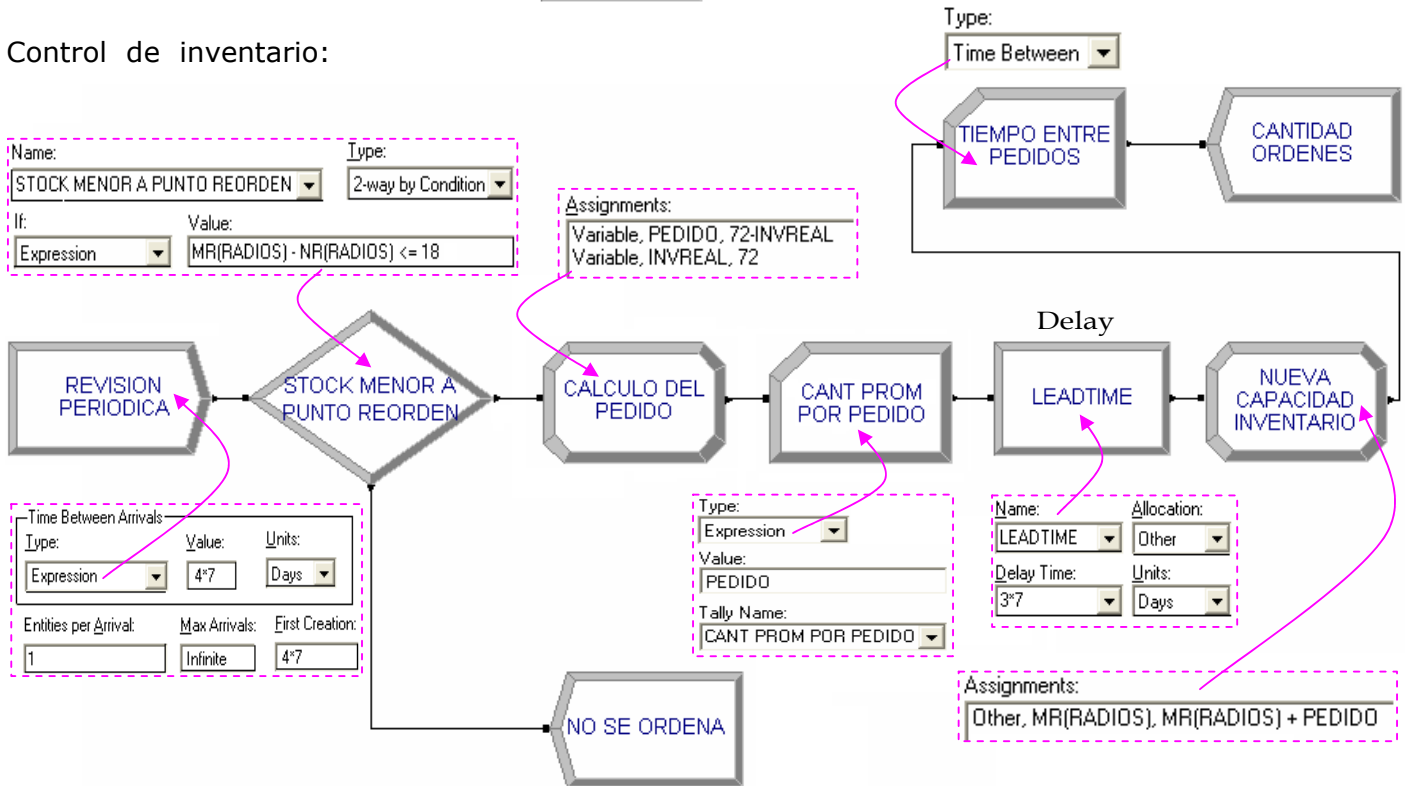
<sup>5</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. *Simulation with Visual SLAM and AweSim*, 1999.

### Solución

#### Clientes:



#### Control de inventario:



Resource	Name	Type	Capacity
1	RADIOS	Fixed Capacity	72

Variable	Name	Rows	Columns	Initial Values	Report Statistics
1	INVREAL			1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>
2	PEDIDO			1 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Initial Values
72
Initial Values
0

**Setup ...** Replication Parameters

Number of Replications: 1

Start Date and Time: lunes, 01 de enero de 2007 0:00:00

Warm-up Period: 0.0 Time Units: Hours

Replication Length: 312\*7 Time Units: Days

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Days

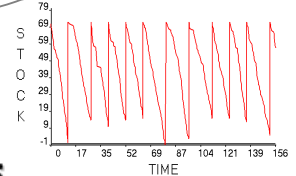
Terminating Condition:

User Specified				
<b>Tally</b>				
		Average		
INTERVALO ENTRE SALIDAS		14.6486		
TIEMPO ENTRE PEDIDOS		93.3333		
<b>Time Persistent</b>				
		Average		
INVENTARIO PROMEDIO		29.0745		
Variable	Average	Minimum Value	Maximum Value	
INVREAL	42.2277	-2	72.0000	
Expression	Average			
CANT PROM POR PEDIDO		63.3478		

Resource				
<b>Usage</b>				
		Average		
Instantaneous Utilization		0.9186		
RADIOS		0.9186		
Total Number Seized		Value		
RADIOS		1457.00		
Number Busy	Average	Minimum Value	Maximum Value	
RADIOS	711.54	0.00	1457.00	

Queue				
<b>Time</b>				
		Average	Minimum Value	Maximum Value
DESPACHO.Queue	0.2461	0.00	23.1599	
<b>Other</b>				
		Average	Minimum Value	Maximum Value
Number Waiting	0.1642	0.00	8.0000	

## Medición de Indicadores



1. Se vendieron: **1457 radios** (véase en el Reporte: **Resource** / Total Number Seized)

Alternativas:



Name	Type	Expression
VENTA TOTAL	Output	NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Busy



Name	Type	Expression
VENTA TOTAL	Output	ResSeizes(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Total Number Seized

2. Se perdieron: **142 clientes**, *aprox.* 9%. (**Intervalos entre salidas + 1**)



Name	Type	Expression
CLIENTES PERDIDOS	Output	TNUM(INTERVALO ENTRE SALIDAS)

Build Expression/Basic Process/Record/Tally/Number Of Observations

3. En promedio, cada **14.648** días se pierde un cliente, porque no hay *stock* y este no acepta la entrega diferida o *backorder* (véase Reporte: **User Specified** / Intervalo entre salidas).

Alternativa:



Name	Type	Expression
INTERVALO	Output	TAVG(INTERVALO ENTRE SALIDAS)

Build Expression/Basic Process/Record/Tally/Average Value

4. En promedio, cada **93.33** días llega un pedido al almacén (véase Reporte: **User Specified** / Tiempo entre pedidos)

Alternativa:



Name	Type	Expression
INTERVALO ENTRE PEDIDOS	Output	TAVG(TIEMPO ENTRE PEDIDOS)

Build Expression/Basic Process/Record/Tally/Average Value

5. Número promedio de unidades por pedido: **63.3478** radios (véase Reporte: **User Specified** / Cantidad Prom. por pedido)

Alternativa:



Name	Type	Expression
PEDIDO PROMEDIO	Output	TAVG(CANT PROM POR PEDIDO)

Build Expression/Basic Process/Record/Tally/Average Value

6. Rotación del inventario: **23 veces.**



Name	Type	Expression
ROTACION DEL INVENTARIO	Output	TNUM(CANT PROM POR PEDIDO)

Build Expression/Basic Process/Record/Tally/ Number Of Observations

7. Máximo de tiempo que espera un cliente por la entrega diferida: **23.1599 días.** (Véase Reporte en: Queue)



Name	Type	Expression
ESPERA MAXIMA DEL CLTE	Output	TMAX(DESPECHO.Queue.WaitingTime)

Build Expression/Basic process/Queue/Average Wait Time  
(Luego cambiar TAVG por TMAX)

Máximo número de clientes en espera por la entrega diferida: **8 clientes.** (Véase Reporte en: Queue)



Name	Type	Expression
MAXIMO NUMER CLTS EN ESPERA	Output	DMAX(DESPECHO.Queue.NumberInQueue)

Build Expression/Basic process/Queue/Average Number In Queue  
(Luego cambiar DAVG por DMAX)

8. Inventario promedio o disponibilidad promedio del producto: **29.0745 radios.**



Name	Type	Expression
INVENTARIO PROMEDIO	Time-Persistent	MR(RADIOS) - NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Scheduled - Current Number Busy

9. Utilización promedio: **91.86%.** (Véase Reporte: **Resource** / Instantaneous Utilization)

Alternativas:



Name	Type	Expression
UTILIZACION PROMEDIO	Time-Persistent	NR(RADIOS) / MR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/ Current Number Busy ÷ Current Number Scheduled



Name	Type	Expression
UTILIZACION PROMEDIO	Time-Persistent	ResUtil(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Utilization

10. Venta promedio: **711.54 unidades.** (Véase Reporte: **Resource** / Number Busy)

Alternativas:



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Time-Persistent	NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/ Current Number Busy



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Time-Persistent	ResSeizes(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Total Number Seized



Name	Type	Expression
VENTA PROMEDIO	Output	DAVG(RADIOS.NumberBusy)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Average Number Busy

11. ¿Cómo quedó el stock, al final de la simulación? **0 radios**, sin existencias.



Name	Type	Expression
STOCK AL FINAL	Output	MR(RADIOS) - NR(RADIOS)

Build Expression/Basic Process/Resource/Usage/Current Number Scheduled - Current Number Busy

12. Total de revisiones periódicas realizadas: **78 veces**.



Name	Type	Expression
REVISIONES PERIODICAS	Output	REVISION PERIODICA.NUMBEROUT

Ingreso Directo respecto del Segundo CREATE.

13. Valor mínimo de la variable Invreal: **-2** (Véase Reporte: **User Specified / Variable**)

Alternativas:



Name	Type	Expression
VAL MIN VAR INVREAL	Output	DMIN(INVREAL Value)

Build Expression/Basic Process/Variable/Minimum Value



Name	Type	Expression
VALOR MIN VARIABLE INVREAL	Time-Persistent	DMIN(INVREAL Value)

Colocando en **Type**: "Time Persistent", obtenemos el valor promedio y el valor mínimo.

### Escenario 1

**Setup ...** Replication Parameters

Number of Replications: 10

Initialize Between Replications:  Statistics  System

Start Date and Time: lunes, 01 de enero de 2007 0:00:00

Warm-up Period: 52\*7

Time Units: Days

Replication Length: 312\*7

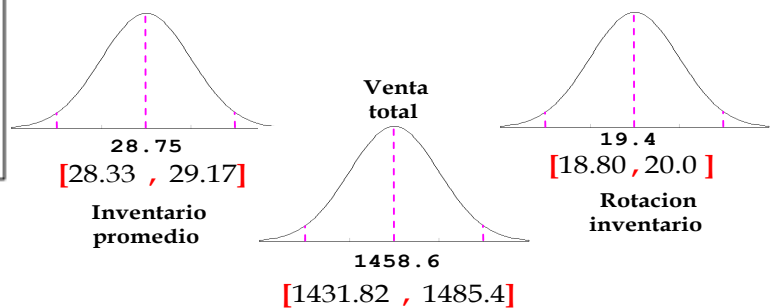
Time Units: Days

Hours Per Day: 24

Base Time Units: Days

Terminating Condition:

User Specified				
Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
INVENTARIO PROMEDIO	28.7462	0.42	27.5425	29.6120
VENTA TOTAL	1458.60	26.78	1400.00	1532.00
ROTACION DEL INV	19.4000	0.60	18.0000	21.0000

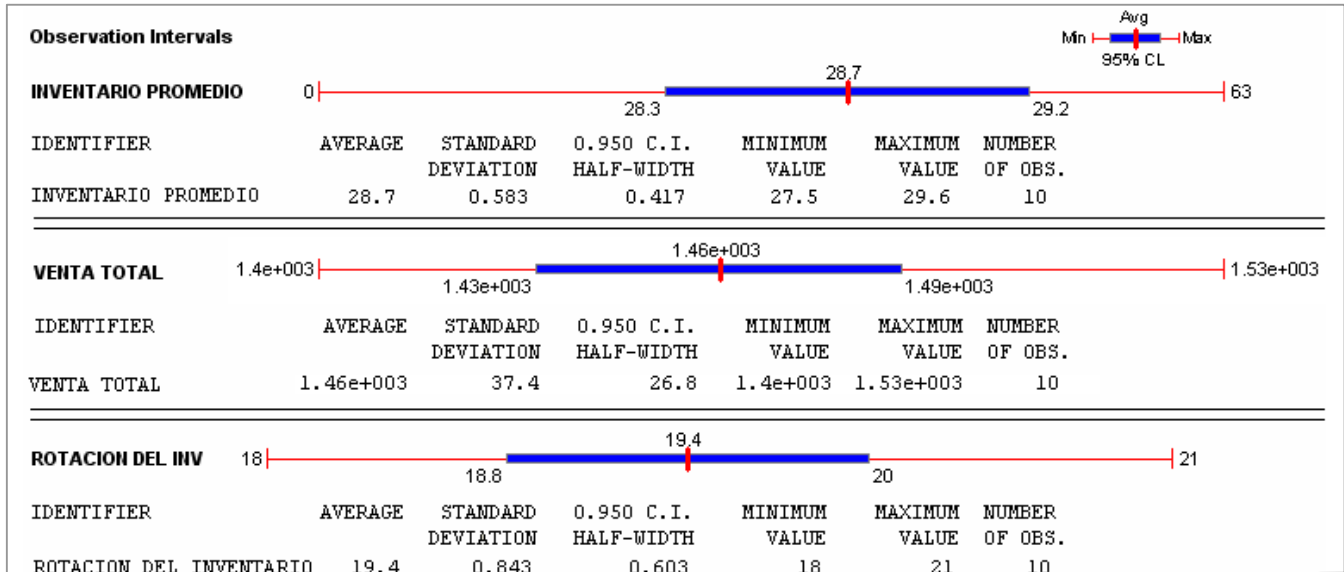


	Name	Type	Expression	Output File
1	INVEN PROM	Time-Persistent	MR(RADIOS) - NR(RADIOS)	
2	INVENTARIO PROMEDIO	Output	DAVG(INVEN PROM)	C:\INVEN PROM.dat
3	VENTA TOTAL	Output	NR(RADIOS)	C:\VENTA TOTAL.dat
4	ROTACION DEL INV	Output	TNUM(CANT PROM POR PEDIDO)	C:\ROTACION.dat



### Output Analyzer:

A continuación, se presenta los intervalos de confianza para un nivel del 95%, para los indicadores pedidos:

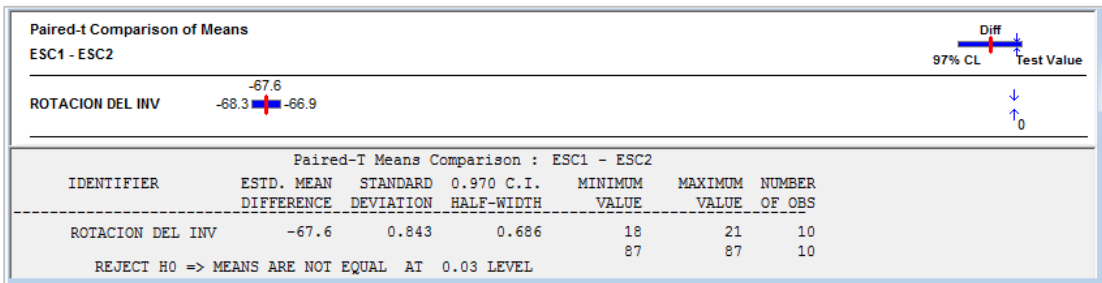


### Escenario 2

Suponga que se desea investigar si se produce una variación en la rotación promedio del inventario si se reduce el intervalo para efectuar la revisión periódica, de 4 a 3 semanas.

Name	Type	Expression	Output File
1 ROTACION DEL INV	Output	TNUM(CANT PROM POR PEDIDO)	C:\ESC2.DAT

El resultado de la comparación de medias (abajo) arroja que si existen diferencias significativas; la rotación en el escenario dos es mayor:



## 4

## Caso de estudio

**Simulación del tráfico en una vía expresa<sup>2</sup>****Objetivos:**

- Configuración del experimento de simulación: Determinación del número de réplicas y del período de calentamiento. Selección de las variables de interés.
- Modelado de la vía expresa y de semáforos.
- Análisis estadístico del experimento de simulación: determinación de intervalos de confianza. Comparación de medias para muestras relacionadas (Paired-t) y para muestras independientes (Two Sample-t). Técnicas de reducción de varianza: secuencias comunes y secuencias antitéticas. Prueba de normalidad.

**RESUMEN:** El creciente aumento de vehículos produce serios problemas de congestión en centros urbanos, esta situación genera interrogantes sobre los métodos de control de las variables de interés en esta problemática. El caso de estudio presentado es una aproximación al tema y se basa en un escenario hipotético (vía expresa) que se modela y simula con un enfoque microscópico, considerando el movimiento individual de los vehículos. Se presenta una metodología para el análisis estadístico de los resultados de la simulación.

*Palabras clave:* Simulación sistemas estocásticos / Ingeniería de tráfico / Análisis estadístico resultados simulación / Proyectos de simulación.

## 1. Introducción

La variabilidad e incertidumbre son características inherentes en cualquier sistema que involucre personas y maquinarias. La simulación de procesos estocásticos en producción, logística y servicios se utiliza cada vez más en la investigación de sistemas de creciente complejidad y variabilidad, que no podrían ser estudiados y evaluados mediante técnicas analíticas convencionales.

El presente artículo muestra los principales aspectos en el modelado de un sistema básico de control del tráfico para simularlo y observar su comportamiento en el ritmo de arribos, tiempo de recorrido y velocidades, así como monitorear el tráfico, experimentar congestionamientos y evaluar medidas para controlar el exceso de velocidad. También se modela y evalúa el funcionamiento de semáforos en intersecciones.

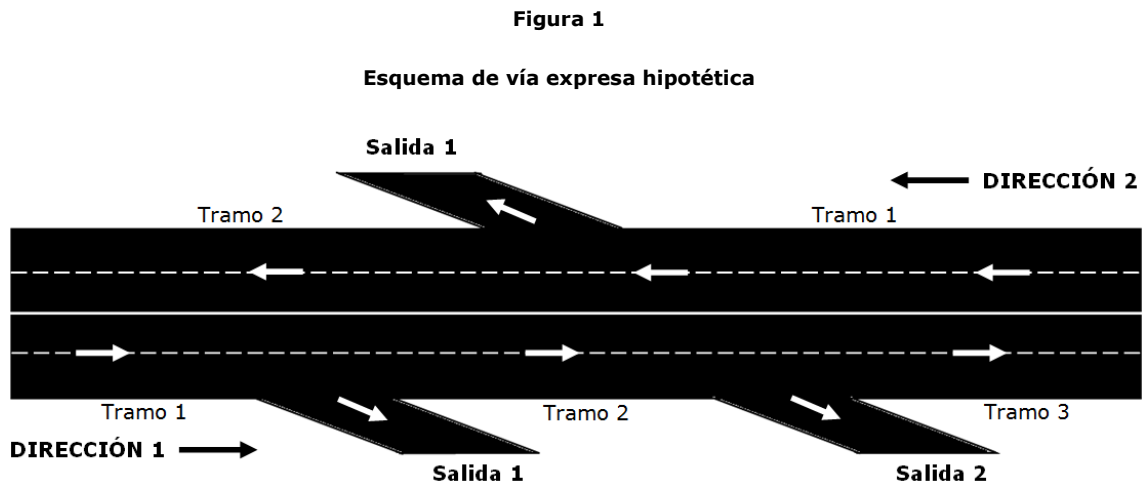
Dado que las muestras aleatorias son realizaciones de variables aleatorias, entonces las estimaciones podrían diferir significativamente de las respuestas verdaderas para el modelo y haber una significativa probabilidad de obtener inferencias erróneas acerca del sistema bajo estudio. En este sentido, se ilustra los aspectos más relevantes que deben ser abordados en la configuración de un experimento de simulación, tales como la determinación del tiempo de simulación adecuado, el número de réplicas, el período de calentamiento, evaluación de indicadores para someterlos a la prueba normalidad y aplicación de técnicas de reducción de varianza. Finalmente, se identifica y

<sup>2</sup> Tomado de TORRES VEGA, P. J.; artículo de la "Revista Ingeniería Industrial" Universidad de Lima, 2012.

mide los principales indicadores de desempeño del sistema y se muestra una metodología para realizar el análisis estadístico de las respuestas del modelo respecto a las variables de interés y la comparación de escenarios. Estos aspectos aseguran la validez estadística de los indicadores para realizar inferencia estadística con un determinado nivel de confianza.

## 2. Descripción del caso hipotético

Se desea simular el funcionamiento de una vía expresa en sus dos direcciones y se han establecido algunos supuestos que describiremos a continuación. La entrada de los vehículos a la vía se produce sólo al inicio de cada dirección y no hay entradas laterales. La dirección uno tiene dos salidas laterales y una tercera salida al final de la vía; la dirección dos tiene una salida lateral y una salida al final de la vía como se muestra en la Figura 1.



Los vehículos llegan a la vía con un tiempo entre arribos que se ajusta a una distribución exponencial con una media de 40 segundos para la dirección uno y una media de 45 segundos para la dirección dos. De los vehículos que viajan en la dirección uno, el 30% se desvían por la salida uno, de los que quedan y recorren el tramo dos, el 60% toma la salida dos, el resto continúa hasta el final de la vía. En la dirección dos hay solo una salida lateral, el 30% toma la salida uno y el resto de los vehículos llegan hasta el final. En el cuadro 1 se muestran los tiempos de recorrido y las probabilidades de arribo de los vehículos:

**Cuadro 1**  
**Tiempos de recorrido y probabilidades de arribo**

Rangos de velocidades (km./hora)	Dirección 1		Dirección 2	
	Probabilidad de arribo	Tiempo de recorrido (minutos)	Probabilidad de arribo	Tiempo de recorrido (minutos)
hasta 60	0.30	uniforme (25,30)	0.40	uniforme (22,26)
60 - 80	0.50	uniforme (18,20)	0.45	uniforme (16,19)
más de 80	0.20	uniforme (14,18)	0.15	uniforme (12,16)

En la dirección uno, los tiempos de recorrido para los tramos dos y tres corresponden al 80% y 30% del tiempo de recorrido del tramo uno, respectivamente. En la dirección dos, el tiempo de recorrido del segundo tramo es el 60% del tiempo de recorrido del tramo uno. Al final de cada vía, existe un cruce o intersección en la que se ubica un semáforo, los tiempos de funcionamiento de los semáforos se muestran en el cuadro 2.

**Cuadro 2**  
**Tiempos de funcionamiento de los semáforos**

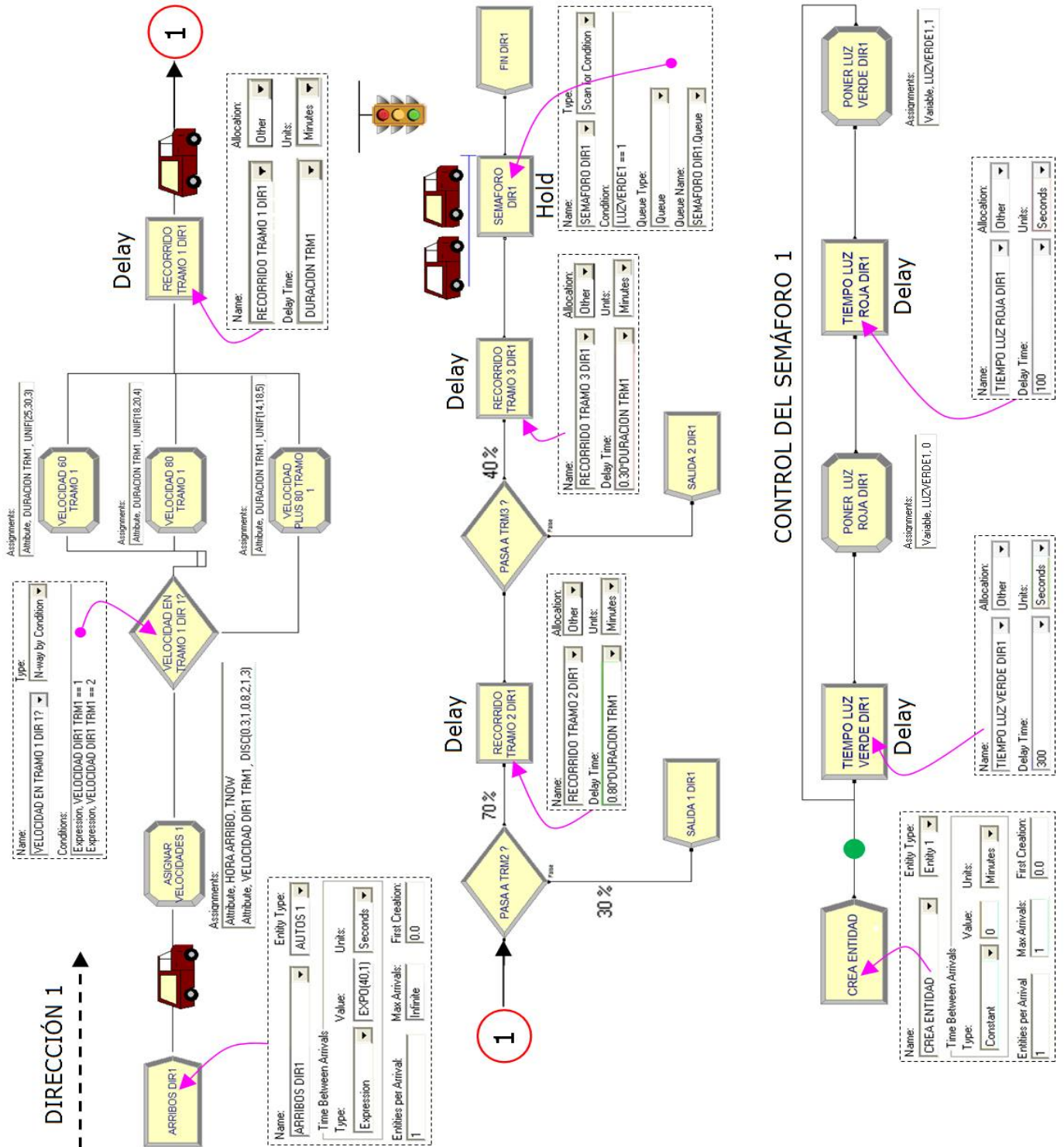
Tiempo	Dirección 1		Dirección 2	
	Luz verde	Luz roja	Luz verde	Luz roja
segundos	300	100	240	120

Las condiciones iniciales para el experimento establecen que el semáforo de la dirección uno iniciará con luz verde y el de la dirección dos con luz roja, considerando despreciable los tiempos de arranque de los vehículos al inicio de la luz verde.

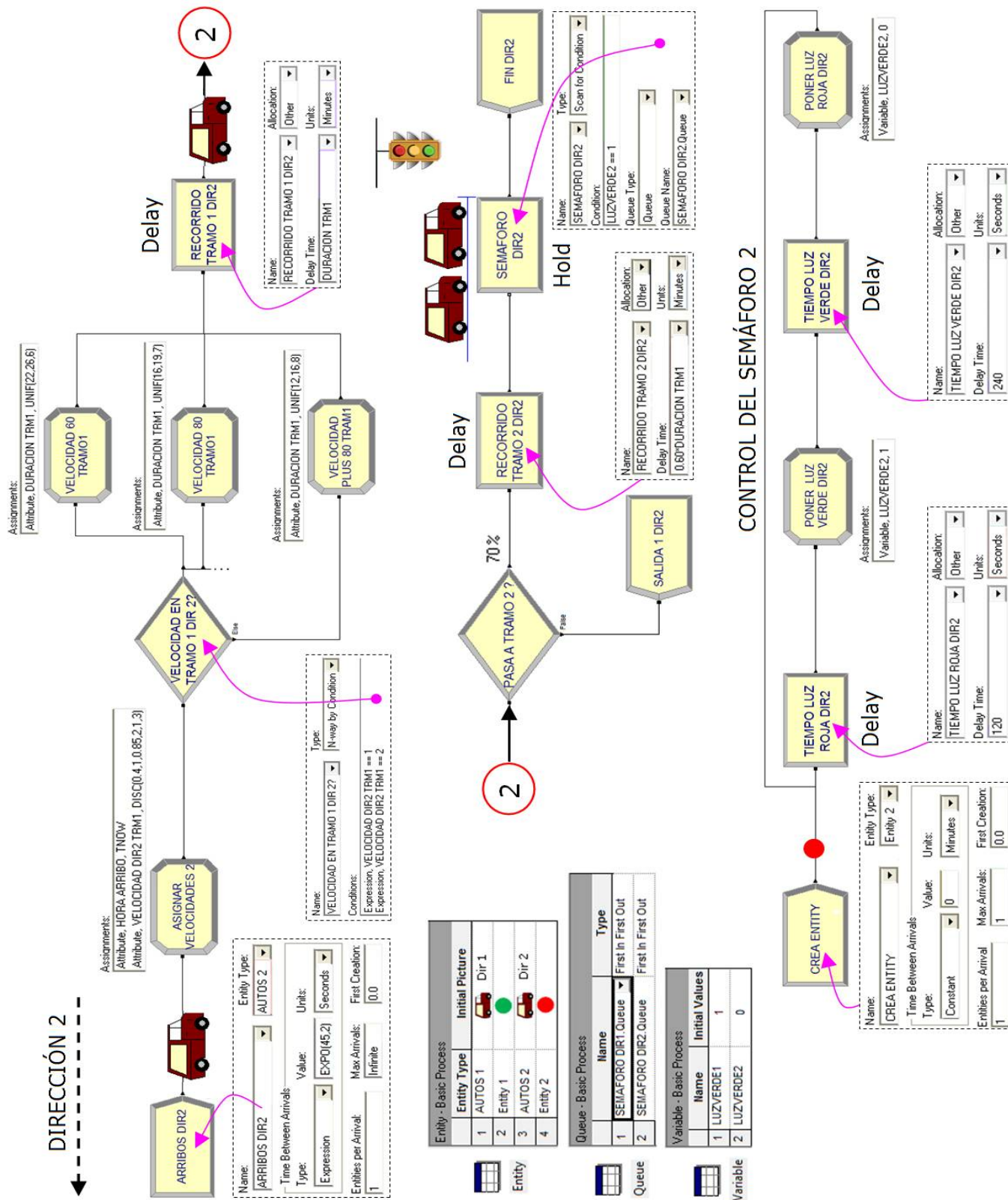
### 3. Modelado del sistema, por procesos

El modelo completo para el caso en estudio, se muestra en las Figuras 2 y 3.

**Figura 2**  
**Modelo dirección 1, software Arena, Rockwell software**



**Figura 3**  
**Modelo dirección 2, software Arena, Rockwell software**

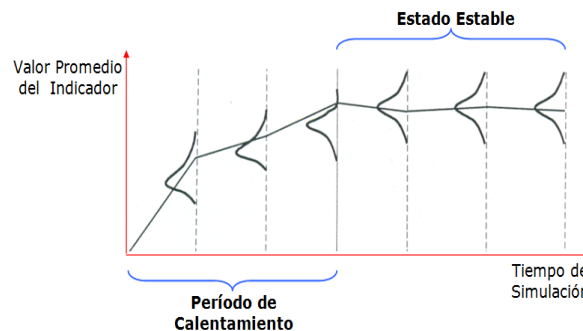


#### 4. Configuración del experimento de simulación

El sistema en estudio corresponde a un sistema de estado estable ya que el funcionamiento de una vía expresa se centra en el largo plazo, o no tiene término. En cuanto al tiempo de simulación, éste debe ser el adecuado, si la simulación es muy corta los resultados pueden ser altamente variables; la simulación debe correr hasta que el intervalo de confianza del indicador medido se aproxime a la amplitud deseada. En nuestro experimento, consideraremos un período de ejecución igual a 60 horas de funcionamiento como punto de partida, el cual podría incrementarse para asegurarnos de que sea lo suficiente como para lograr los objetivos del estudio.

Como condiciones iniciales del experimento, se plantea la suposición de que el sistema estará vacío al inicio de la simulación. Estas condiciones determinan un sesgo inicial que influye en el tiempo que lleva alcanzar la estabilidad en los resultados y en las estimaciones calculadas. El sistema alcanzará la estabilidad después de un cierto período de calentamiento o "warm up" (ver Figura 4) que es necesario determinar y eliminar de las estadísticas generales ya que distorsionan los resultados de los indicadores y los inclinan hacia valores inferiores en los momentos iniciales de la simulación, respecto a los que se obtendrían cuando se alcance la estabilidad.

**Figura 4**  
**Esquema período calentamiento**



Al eliminar de las estadísticas este período de calentamiento, los indicadores tienden a incrementar sus valores, ya que serán medidos a partir de haber alcanzado la estabilidad. Por lo tanto, se obtienen indicadores más precisos y cercanos con la realidad del sistema estable. Otra manera de anular este sesgo inicial es simular durante un período de tiempo muy largo.

En cuanto al número de réplicas, se determinará en función a una precisión de 0.1 minutos que se desea obtener en el tiempo de permanencia de los autos en la vía expresa (indicador de referencia). Dicha precisión es la mitad del ancho del intervalo o "Half Width".

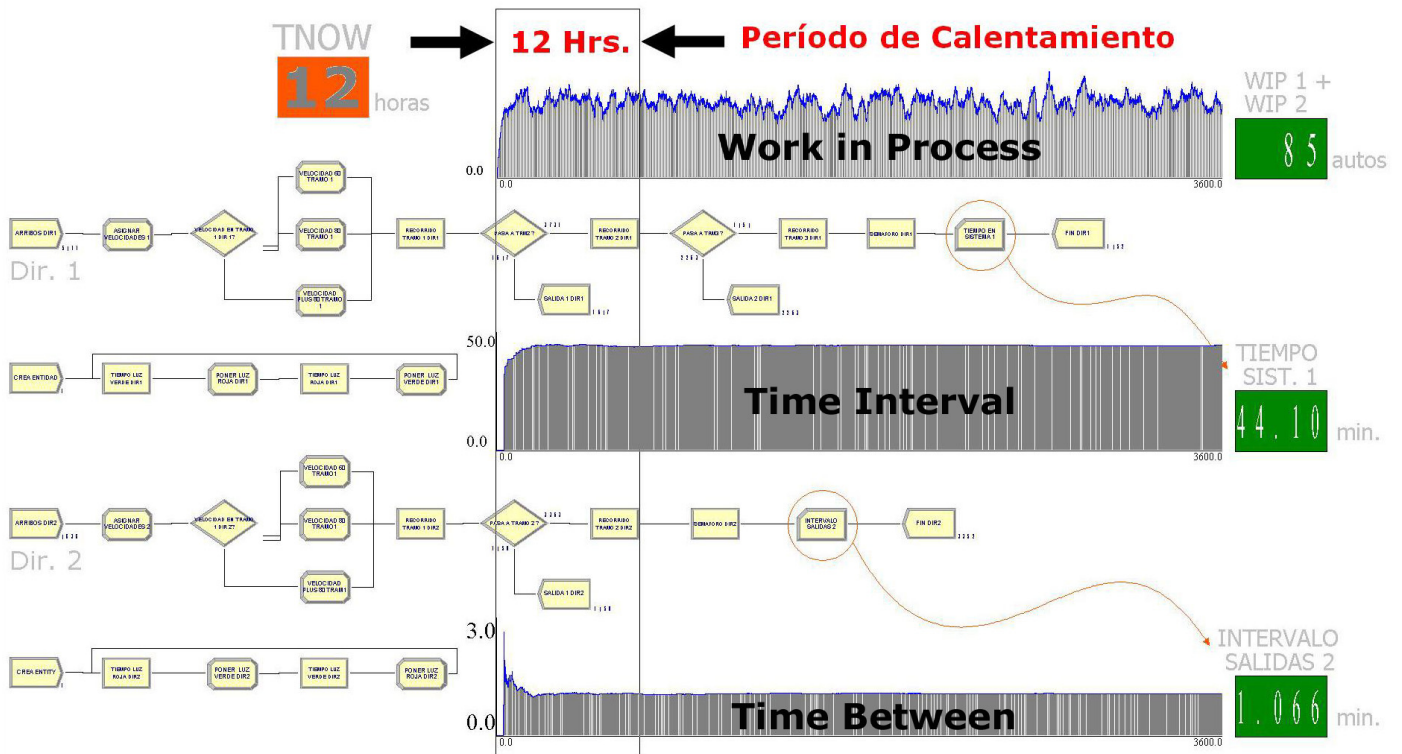
Los indicadores obtenidos de la simulación que son funciones lineales, bajo la suposición de que el muestreo (número de réplicas) es generada con probabilidades de se-

lección iguales (equiprobable) de la muestra aleatoria, deberán estar normalmente distribuidos y se debe verificar que se cumpla la aplicación del teorema del límite central y así generalizar los resultados de la muestra hacia la población de estudio. Una referencia importante es la cantidad de observaciones por réplica, en todo caso, es necesario comprobar el ajuste de las muestras hacia la distribución normal mediante las pruebas Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov y Chi Cuadrado.

#### 4.1 Detección visual aproximada del Período de Calentamiento

Se ha considerado la evaluación de tres indicadores: el número promedio de autos de inicio a fin de la vía en ambas direcciones, el tiempo de permanencia promedio para los tres tramos de la dirección uno y el tiempo entre salidas para la dirección dos. El procedimiento empleado fue realizar una detección visual aproximada (véase figura 5), revisando las gráficas en réplicas diferentes de los indicadores propuestos, observando y anotando los tiempos para alcanzar la estabilidad; finalmente se consideró de manera aproximada, el tiempo límite superior de las réplicas observadas.

Figura 5  
Gráficas representativas de los indicadores propuestos



Se considerará en el experimento un período de calentamiento de 12 horas.



## 4.2 Determinación del número de réplicas de la simulación

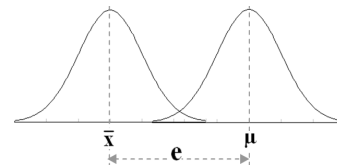
Si deseamos observar el comportamiento dinámico y general de los elementos del sistema en estudio es suficiente con realizar una sola corrida. Sin embargo, si deseamos obtener valores o mediciones estadísticamente válidas, debemos realizar varias réplicas independientes con distintos números aleatorios, que generarán distintos valores de las distribuciones muestreadas. Mediante la ejecución de múltiples repeticiones se obtienen respuestas independientes y valores medios de los resultados que se muestrean, así como la varianza y la desviación estándar que miden la dispersión de la variable aleatoria. El intervalo de confianza nos proporciona un grado de seguridad que podemos tener de la estimación, es decir, de la media del conjunto de respuestas. Para calcular el número de réplicas para nuestro experimento, tomaremos como referencia al tiempo promedio de permanencia en la dirección uno, desde el inicio hasta el final de la vía y las consideraciones siguientes:

Nivel de confianza propuesto:  $1-\alpha = 95\%$

Probabilidad de error:  $\alpha = 5\%$

Error deseado:  $e = \text{máximo } 0.1 \text{ minutos}$

**Figura 6**  
Factor de precisión



El error  $e$  es un factor de precisión; es la mitad del ancho del intervalo o "half-width". Es el error deseado entre la media estimada y la media teórica  $\mu$  (figura 6). Existe una relación inversa entre error o mitad del ancho del intervalo  $h$  y el tamaño de  $n$ :

$$h = t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_n^2}{n}} \qquad h = Z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S_n^2}{n}}$$

A mayor número de réplicas es menor el riesgo y el ancho del intervalo. En general, una manera de obtener intervalos más precisos, es aumentando el tamaño de la muestra  $n$ . Consideremos arbitrariamente 20 muestras preliminares (figura 7).

$n'$ : 20 réplicas.

**Figura 7**  
Reporte de resultados

Replications: 20		Time Units: Minutes					
<b>User Specified</b>							
Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
TIEMPO EN SISTEMA 1	44.2788	0.14	43.6103	44.8102	29.4016	64.4948	

Ejecutando 20 réplicas al modelo, obtenemos un half-width preliminar:  $h_0 = 0.14$  minutos.

Cálculo del número de réplicas para el experimento:

Método 1:

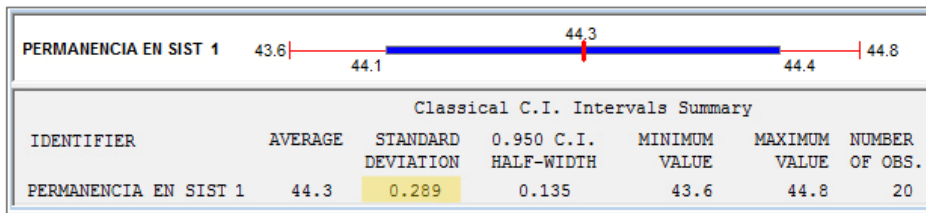
$$n = n' \left( \frac{h_0}{e} \right)^2 \quad n = 20 \left( \frac{0.14}{0.1} \right)^2 \quad n = 39 \Rightarrow 40 \text{ réplicas}$$

Método 2

$$n = \left[ \frac{t_{(n'-1, 1-\alpha/2)} * S_{(n')}}{e} \right]^2$$

Al ejecutar 20 réplicas preliminares con un n.c. 95% obtenemos el reporte de la figura 8.

**Figura 8**  
Reporte de resultados



$t_{(n'-1, 1-\alpha/2)} = 2.093$  (valor de tabla: distribución t-Student)

$S_{n'} = 0.289$  (desviación estándar de la muestra preliminar  $n'$ )

Reemplazando valores tenemos:  $n = \left[ \frac{2.093 * 0.289}{0.1} \right]^2 \quad n = 37$

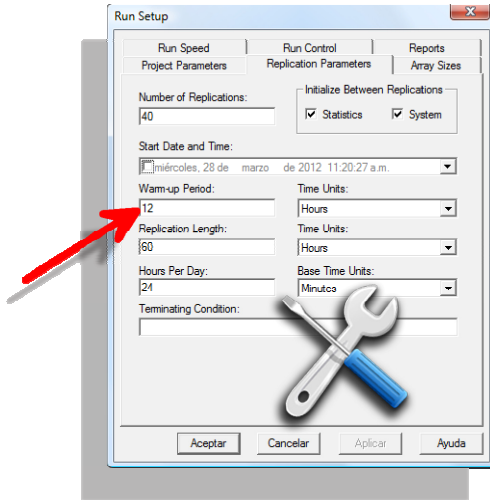
La diferencia es mínima respecto al primer método. Para comprobar si se cumple con el factor de precisión propuesto, ejecutaremos el modelo por 40 réplicas y mediremos el indicador de referencia para un nivel de confianza de 95% (figura 9).

**Figura 9**  
Reporte de resultados

User Specified						
Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO EN SISTEMA 1	44.2114	0.09	43.6103	44.8102	29.4016	64.5184

Se aprecia un error de 0.09 minutos menor a la precisión requerida de 0.1 para el indicador.

**Figura 10**  
**Configuración del experimento**



De acuerdo a la figura 10, en lo sucesivo se considerará, como punto de partida, la configuración siguiente:

- El sistema inicialmente está vacío
- 40 réplicas para medir los indicadores de desempeño del sistema en estudio
- 12 horas de período de calentamiento
- 60 horas de tiempo total de simulación
- 24 horas por día
- La base de tiempo está en minutos.

## 5. Análisis estadístico de los indicadores de desempeño

Durante la ejecución de la simulación se van registrando las mediciones individuales de la variable en estudio, el conjunto de observaciones de una réplica de simulación es una muestra perteneciente a alguna distribución de probabilidad. Cada muestra obtenida nos conduce a una "respuesta"; la estimación es el promedio muestral de un conjunto de repuestas. Una estimación también puede representar un valor total resultante de un conteo de observaciones, por ejemplo, el número de entidades en cola al final de la simulación.

El intervalo de confianza nos proporciona el grado de seguridad con que estamos estimando el valor medio de la distribución poblacional; el intervalo está asociado a un nivel de confianza que le podemos tener a esa estimación. Al ejecutar múltiples réplicas al modelo de simulación, el promedio de las respuestas está representado por  $\bar{x}$ , que es el valor estimado de la media de la distribución. La dispersión de la variable aleatoria, respecto de su media, se mide mediante la desviación estándar  $s$  o la varianza  $s^2$ .

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n-1}$$

$X_i$ : Es el valor o respuesta de la réplica  $i$ .

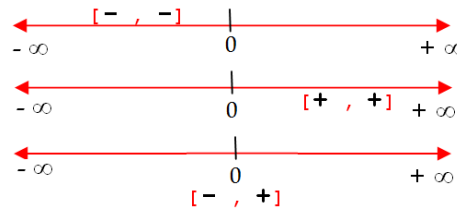
$n$ : Es el número de réplicas del experimento de simulación.

El intervalo de confianza para la media poblacional, mediante las expresiones:

$$\left[ \bar{X} \pm t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right] \quad \text{para } n < 30 \quad \text{y} \quad \left[ \bar{X} \pm z_{(1-\alpha/2)} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right] \quad \text{para } n > 30$$

- Comparación de medias para muestras relacionadas: prueba "**Paired-t**".

**Figura 11**  
**Resultados posibles de la prueba Paired-t**



Intervalo de confianza:

$$\left[ \bar{d} \pm t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right]$$

$\bar{d}$ : Promedio de las diferencias

$S_n$ : Desviación estándar de las diferencias

$$\bar{d} = \bar{X} - \bar{Y}$$

- Comparación de medias para muestras independientes: prueba "**Two-sample-t**".

$$\left[ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{(n_1+n_2-2, 1-\alpha/2)} S_P \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]$$

$$S_P = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

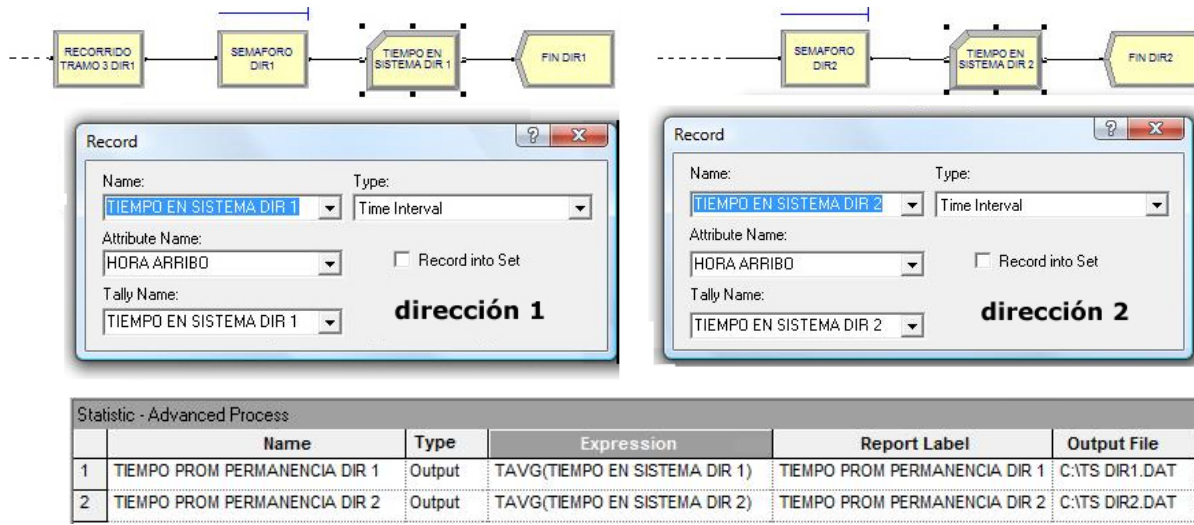
$S_P$ : Desviación estándar Ponderada (combinada).

### Indicador N° 1

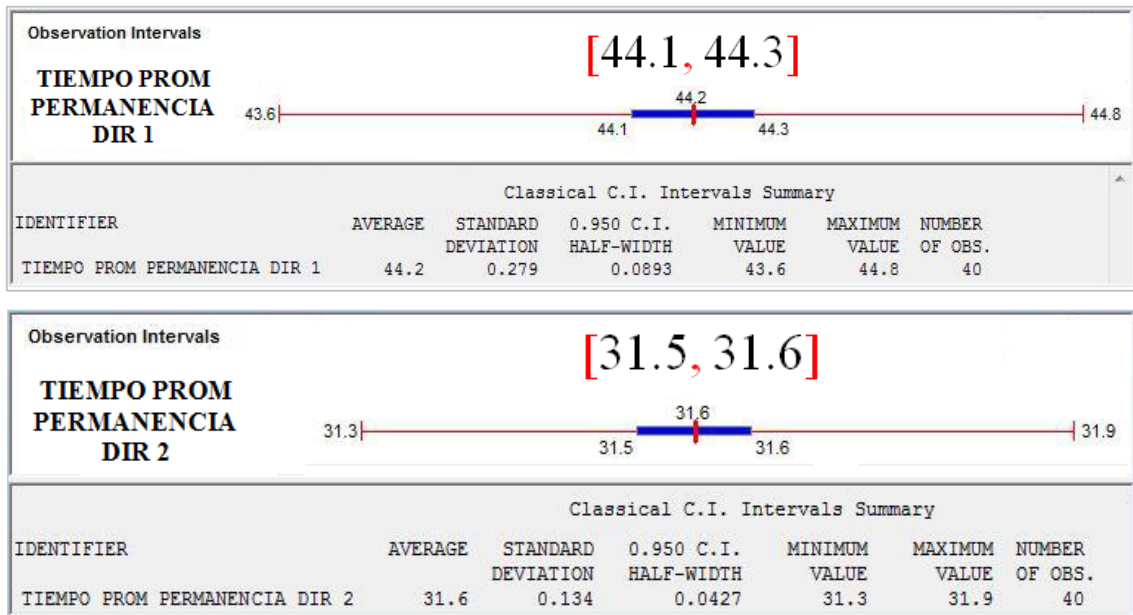
*En este experimento se desea realizar con 95% de confianza, la estimación del indicador Tiempo Promedio de Permanencia de los vehículos, que van desde el inicio hasta el final de cada vía.*

En la figura 12 se muestran los cambios en el modelo, así como la configuración de la variable de interés:

**Figura 12**  
**Medición del indicador N° 1: tiempo promedio de permanencia.**



**Figura 13**  
**Intervalos de confianza para el indicador N° 1**



**Conclusiones:**

Se ha estimado con 95% de confianza que el tiempo promedio de permanencia en la dirección uno se encuentra en el intervalo: [44.1, 44.3] minutos. En la dirección 2 se está en el intervalo: [31.5, 31.6] minutos. El resultado es comprensible porque la dirección uno está compuesta por 3 tramos, lo que implica un factor de 2.1 del tiempo promedio para cruzar la dirección uno:

$$\text{Tiempo Total} = 100\% \text{ tramo 1} + 80\% \text{ tramo 1} + 30\% \text{ tramo 1.}$$

Para verificar la expresión anterior supongamos que el tiempo asignado a un vehículo en el tramo 1 es de 28 minutos, entonces, el tiempo que le demandará cruzar la vía completa será de  $28+0.8*28+0.3*28=58.8$  minutos. Esta cifra también representa el producto de 28 por el factor 2.1. En cuanto a la dirección dos, al tener tiempos de recorrido cercanos a los de la dirección uno y al tener sólo 2 tramos, entonces posee un factor de 1.6 del tiempo promedio para cruzar la dirección dos, menor al de la dirección uno. Si se aplicara la prueba de comparación de medias con la prueba "two-sample-t" para evaluar si existe significancia estadística, es evidente que se encontrarían diferencias significativas entre ambos promedios.

**Indicador N° 2**

*Se desea realizar una comparación de medias" con 90% de confianza, entre el número promedio de autos que transitaron por ambas vías y analizar si existe diferencia significativa entre ambos indicadores.*

Medición de la variable de interés: número promedio de autos ó "work in process" (wip):

Método 1:

**Figura 14**  
**Medición del indicador N° 2: Método 1**

Statistic - Advanced Process					
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	NUM PROM1	Time-Persistent	EntitiesWIP(AUTOS 1)	NUM PROM1	
2	WIP DIR 1	Output	DAVG(NUM PROM1)	WIP DIR 1	C:\WIP DIR1.DAT
3	NUM PROM2	Time-Persistent	EntitiesWIP(AUTOS 2)	NUM PROM2	
4	WIP DIR 2	Output	DAVG(NUM PROM2)	WIP DIR 2	C:\WIP DIR2.DAT

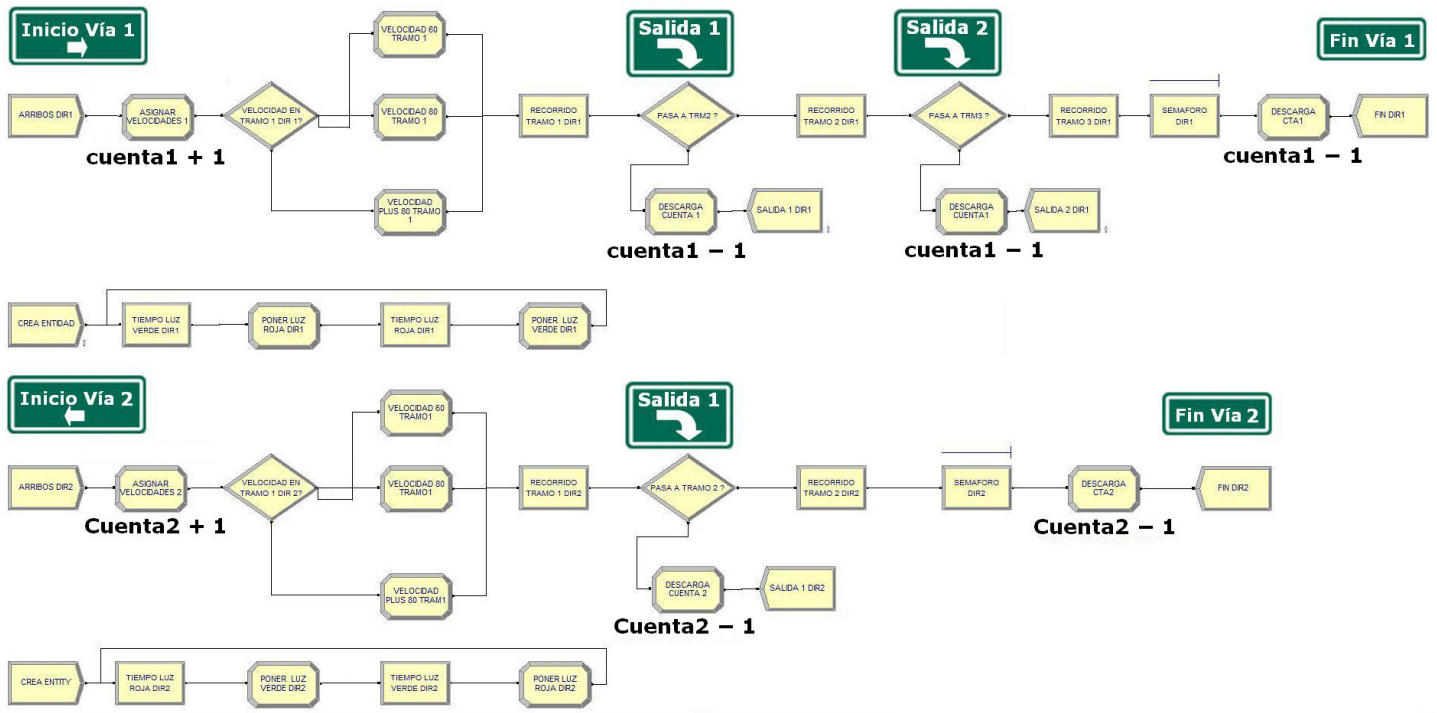
Método 2:

En este caso utilizaremos una variable global "CUENTA" para contabilizar el número de autos en cualquier instante de la simulación (figura 15), así tenemos que:

cuenta = cuenta + 1      cuando ingresa un auto al sistema

cuenta = cuenta - 1      cuando egresa un auto del sistema

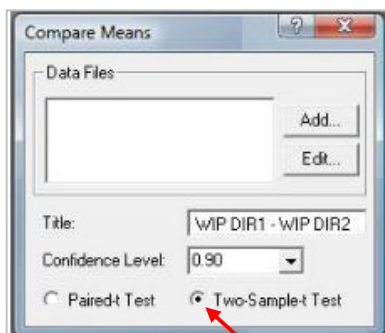
**Figura 15**  
**Modelo para indicador N° 2: Método 2**



**Figura 16**  
**Medición del indicador N° 2: Método 2**

Statistic - Advanced Process					
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	WIP DIR 1	Output	DAVG(CUENTA1 Value)	WIP DIR 1	C:\WIP DIR1.DAT
2	WIP DIR 2	Output	DAVG(CUENTA2 Value)	WIP DIR 2	C:\WIP DIR2.DAT

**Figura 17**  
**Comparación de medias del indicador N° 2, wip: Two sample-t**



Two-sample-t Comparison of Means						
WIP DIR 1 - WIP DIR 2						
					14.5	
					14.2	14.7
Two-Sample T Means Comparison : WIP DIR1 - WIP DIR2						
IDENTIFIER	ESTD. MEAN DIFFERENCE	STANDARD DEVIATION	0.900 C.I. HALF-WIDTH	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE	NUMBER OF OBS
WIP DIR 1 - WIP DIR 2	14.5	0.155	0.258	50.3	53.8	40
				36.1	39.1	40
REJECT H0 => MEANS ARE NOT EQUAL AT 0.1 LEVEL						

Conclusiones:

Existe significancia estadística para el número promedio de vehículos que transitaron por ambas vías; la prueba arroja un intervalo: [14.25, 14.76] vehículos (figura 17). Existen diferencias estadísticamente significativas para aceptar la hipótesis alternativa  $H_1$ , las medias son diferentes con 90% de confianza, la dirección uno presenta un mayor promedio de vehículos. El resultado se explica por las diferencias en las tasas de llegada de los autos:

Tiempo entre arribos (segundos/autos)	Tasa (autos/hora)
Dirección 1: Exponencial (40)	$\frac{\text{autos}}{40\text{seg.}} * \frac{60\text{seg}}{\text{min.}} * \frac{60\text{min.}}{\text{hora}} = 90 \frac{\text{autos}}{\text{hora}}$
Dirección 2: Exponencial (45)	$\frac{\text{autos}}{45\text{seg.}} * \frac{60\text{seg}}{\text{min.}} * \frac{60\text{min.}}{\text{hora}} = 80 \frac{\text{autos}}{\text{hora}}$

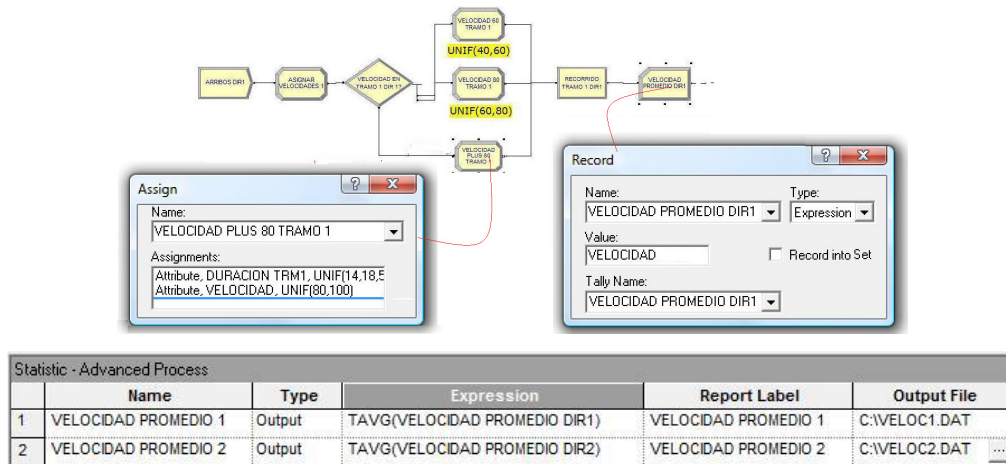
El resultado también se explica por la diferencia entre el número de tramos que poseen ambas vías. La dirección 1 tiene un factor de 2.1 mientras que la dirección 2 posee un factor de 1.6.

**Indicador N° 3**

Se desea experimentar la adición de tres rangos de velocidades en ambas direcciones, las cuales se ajustan a distribuciones de probabilidad uniforme (40,60), uniforme (60,80) y uniforme (80,100) en kilómetros por hora, cada una se asocia a la duración ya existente en el tramo uno. Se desea evaluar con un nivel de confianza de 90% si existe diferencia estadísticamente significativa entre las velocidades promedio empleadas en las dos direcciones.

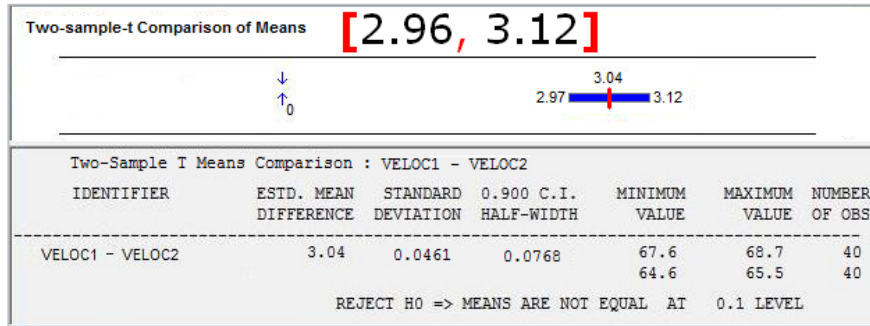
En la figura 18 se muestran los cambios en el modelo, de acuerdo a la situación planteada.

**Figura 18**  
Cambios en el modelo y medición del indicador N° 3: velocidad promedio.





**Figura 19**  
**Comparación de medias del indicador N° 3: Two sample-t**



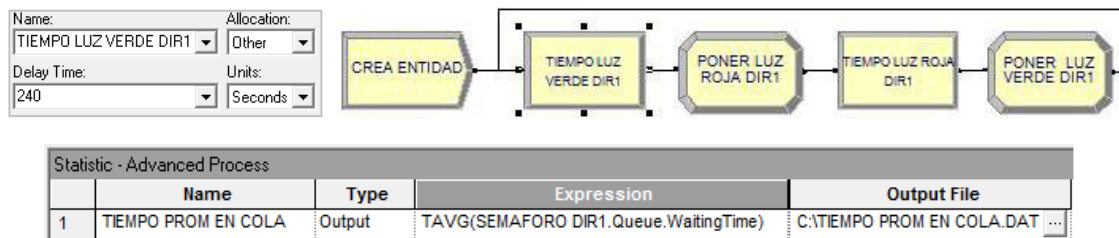
**Conclusiones:**

Existe significancia estadística entre las velocidades promedio que los vehículos emplean en ambas direcciones; la prueba arroja un intervalo: [2.96, 3.12] kph (figura 19). Con 90% de confianza las medias no son iguales, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , la dirección uno presenta una velocidad promedio mayor. Si bien las vías son totalmente independientes, la diferencia se explica principalmente por las distintas proporciones de las probabilidades vinculadas a las velocidades en la dirección 1 (30%, 50% y 20%) y en la dirección 2 (40%, 45%, 15%). En general, existe una relación inversa entre velocidad promedio y tiempo de viaje, pero el factor determinante para esta relación, son las proporciones de las probabilidades mencionadas. Para comprobar esta afirmación, se colocó la misma proporción de las probabilidades para ambas direcciones: 30%, 50% y 20%. Planteado de esta manera, no existen diferencias significativas entre las velocidades promedio: [-0.1290, +0.0803] km/h. También se concluye que el tiempo entre arribos de los autos no es un factor influyente.

**Indicador N° 4**

Se desea investigar la posibilidad de mejorar el tiempo promedio de espera de los autos, en el semáforo de la dirección uno, reduciendo el tiempo de luz verde de 300 a 240 segundos.

**Figura 20**  
**Cambio en el modelo y medición del indicador N° 4, tiempo promedio de espera**



### Técnicas de reducción de varianza

En cada réplica del modelo se utiliza diferentes secuencias de números e independientes entre sí. Las técnicas de reducción de varianza explotan la capacidad de control de los generadores de números aleatorios que conducen la simulación. Normalmente re-utilizamos dichos números aleatorios para inducir correlaciones favorables que reduzcan el ruido en el output.

- Técnica de Secuencias Comunes

Esta técnica utiliza las mismas series de números aleatorios en experimentos sucesivos de comparación de escenarios. Se trata de obtener una reducción de varianza de la diferencia a partir de la sincronización de las mismas series de números para distintas configuraciones. A partir de una semilla original los sistemas serán comparados en las mismas circunstancias.

$$\text{Si } Z=X-Y \rightarrow \text{Var}(Z) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) - 2\text{Cov}(X, Y)$$

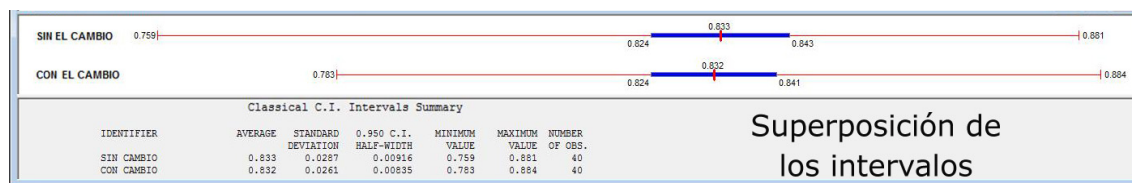
Si la Cov(X, Y) es grande, por haber introducido correlación positiva entre ambas series, entonces la varianza de la diferencia: Var(Z), será mucho menor.

En la formulación del modelo original se utilizaron secuencias comunes, tal como se indica en el cuadro 3.

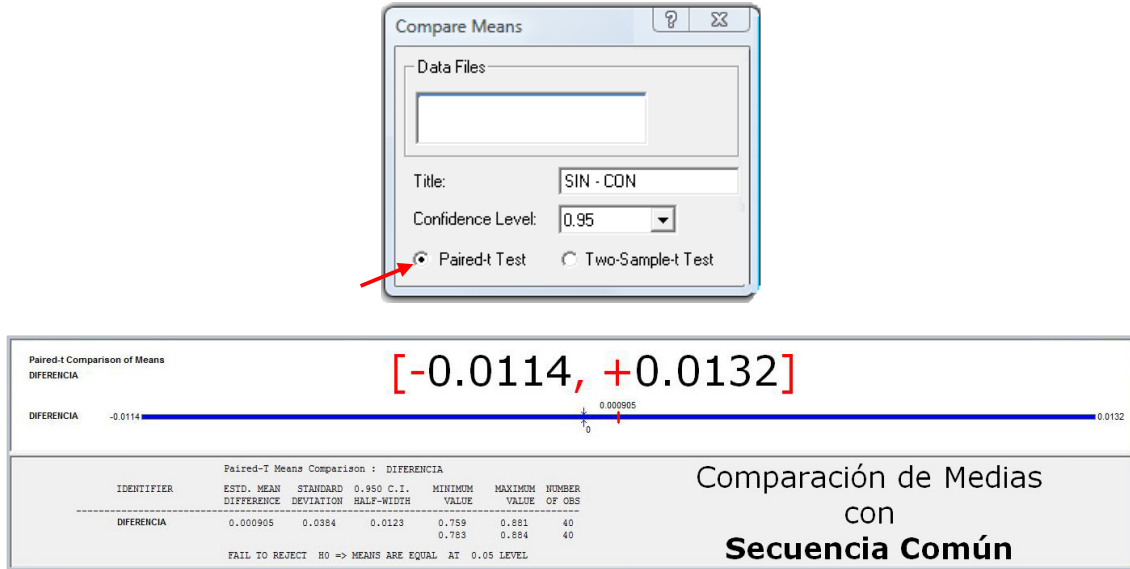
**Cuadro 3**  
**Secuencias de números aleatorios utilizadas**

	SECUENCIAS DE NÚMEROS ALEATORIOS	
	Dirección 1	Dirección 2
<b>Arribos</b>	secuencia 1	secuencia 2
Velocidades	<b>Tiempo de Recorrido</b> tramo 1	<b>Tiempo de Recorrido</b> tramo 1
<b>Hasta 60</b>	secuencia 3	secuencia 6
<b>60 - 80</b>	secuencia 4	secuencia 7
<b>más de 80</b>	secuencia 5	secuencia 8

**Figura 21**  
**Resultados del indicador N° 4: secuencias comunes**



**Figura 22**  
**Comparación de medias con secuencias comunes: prueba Paired-t.**



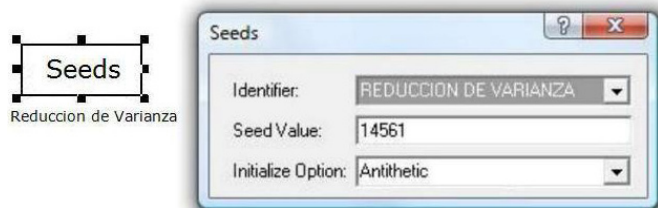
- Técnica de Secuencias Antitéticas

El método consiste en ejecutar una primera réplica con la serie de números aleatorios  $u_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). Luego, se ejecuta una segunda réplica con los valores antitéticos  $(1-u_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). Este muestreo complementario induce una correlación negativa entre las respuestas de ambas simulaciones. En principio, ambas "se compensan" y se conjetura que las respuestas  $y(1)$  e  $y(2)$  estarán correlacionadas negativamente, por lo que la varianza de sus promedios decrece. Tenemos  $n/2$  promedios de parejas  $(y(i), y(i+1))$ , lo que nos conduce a la expresión de la varianza de  $Y = Y(i) + Y(i+1)$ :

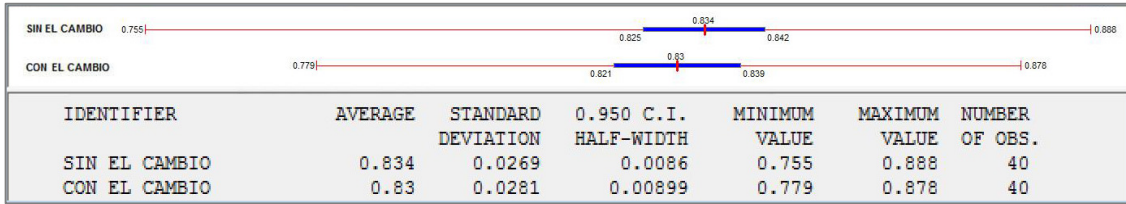
$$\text{Var}(Y) = \frac{1}{4}[\text{var}(Y(i)) + \text{var}(Y(i+1)) + 2 \text{Cov}(Y(i), Y(i+1))]$$

Si las réplicas son independientes desaparecen los términos de covarianza. Sin embargo, si hacemos negativa la suma de covarianzas, podemos producir una varianza menor de la que ofrecen réplicas independientes. En la figura 23 se realiza la aplicación del método Antitético.

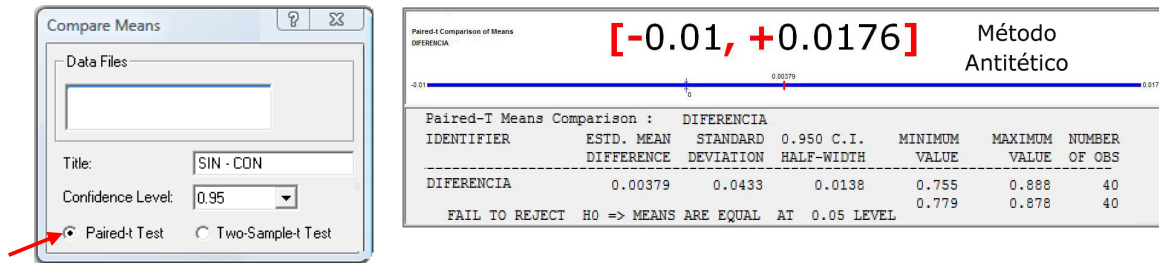
**Figura 23**  
**Inclusión del módulo Seeds: secuencias antitéticas**



**Figura 24**  
**Intervalos individuales del indicador N° 4: secuencias antitéticas**



**Figura 25**  
**Comparación de medias con secuencias antitéticas: prueba Paired-t.**



**Conclusiones:**

Aplicando la comparación de medias utilizando la técnica de secuencias comunes se obtuvo el intervalo: [-0.0114, +0.0132] minutos (figura 22) y con secuencias antitéticas el intervalo: [-0.0100, +0.0176] minutos (figura 25). En ambos casos, no existe evidencia estadística suficiente para aceptar la hipótesis alternativa  $H_1$  (es decir, para rechazar la hipótesis nula  $H_0$ ), las medias del indicador son iguales, con un 95% de confianza. La reducción en el tiempo de luz verde, en el semáforo, no genera ninguna mejora en cuanto a disminuir el tiempo promedio de espera de los vehículos. Este resultado es explicable, ya que la variable que tiene relación directa con el indicador medido, es el tiempo de luz roja.

Se aplicaron técnicas de control de secuencias de números aleatorios para introducir correlación entre las diferentes réplicas y así reducir la varianza de los resultados y lograr mejores estimaciones e intervalos de confianza más precisos, sin tener que incrementar el tamaño de la muestra.

**6. Evaluación de Escenarios**

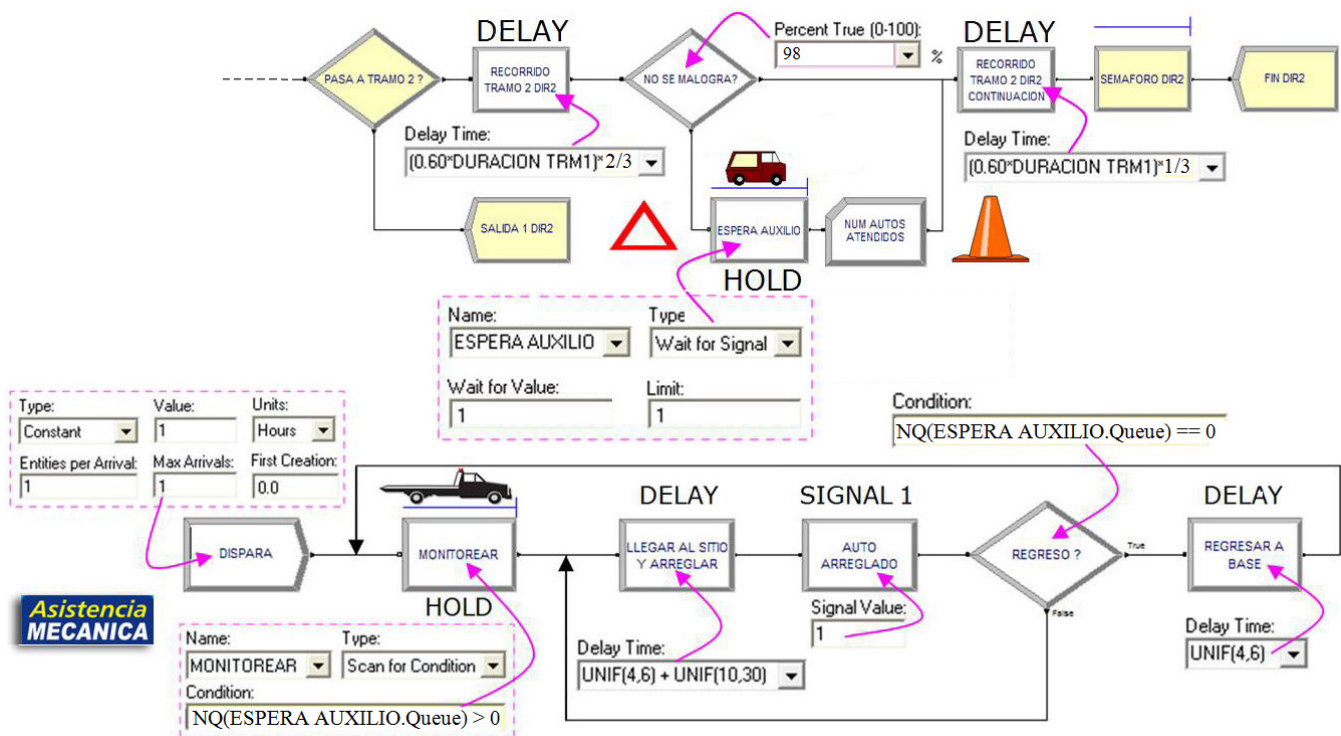
**Escenario N° 1**

*Se desea investigar la posibilidad de implementar un servicio de asistencia vehicular, que inicialmente funcionará solo en la dirección dos. Contará con una camioneta de auxilio mecánico, cuya base será ubicada al inicio de la vía. Así, al ser requerida, ésta*

se desplazará hasta el vehículo averiado, en un tiempo que se ajusta a una distribución uniforme(4,6) minutos. Asistir al auto averiado varía de acuerdo a una distribución uniforme(10,30) minutos; finalmente, la camioneta regresa a su base. El mayor número de incidencias se produce después de los primeros 2/3 de recorrido del tramo dos; cualquier vehículo tiene una probabilidad de 3% de quedar averiado, en ese caso, el vehículo queda a un costado, a la espera del auxilio mecánico; una vez reparado el auto, éste continúa con el último tercio que le resta de su recorrido en el tramo dos. Se desea estimar con 95% de confianza el número promedio de autos atendidos por el servicio de auxilio mecánico.

La Figura 26 presenta la sección del modelo en la que se implementa el servicio de asistencia vehicular, véase además la configuración del indicador número de autos atendidos.

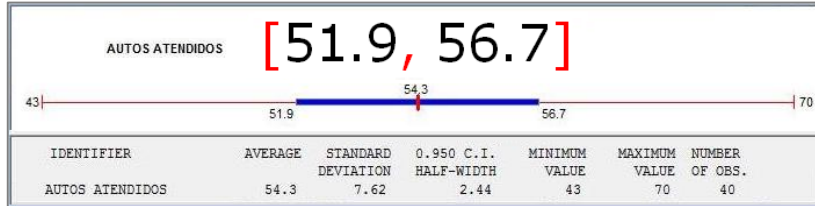
**Figura 26**  
**Cambios en el modelo para incluir servicio de asistencia vehicular: Escenario 1**



**Figura 27**  
**Medición del indicador: número de autos atendidos.**

Statistic - Advanced Process				
	Name	Type	Expression	Output File
1	AUTOS ATENDIDOS	Output	NC(NUM AUTOS ATENDIDOS)	C:\AUTOS REPARADOS.DAT

**Figura 28**  
**Intervalo de confianza para el número de autos atendidos**

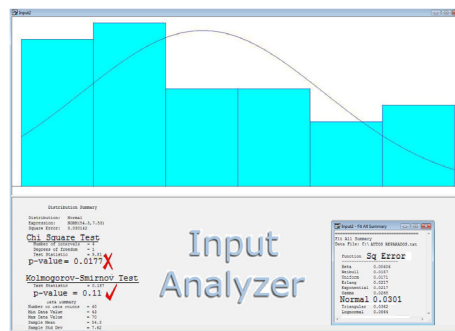


El intervalo de confianza para el indicador número de vehículos atendidos por el servicio de auxilio mecánico es: [51.86, 56.74] autos. Existe el indicio de que el indicador no pasaría el test de normalidad, por insuficiencia en el número de observaciones por muestra o réplica. Lo cual hay que confirmarlo. Los valores de las observaciones del indicador medido, deben ajustarse a una distribución de probabilidad normal para poder realizar inferencia estadística a dicho indicador, de lo contrario lo deshabilitaría para tal propósito, pero no al modelo ni a otros indicadores. El teorema del límite central nos asegura que es posible realizar inferencia estadística al indicador si n es suficientemente "grande", es decir, si el tamaño de la muestra tiene un valor significativo (en nuestro caso, mayor que 70 observaciones por réplica).

Prueba de Normalidad

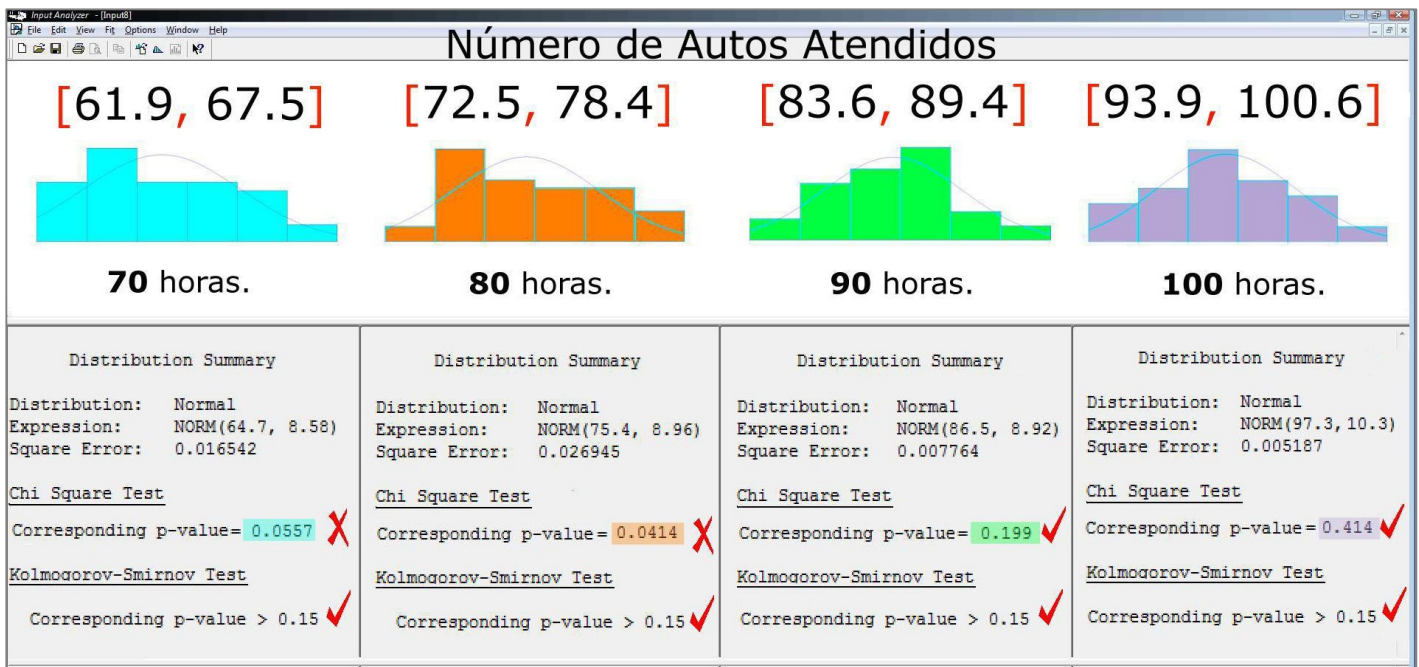
El test consiste en someter las muestras obtenidas a pruebas estadísticas de bondad de ajuste a la distribución normal. Se aplicará las pruebas de Chi-cuadrado y de Kolmogorov-Smirnov.

**Figura 29**  
**Prueba de Normalidad para el número de autos atendidos**



Nuestro indicador no pasa la prueba de normalidad para el test de Chi Cuadrado, arroja un valor  $p = 0.0177$ , menor que el valor del riesgo 0.05 (5%), sin embargo si pasa el test de K-S. En todo caso, el ajuste es muy pobre y se puede apreciar la asimetría respecto a la media. En estas condiciones no es posible establecer un intervalo de confianza para  $\mu$  (media teórica) y no será posible realizar inferencia estadística al indicador en estudio. Lo ideal es que el indicador pase ambas pruebas: Chi Cuadrado y K-S. Al simular durante 60 horas el número de observaciones por réplica es insuficiente; aumentaremos progresivamente el tiempo de simulación de 10 en 10 horas hasta 100 y para cada caso repetiremos la prueba hasta obtener un tiempo adecuado con el que se logre pasar el test de normalidad para ambas pruebas.

**Figura 30**  
Prueba de Normalidad: aumento progresivo del tiempo de simulación



Conclusiones:

Al repetir el experimento y aumentar progresivamente el tiempo de simulación (figura 30), aumentó el número de autos atendidos por réplica. En el cuadro 4 se muestran los resultados que arroja la prueba Chi-cuadrado.

**Cuadro 4**  
Valores del indicador p, prueba Chi-cuadrado

Horas	60	70	80	90	100
p-value	0.0177	0.0557	0.0414	<b>0.199</b>	<b>0.414</b>

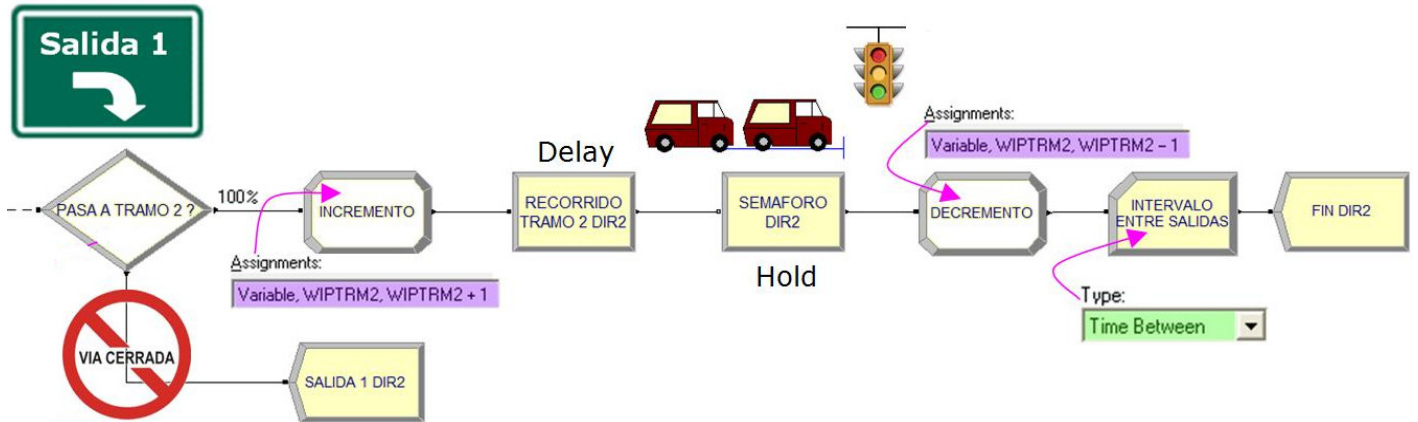
Excluimos a distribuciones con valores de p menores a 0.05 y aceptamos, como posibles alternativas, a aquellas que tengan como mínimo un valor de 0.10. Dado lo insignificante de la diferencia del tiempo de ejecución de la simulación entre 90 y 100 horas, se elige la distribución con 100 horas. No solo porque es mejor en términos de

simetría respecto a la media, sino también porque posee un mejor ajuste:  $0.414 > 0.199$ . La distribución elegida está conformada por un conjunto de valores que se ajustan a la distribución de probabilidad normal, se cumple el teorema del límite central y será posible realizar inferencia estadística a nuestro indicador, para un intervalo de  $[93.9, 100.6]$  autos atendidos por el auxilio mecánico con 95% de confianza.

### Escenario N° 2

Se desea experimentar situaciones críticas del sistema, cuando presenta niveles altos de estrés y realizar la medición de indicadores de desempeño. En este sentido, se plantea simular la posibilidad de cerrar la "Salida N° 1" en la dirección dos, con la finalidad de medir el nivel de congestión en el tráfico, en el segundo tramo de dicha vía.

**Figura 31**  
Cambios en el modelo cuando se cierra la salida 1: Escenario 2

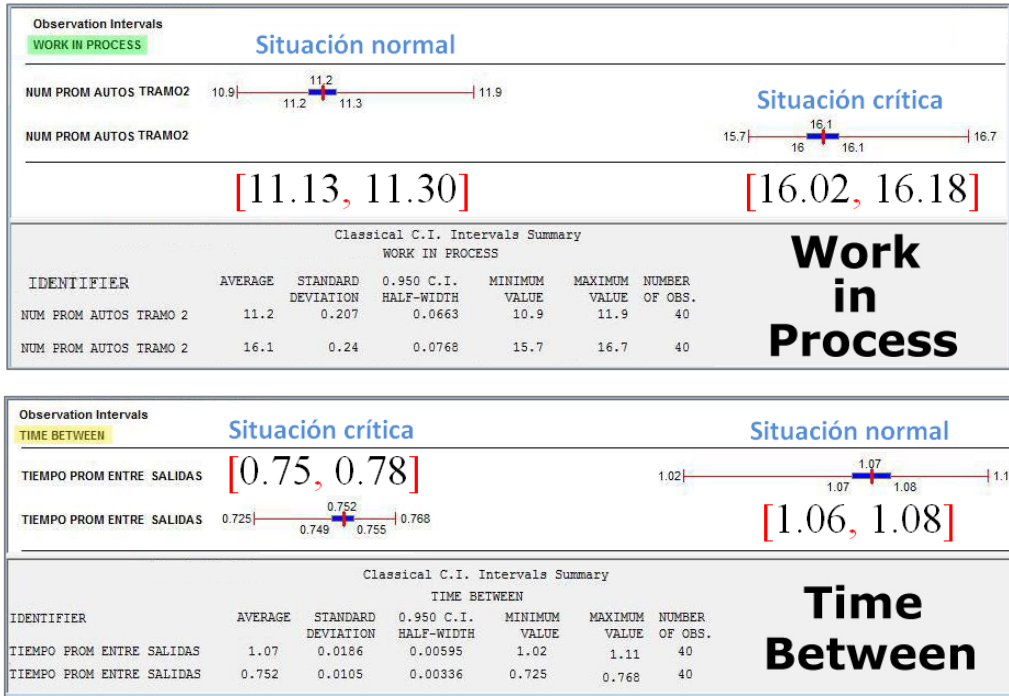


**Figura 32**  
Medición de indicadores: Escenario 2

Statistic - Advanced Process					
	Name	Type	Expression	Report Label	Output File
1	NUM PROM AUTOS TRAMO2	Output	DAVG(WIPTRM2 Value)	NUM PROM AUTOS TRAMO2	C:\WIP ESC2.DAT
2	TIEMPO PROM ENTRE SALIDAS	Output	TAVG(INTERVALO ENTRE SALIDAS)	TIEMPO PROM ENTRE SALIDAS	C:\TBETWEEN ESC2.DAT



**Figura 33**  
**Intervalo de confianza para los indicadores medidos**



**Conclusiones:**

Se simuló el sistema en una posible situación crítica, cerrando la única salida lateral en la dirección dos. Se midieron variables de interés, tales como el número promedio de autos (wip tramo dos) y el intervalo promedio entre salidas (time between). La salida lateral en la dirección dos es relevante. Con un n.c. de 95% se obtienen los intervalos siguientes:

	Situación Normal	Situación Crítica
Work in Process:	[11.13, 11.30] autos	[16.02, 16.18] autos
Time Between:	[1.06, 1.08] minutos	[0.75, 0.78] minutos

Al cerrar la salida lateral, el tráfico se incrementó de manera considerable; el número promedio de autos en el tramo dos aumentó en 44%. En cuanto al segundo indicador, se incrementó el ritmo de salida de los autos en la dirección dos; el tiempo promedio entre la salida de un auto y otro, disminuyó en 30%. Se tomó como referencia en el análisis, el tamaño promedio de cola (number waiting semáforo 2). Si bien hubo un incremento, el valor promedio sigue siendo bajo, menor a 1: [0.31, 0.32] y [0.44, 0.45] autos.

**Escenario N° 3**

*Dado un posible congestionamiento vehicular en la vía expresa, se desea experimentar posibles medidas a adoptar, para evitar que sucedan los accidentes por exceso de velocidad. Al cerrar la salida lateral en la dirección dos, se observó que se incrementó*

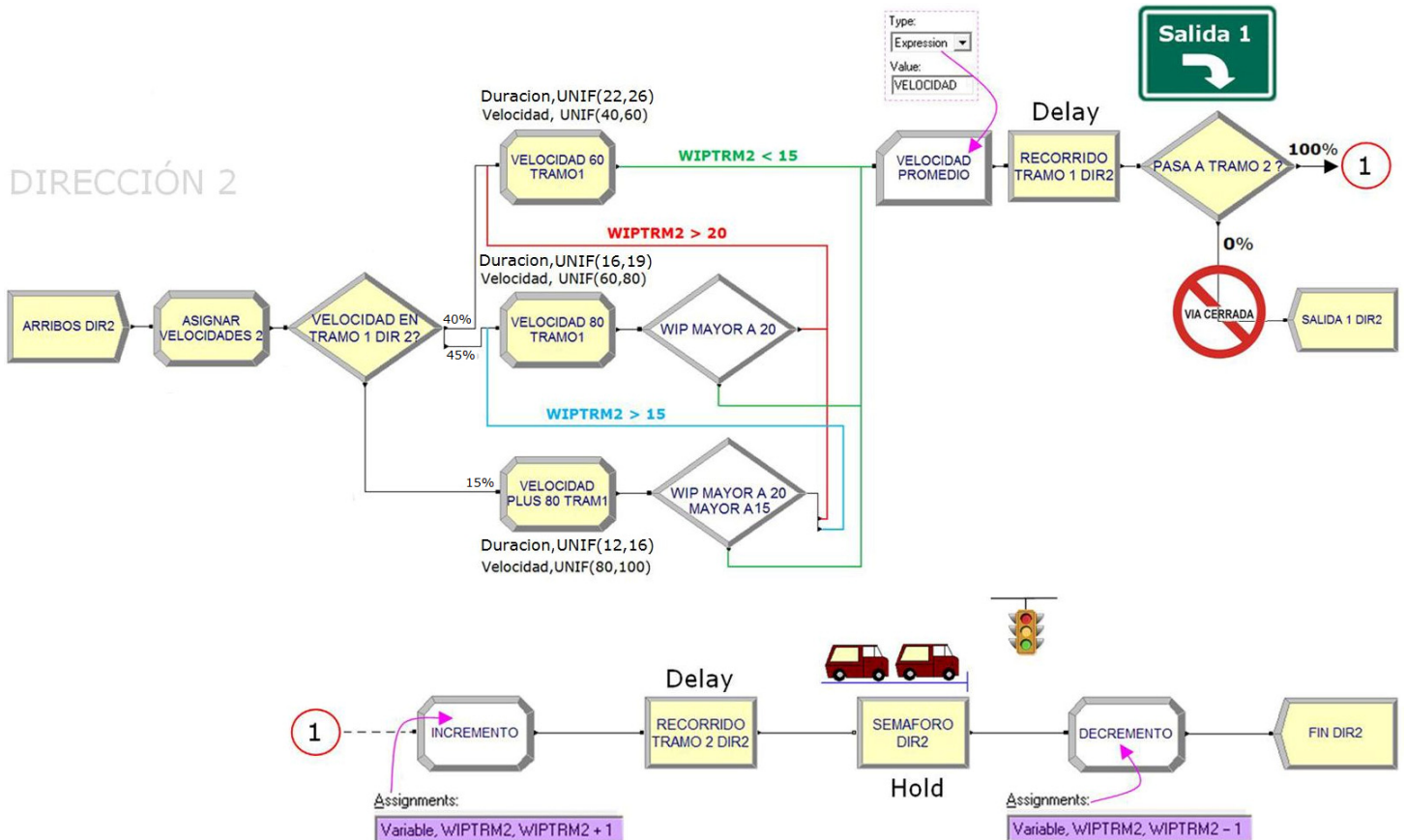
el tráfico en el tramo dos. Se desea monitorear el tráfico para controlar y reasignar la velocidad de un auto, en esta situación crítica, como se muestra en el cuadro 5.

**Cuadro 5**  
**Reasignación de velocidades**

Velocidad de Ingreso	CONTROL DE VELOCIDAD Dirección 2 – Tramo 2		
	Wip > 20	Wip > 15	Wip < 15
<b>V. Baja</b>	Mantener velocidad	Mantener velocidad	Mantener velocidad
<b>V. Media</b>	<b>Reducir a v. baja</b>	Mantener velocidad	Mantener velocidad
<b>V. Alta</b>	<b>Reducir a v. baja</b>	<b>Reducir a v. media</b>	Mantener velocidad

De acuerdo a la situación descrita, es necesario observar el tráfico en la zona afectada y monitorear la variable "work in process", es decir el número de autos en dicha zona. Dependiendo del nivel de congestión del tráfico se controlará la velocidad de los autos ingresantes en base a la tabla propuesta. Los cambios realizados al modelo y las variables a medir se muestran en las figuras 34 y 35:

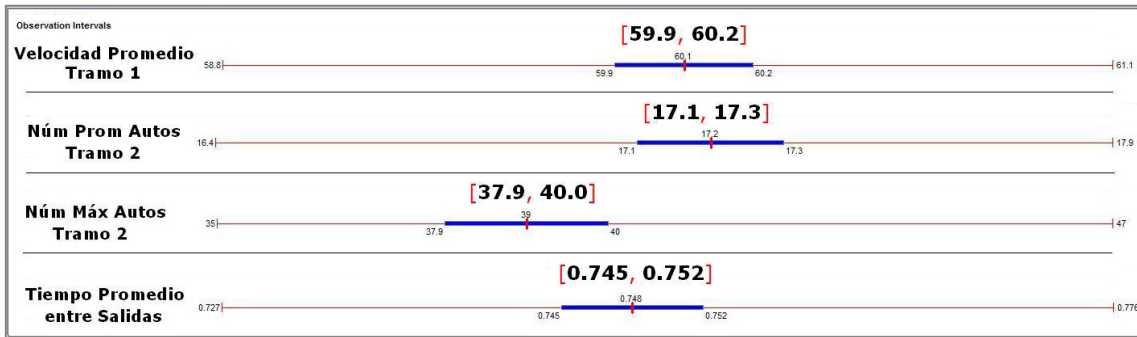
**Figura 34**  
**Cambios en el modelo cuando se reasignan velocidades: Escenario 3**



**Figura 35**  
**Medición de indicadores: Escenario 3**

Statistic - Advanced Process				
	Name	Type	Expression	Output File
1	NUM PROM AUTOS TRAMO 2	Output	DAVG(WIPTRM2 Value)	C:\WIP ESC3.DAT
2	TIEMPO PROM ENTRE SALIDAS	Output	TAVG(INTERVALO ENTRE SALIDAS)	C:\TBETWEEN ESC3.DAT
3	NUM MAX AUTOS TRAMO 2	Output	DMAX(WIPTRM2 Value)	C:\MAX ESC3.DAT
4	VELOCIDAD PROMEDIO TRAMO 1	Output	TAVG(VELOCIDAD PROMEDIO)	C:\VELOCIDAD PROMEDIO.DAT

**Figura 36**  
**Intervalos de confianza para los indicadores medidos**



**Conclusiones:**

Se reformuló el modelo original, cerrando la salida lateral en la dirección dos y se modeló la posibilidad de que, dependiendo del nivel de congestión en el tráfico en el tramo 2, se pueda modificar el tiempo de viaje y controlar (o disminuir) la velocidad de aquellos autos que excedan los límites propuestos. En el cuadro 6 se presenta la matriz comparativa que se obtuvo midiendo diversos indicadores de desempeño, con un nivel de confianza de 95%.

**Cuadro 6**  
**Matriz comparativa de resultados**

INDICADOR	DIRECCIÓN 2		
	Situación normal	Situación crítica	Situación crítica controlada
<b>Velocidad promedio</b> (tramo 1)	[64.9, 65.1]	[64.9, 65.1]	[59.9, 60.2]
<b>Número promedio autos</b> (tramo 2)	[11.18, 11.32]	[15.98, 16.14]	[17.10, 17.30]
<b>Número máximo autos</b> (tramo 2)	[24.4, 25.3]	[31.9, 33.2]	[37.9, 11.32]
<b>Intervalo entre salidas</b> ((tramo 2)	[1.06, 1.08]	[0.75, 0.76]	[0.75, 0.76]

Como se observa en el cuadro 6, la velocidad promedio en el tramo 1 en una situación crítica se mantiene. Sin embargo, al monitorear el tráfico (controlando el indicador wip) se logra el objetivo de reducir la velocidad promedio de los autos que llegan a la

zona de congestión, disminuyendo así, la posibilidad de accidentes. En una situación controlada, los autos disminuyen la magnitud de la velocidad en un 8% (a 60 km/h). En una situación crítica controlada, al haber congestión se disminuye la velocidad y se incrementan los tiempos de viaje, entonces el wip tiende a subir. Ello explica las diferencias significativas, tanto en el número promedio de autos (wip) como en el número máximo de autos. Véase cuadro comparativo. Con un nivel de confianza de 95%, se concluye que no existe diferencia estadísticamente significativa en el intervalo promedio entre salidas, entre una situación crítica controlada y una no controlada. El intervalo obtenido en la comparación de medias fue: [-0.0012, +0.0086] minutos.

Finalmente, sería interesante analizar la posibilidad de agregar otros ingresos a la vía expresa, así como evaluar la posibilidad de incluir y modelar semáforos en las salidas laterales de la vía y medir el nivel de embotellamiento, y analizar la problemática desde el punto de vista macroscópico, es decir, considerando el flujo de los vehículos en la vía expresa.



Final de capítulo

## Casos propuestos

### Caso 1: Control de inventarios con entrega diferida<sup>6</sup>

Una tienda de descuentos desea controlar el inventario de los productos de gran demanda. El tiempo entre demanda de un producto está exponencialmente distribuido, con una media de tiempo que varía según el producto. En el caso de los clientes que demanden un producto y este no existe en *stock*, el 80% irá a otra tienda, lo cual representa ventas perdidas. El otro 20% separará el producto y esperará por una futura remesa.

El almacén emplea un sistema de control del nivel mínimo del inventario para ordenar el pedido en forma periódica. El estado del inventario es revisado cada cierta cantidad de semanas para decidir si se hará una orden (*Pedido de compra*).

La política de la compañía es ordenar una cantidad que permita alcanzar un nivel de control de *stock* dado siempre que la posición de inventario, determinada por la cantidad de los productos en *stock* más la cantidad ordenada menos las separaciones de producto sea menor o igual que el nivel del *stock* para reordenar.

El tiempo necesario desde que se pone una orden hasta que sea atendida (Lead Time) es constante (*Plazo de entrega*) y varía según el producto. Los datos para los productos de gran demanda se muestran en la siguiente tabla:

Producto	Intervalo entre demandas (semanas)	Intervalo entre revisiones (semanas)	Nivel de <i>stock</i> máximo (unidades)	Nivel de <i>stock</i> mínimo (unidades)	Plazo de entrega Lead Time (semanas)
Radio	0.2	4	72	18	3
TV	0.1	2.5	144	36	2
Stereo	0.3	2	50	10	1

El objetivo es simular el sistema de inventario por un período de cinco años más un año de calentamiento (312 semanas) para obtener estadísticas de los inventarios promedios en *stock*, el número de productos en *stock* en el momento del abastecimiento y la cantidad de ventas perdidas. Considerar 30 réplicas para el análisis.

#### Escenario

Para reducir el costo que demanda efectuar una gran cantidad de órdenes de compra se quiere reducir esta cantidad. Se ha propuesto que los controles de inventarios se ejecuten para todos los productos en el mismo momento. Como en el escenario original cada producto tiene su propio número de semanas promedio entre revisiones de inventario, se pide determinar cuál de estos números sería el recomendable usar para lograr el objetivo propuesto, sin perjuicio de los indicadores pedidos originalmente.

<sup>6</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. Op. cit.

## Caso 2: Confección de "jeans" en Gamarra

En el emporio textil de Gamarra funciona una pequeña industria que atiende la demanda de diversos confeccionistas de prendas de vestir. La empresa cuenta con cuatro líneas de producción; cada línea consiste en dos estaciones de trabajo distribuidas secuencialmente. A cada estación se le ha asignado un operario y una máquina industrial para coser, lo que hace un total de 8 trabajadores con experiencia similar, sin embargo las velocidades de las líneas son variables, de acuerdo a la antigüedad de las máquinas que la conforman. La jornada de trabajo comienza a las 7 a.m. y termina a las 4 p.m. Se desea simular el funcionamiento de esta industria, para la confección de "jeans" que es el producto que genera mayor estrés en la planta, sobre todo por el soporte logístico a las líneas de producción.

Al inicio de la jornada, en cada línea existen cinco prendas disponibles, para la primera operación de acabado. El espacio es limitado por ello existe un depósito temporal para las prendas, desde la cual se dosifica el suministro hacia las líneas. Las prendas son traídas a la planta después de 10 minutos del inicio de la jornada, con un tiempo constante entre arribos de un minuto, entre prenda y prenda, y se van colocando en el depósito hasta que alguna línea se queda sin prendas en la cola de su primera estación. Entonces, inmediatamente se realiza el envío, a la línea respectiva, de un lote de hasta 5 prendas, lo cual tarda un tiempo constante de 2 minutos, en llegar a dicha línea; existe una prioridad de atención en la línea uno sobre la dos, en la dos sobre la tres y en la tres sobre la cuatro. Los tiempos de operación en las líneas de operación son los siguientes:

	Tiempos de Operación (minutos)	
	<b>OPERACIÓN 1</b>	<b>OPERACIÓN 2</b>
<b>LÍNEA 1</b>	UNIF(3,3.5)	UNIF(2,3.5)
<b>LÍNEA 2</b>	UNIF(4,4.5)	UNIF(2,2.5)
<b>LÍNEA 3</b>	UNIF(3,3.5)	UNIF(2.5,3)
<b>LÍNEA 4</b>	UNIF(4,6.5)	UNIF(3,4.5)

A las 12 del medio día los trabajadores asignados a la operación 2 de sus respectivas líneas, tienen un refrigerio que dura 45 minutos; luego, al terminar éstos, los operarios restantes inician su refrigerio que finaliza a las 13:30 horas.

Se pide simular el modelo dado por 40 replicas, hasta que se haya concluido la producción de las prendas que ingresaron a la planta en el horario establecido.

### Preguntas Teóricas

1. Explique cómo se modela la distribución de las prendas entre las líneas.
2. Explique cómo se modela la programación del horario de refrigerio.
3. Explique cómo se modela el stock de prendas disponibles en cada línea, al inicio de la jornada.

## Mediciones

4. Determinar con validez estadística, el intervalo de confianza para la producción total de jeans. Utilice un nivel de confianza del 95%.
5. Determinar con validez estadística, el intervalo de confianza para la producción total de jeans, si el horario de refrigerio se programa para la línea 1 y línea 2 en el primer turno; y la línea 3 y línea 4 en el segundo turno. Utilice un nivel de confianza del 95%.
6. Respecto a la pregunta 3. Sustente si existen diferencias estadísticamente significativas, entre el escenario original y el escenario propuesto en la pregunta dos. ¿Cuál escenario recomendaría usted? Utilice la secuencia 1 para los tiempos entre arribos de las prendas. N.c. 95%
7. Determinar con validez estadística, si existen diferencias significativas en los niveles de producción de la línea 1 y la línea 3. Utilice un nivel de confianza del 95%. Emplee la secuencia uno para los tiempos entre arribos de las prendas.
8. Realice una "Comparación de Medias" entre el Número Promedio de Prendas para las líneas 2 y 4. Diga si existe diferencia significativa entre ambos indicadores. Utilice un nivel de confianza de 95%. Emplee la secuencia uno para los tiempos entre arribos de las prendas.

## Escenario

Suponga que después de 5 horas se debe ejecutar el mantenimiento preventivo en la línea 2, el mismo que tardará un tiempo UNIF(1,3) horas, después del cual, la línea nuevamente quedará operativa. En todo caso, esta operación de mantenimiento se iniciará después de que cada máquina termine la prenda que estuviera procesando.



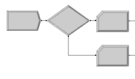


## Capítulo 5

# Modelado de sistemas discretos por procesos – Módulos avanzados

- Módulo Match
- Módulo Hold (retención de entidades en cola)
- Módulo Signal (emisión de señales)
- Módulo Search (búsqueda de entidades en cola)
- Módulo Remove (extracción de entidades de cola)
- Módulo Pickup (entidad grupo)
- Módulo Dropoff (entidad grupo)
- Módulo Readwrite (interfase de lectura y escritura externa)

En este capítulo se desarrolla la segunda parte del tema de modelado de sistemas discretos por procesos, complementándose con nuevas herramientas que nos proporciona el software Arena, para representar situaciones diferentes que no podían ser enfrentadas únicamente con los módulos básicos. Se presentan casos de estudio que ilustran la aplicación práctica de estos módulos avanzados.

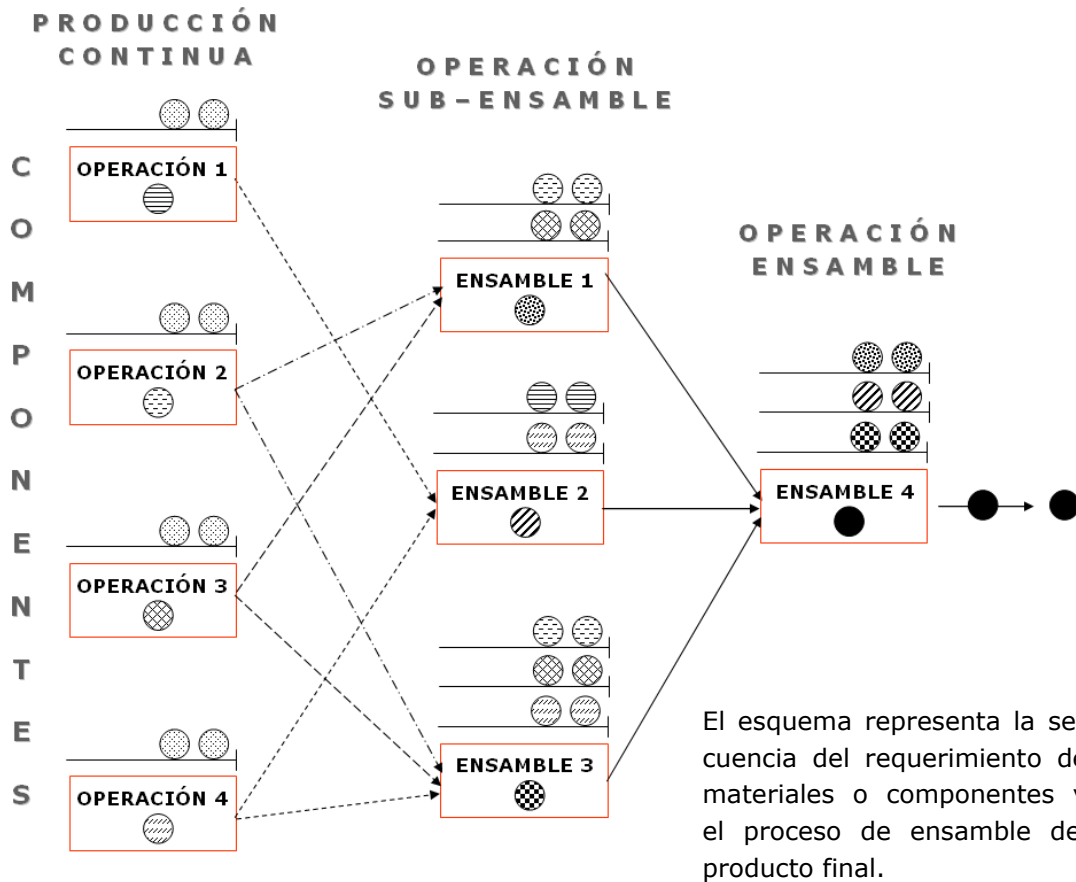


Capítulo 5

**MODELADO DE SISTEMAS DISCRETOS POR PROCESOS – MÓDULOS AVANZADOS**

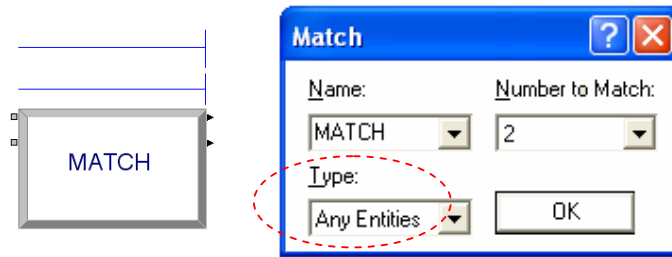
### 1. MÓDULO MATCH (CONTINUACIÓN DE ENSAMBLES)

Este módulo junta entidades que esperan en un determinado número de colas, es decir que toma una entidad de cada cola y forma una nueva entidad; para ello, debe haber por lo menos una entidad en cada cola. Cuando se produce el match, las entidades sacadas de cada cola salen del módulo por un camino diferente, pero en forma conjunta y sincronizada.

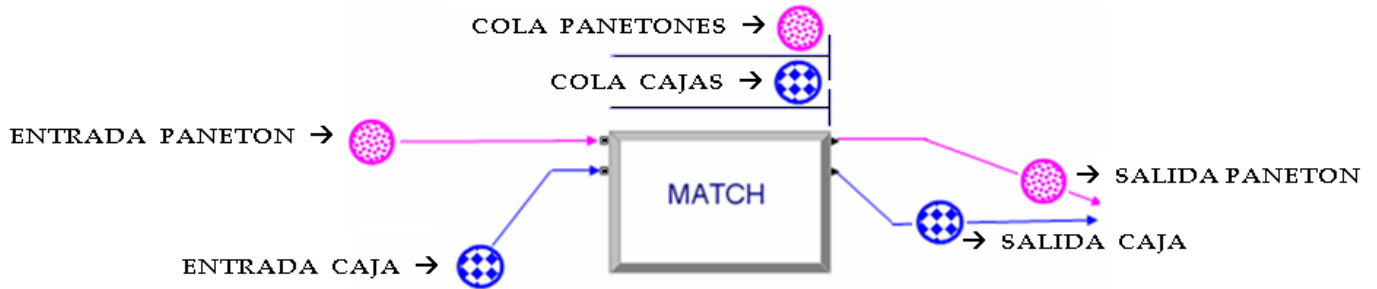


### 1.1 Juntar, con base en cualquier entidad: *Any entities*

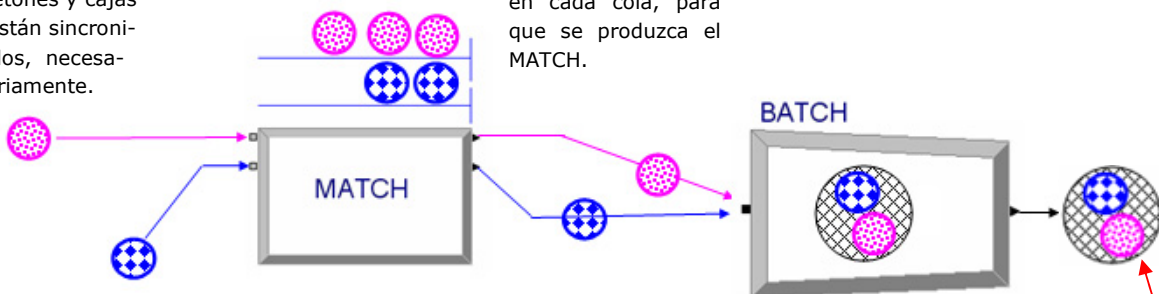
Toma la primera entidad de cada cola, cualquiera que sea ella.



*Ejemplo:*



Los arribos de panetones y cajas no están sincronizados, necesariamente.



Por lo menos debe haber una entidad en cada cola, para que se produzca el MATCH.

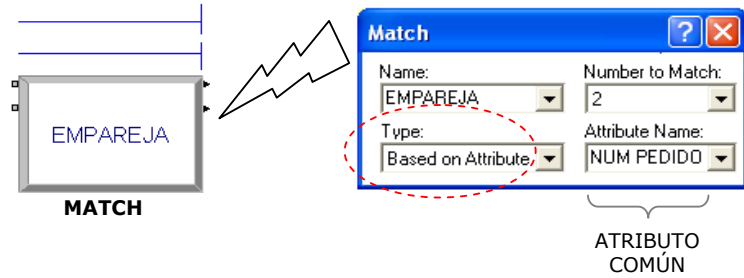
El panetón ingresará primero al BATCH, pues está ubicado en la cola superior.

#### Atributos de la nueva entidad

- **First:** adopta los atributos del panetón.
- **Last:** adopta los atributos de la caja.

## 1.2 Juntar, con base en un atributo: *Based on attribute*

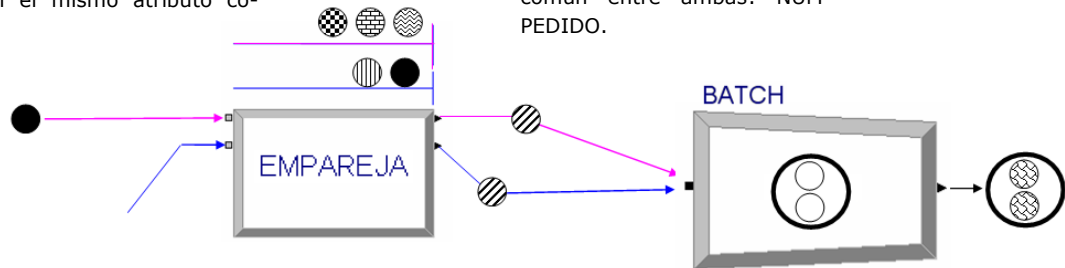
En este caso se toma una entidad de cada cola, pero ambos deben tener un atributo en común; este atributo debe especificarse en el módulo Match.



*Ejemplo:*

La entidad ingresante se ubicará en la cola superior, entonces se producirá el MATCH, pues en la cola inferior se encuentra otra entidad (*color negro*) con el mismo atributo común:

El MATCH se producirá cuando exista una entidad en cada cola, pero con un atributo común entre ambas: NUM PEDIDO.



Alternativas de atributos comunes:

- Entity.SerialNumber
- Entity.CreateTime

## 1

## Caso de estudio

**Lavandería "Blanquita"**

## Objetivos:

- Modelado de Ensamblajes y Estado Transitorio.
- Aplicación del módulo Match para emparejar entidades, con un atributo único común (Hora de Arribo, Entity.SerialNumber y Entity.CreateTime).
- Replicaciones múltiples e intervalos de confianza. Módulo de Datos Statistic y su constructor de expresiones Build Expression.

A una lavandería llegan clientes que dejan sus trajes con un intervalo entre llegadas que corresponde a una distribución exponencial, con una media de 10 minutos. Los trajes son traídos uno a la vez y constan de dos prendas: saco y pantalón, y son recibidos y separados por tipo de prenda.



Cada prenda tiene una línea exclusiva de proceso: una para sacos y la otra para pantalones. Se dispone de un equipo de tres empleados para atender en forma cíclica, a cualquiera de las líneas. El tiempo para lavar un saco se ajusta a una distribución UNIF (20,25) minutos; el tiempo para lavar un pantalón se ajusta a una distribución UNIF (15,20) minutos. Al final se deben juntar las prendas que correspondan al cliente.

1. Se desea determinar el tiempo de ciclo de los trajes y el número de prendas que quedaron por lavar. Formule un modelo para simular el funcionamiento de la lavandería durante una jornada de trabajo de 8 horas.
2. Considere como atributo común el número de serie de la entidad.
3. Considere como atributo común la hora de creación de la entidad.

**Escenario**

La administración ha decidido que no debe quedar ningún trabajo pendiente para el día siguiente; se recibirán los trajes solo durante la jornada de trabajo (8 horas), pero se terminarán de lavar todos los ingresados. Se desea determinar cuántas horas extras serán necesarias. Realice los cambios al modelo original, ejecute 20 réplicas y considere un nivel de confianza del 95%.

### Solución 1: usando Batch

**Entity Type: TRAJE**

**Time Between Arrivals:** Type: Random (Expo), Value: 10, Units: Minutes

**Entities per Arrival:** 1, Max Arrivals: Infinite, First Creation: 0.0

**Assignments:** Attribute, HORA ARRIBO, TNOW

**Batch Action:** Seize Delay Release, Resources: Set, EMPLEADOS, 1, Cyclical, Delay Type: Uniform, Units: Minutes, Minimum: 20, Maximum: 25

**Batch Rule:** By Attribute, HORA ARRIBO, Representative Entity Type: TRAJE, Atributo común

**TIEMPO EN SISTEMA Action:** Seize Delay Release, Resources: Set, EMPLEADOS, 1, Cyclical, Delay Type: Uniform, Units: Minutes, Minimum: 15, Maximum: 20

**TIEMPO EN SISTEMA Rule:** Attribute Name: HORA ARRIBO, Record into Set: , Tally Name: TIEMPO EN SISTEMA

**Run Setup...**  
 Replication Length: 8, Time Units: Hours  
 Hours Per Day: 8, Base Time Units: Minutes  
 Terminating Condition:

Name	Type	Expression
1 SACOS QUE QUEDARON POR LAVAR	Output	LAVADO SACO.WMP
2 PANTALONES QUE QUEDARON POR LAVAR	Output	LAVADO PANTALON.WMP

**Statistic**

Output	Value
PANTALONES QUE QUEDARON POR LAVAR	7.0000
SACOS QUE QUEDARON POR LAVAR	7.0000
Interval	Average
TIEMPO EN SISTEMA	87.2645

### Solución 2: usando Match

**Entity Type: TRAJE**

**Time Between Arrivals:** Type: Random (Expo), Value: 10, Units: Minutes

**Entities per Arrival:** 1, Max Arrivals: Infinite, First Creation: 0.0

**Assignments:** Attribute, HORA ARRIBO, TNOW

**Match Action:** Seize Delay Release, Resources: Set, EMPLEADOS, 1, Cyclical, Delay Type: Uniform, Units: Minutes, Minimum: 15, Maximum: 20

**Match Rule:** Based on Attribute, HORA ARRIBO, Atributo común, Number to Match: 2

**EMPAQUETA Action:** Seize Delay Release, Resources: Set, EMPLEADOS, 1, Cyclical, Delay Type: Uniform, Units: Minutes, Minimum: 20, Maximum: 25

**EMPAQUETA Rule:** Any Entity, Irrelevante, Representative Entity Type: TRAJE

**TIEMPO EN SISTEMA Action:** Seize Delay Release, Resources: Set, EMPLEADOS, 1, Cyclical, Delay Type: Uniform, Units: Minutes, Minimum: 15, Maximum: 20

**TIEMPO EN SISTEMA Rule:** Attribute Name: HORA ARRIBO, Record into Set: , Tally Name: TIEMPO EN SISTEMA

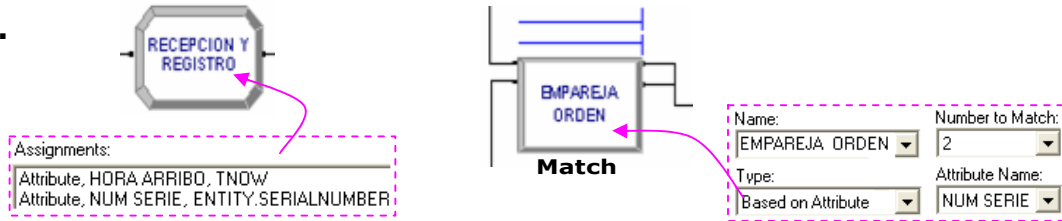
**Run Setup...**  
 Replication Length: 8, Time Units: Hours  
 Hours Per Day: 8, Base Time Units: Minutes  
 Terminating Condition:

Name	Type	Expression
1 SACOS QUE QUEDARON POR LAVAR	Output	LAVADO SACO.WMP
2 PANTALONES QUE QUEDARON POR LAVAR	Output	LAVADO PANTALON.WMP

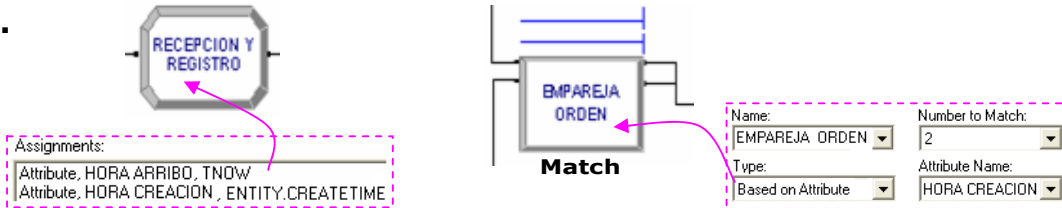
**Statistic**

Output	Value
PANTALONES QUE QUEDARON POR LAVAR	7.0000
SACOS QUE QUEDARON POR LAVAR	7.0000
Interval	Average
TIEMPO EN SISTEMA	87.2645

2.



3.



### Escenario

Run Setup...  
Number of Replications: 20  
Replication Length: Infinite Time Units: Hours  
Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes  
Terminating Condition:

Name	Type	Expression
1 HORAS EXTRAS	Output	(TNOW-480)/60

Statistic

Replications: 20 Time Units: Minutes

**User Specified**

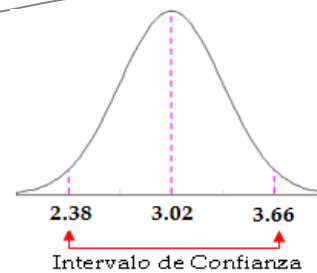
**Tally**

Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO EN SISTEMA	108.59	20.47	51.8358	191.95	20.0205	369.00

**Output**

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
HORAS EXTRAS	3.0145	0.64	1.3132	5.6752
PANTALONES QUE QUEDARON POR LAVAR	0.00	0.00	0.00	0.00
SACOS QUE QUEDARON POR LAVAR	0.00	0.00	0.00	0.00

**Respuesta:** Con un **95%** de nivel de confianza serán necesarias a lo más:  
 $3.0145 + 0.64 = 3.66$  horas extras





## 2

## Caso de estudio

**Manufactura de ropa a pedido<sup>1</sup>**

## Objetivos:

- Modelado de sistemas de producción continua y de operaciones de ensamble.
- Aplicación del módulo Match para emparejar entidades (atributo único común).
- Aplicación de las opciones First y Sum Attributes del módulo Batch.
- Uso de arreglos unidimensionales.

Una industria textil se dedica a la confección de camisas y pantalones. El tiempo entre arribos de las órdenes de compra corresponde a una distribución EXPO(30) min. Cada orden está constituida por un número de docenas de camisas y pantalones, cuyas cantidades se distribuyen aleatoriamente, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

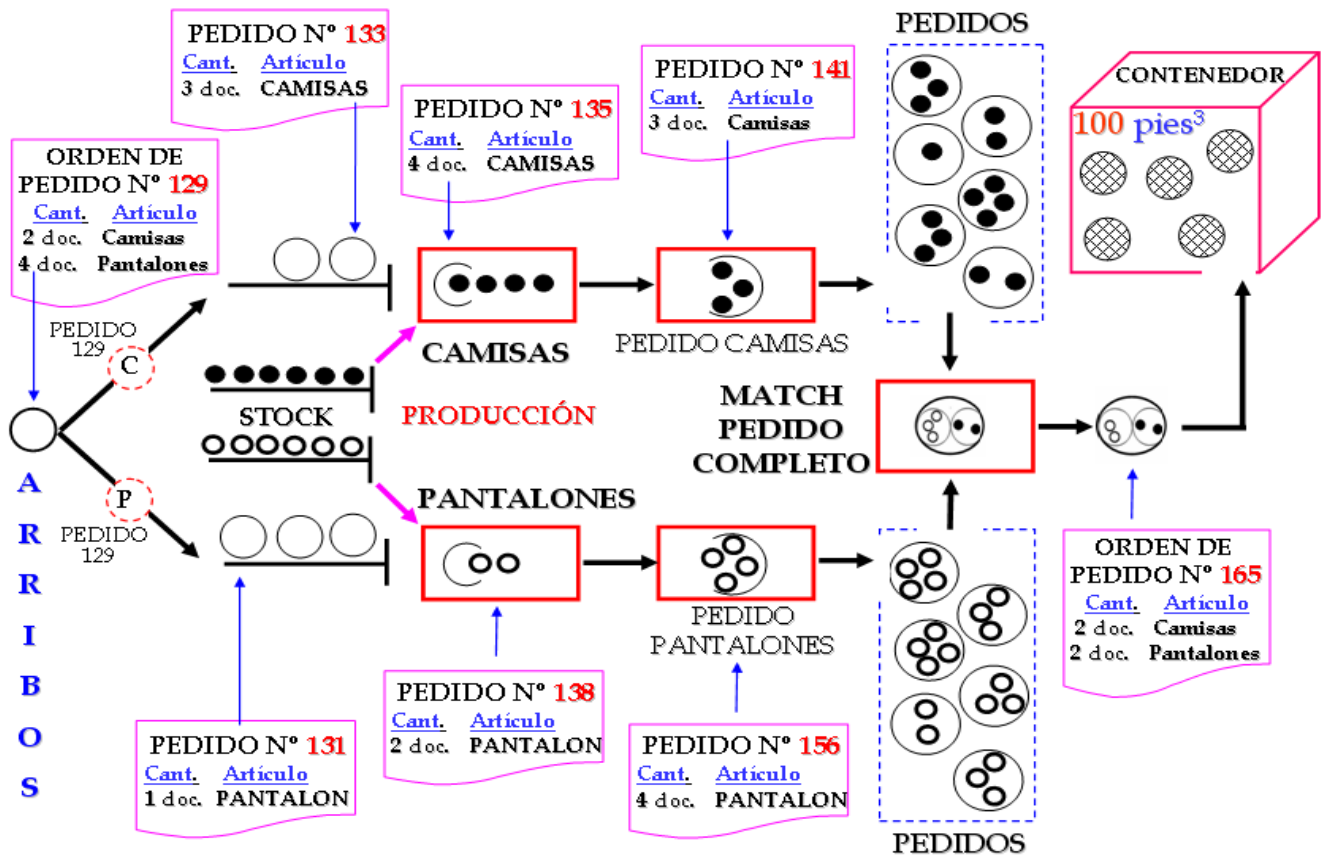
# docenas	1	2	3	4
Probabilidad de demanda	0.6	0.2	0.15	0.05

La producción se realiza de manera continua, es decir, generando siempre un *stock* de los productos. El tiempo para producir una docena de camisas es una TRIA (11,16,22) minutos y se empaca en una caja de 8 pies<sup>3</sup>. Producir una docena de pantalones demanda un tiempo igual a una TRIA(11,19,22) minutos y se empaca en una caja de 12 pies<sup>3</sup>. Cuando una orden se completa, la mercadería se lleva al área de empaque; este recorrido dura 7 minutos.

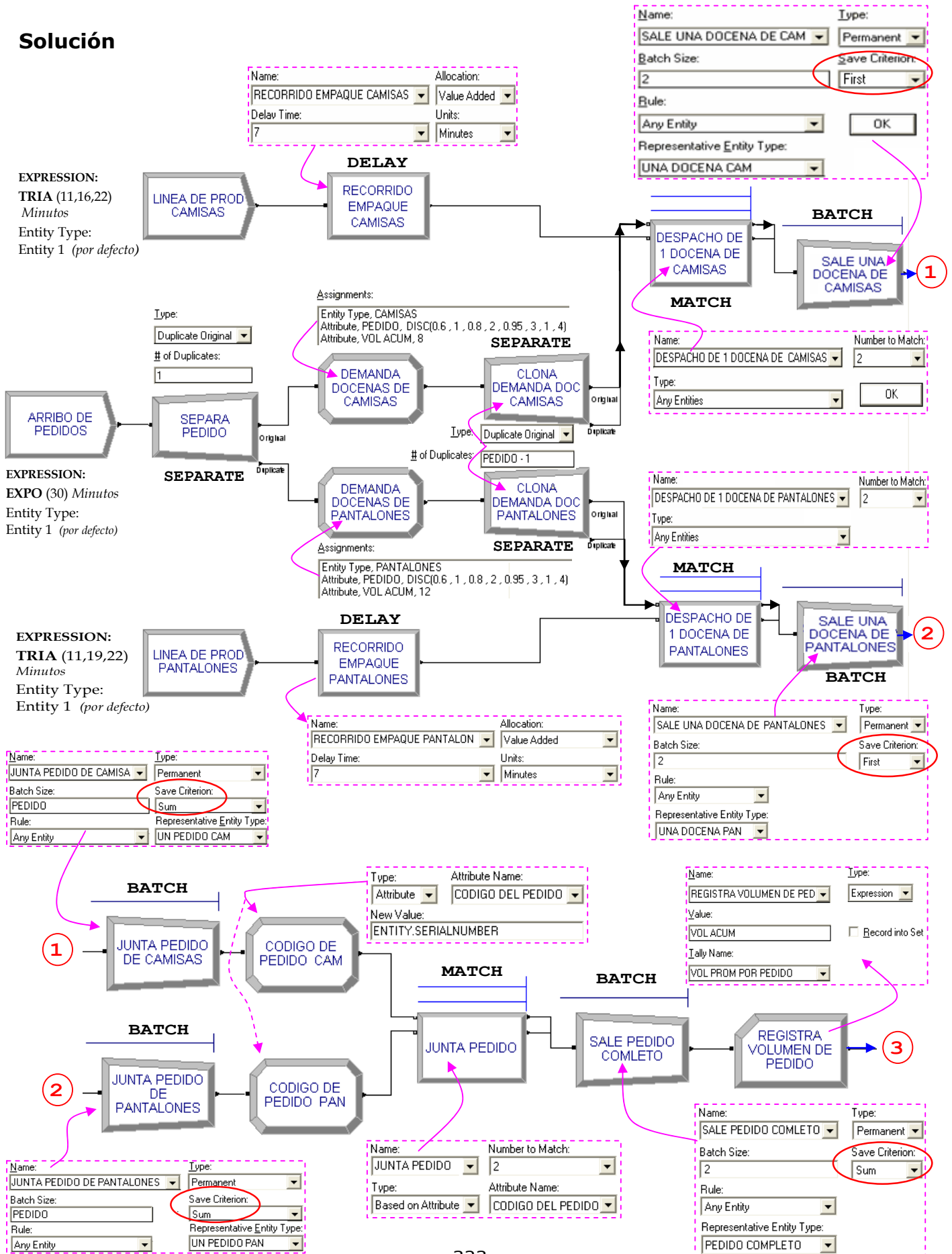
En el área de empaque se emparejan los pedidos de camisas y pantalones, de acuerdo al número de la orden del cliente, luego se embala la orden completa y se introduce en un contenedor, en donde se acumula junto a otras órdenes. El contenedor se considera lleno cuando alcanza o sobrepasa los 100 pies<sup>3</sup>, entonces se reemplaza de inmediato por un contenedor vacío. Se dispone de 50 contenedores.

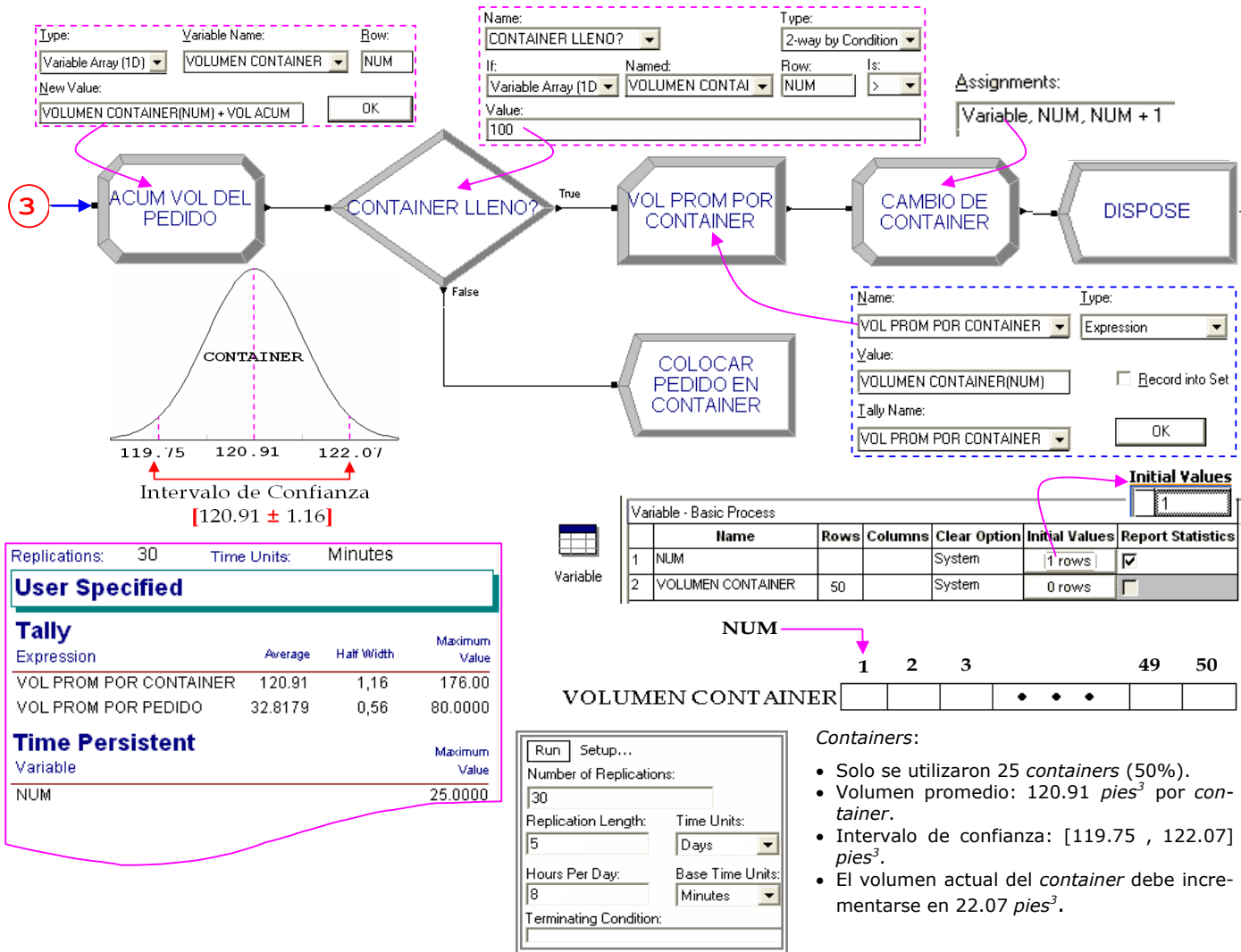
1. Simular el sistema durante cinco días continuos y 30 réplicas (1 día = 8 horas). Determine el volumen promedio por contenedor.
2. Suponga que el costo de una docena de camisas es \$60 y el de pantalones es \$102. Realice un estimado del costo promedio por contenedor.

<sup>1</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. *Simulation with visual SLAM and AweSim*, 1999.

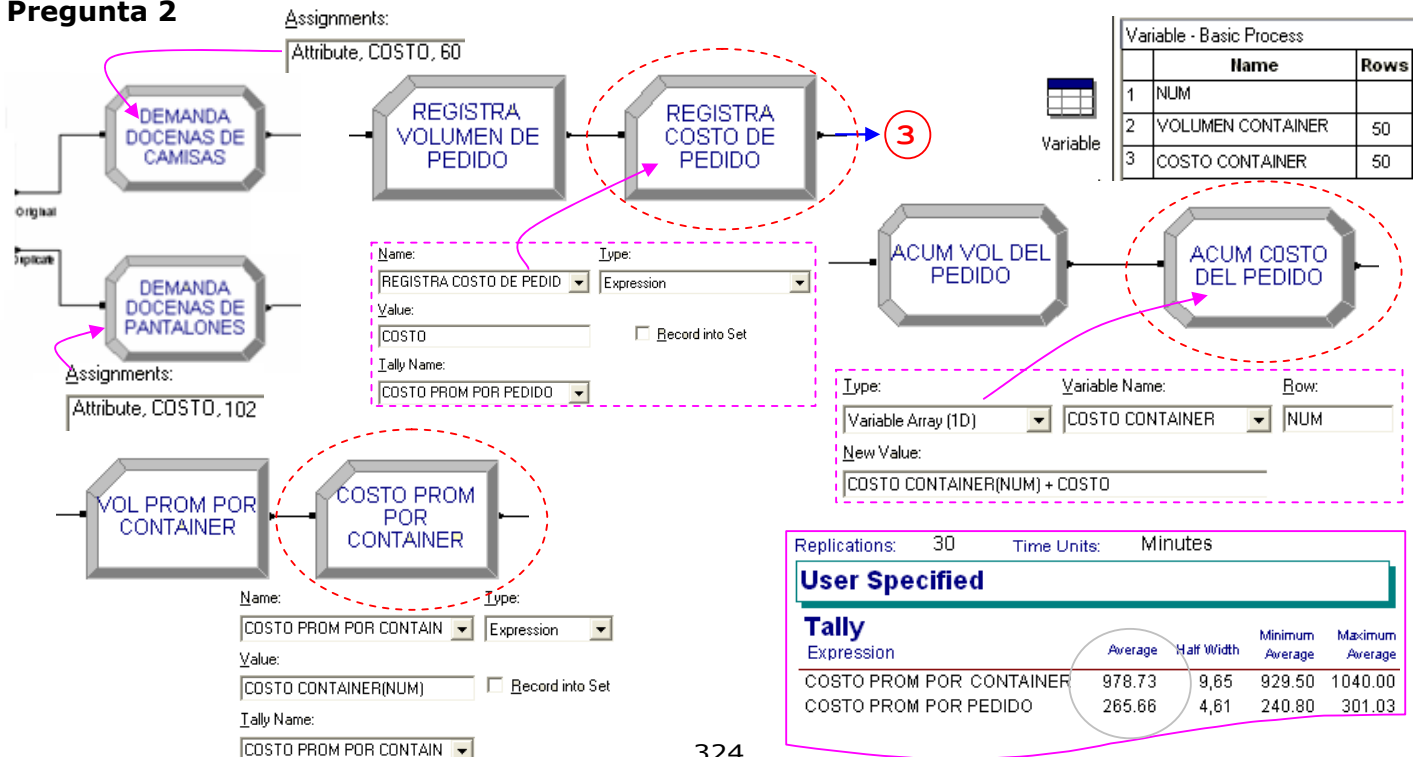


# Solución





## Pregunta 2



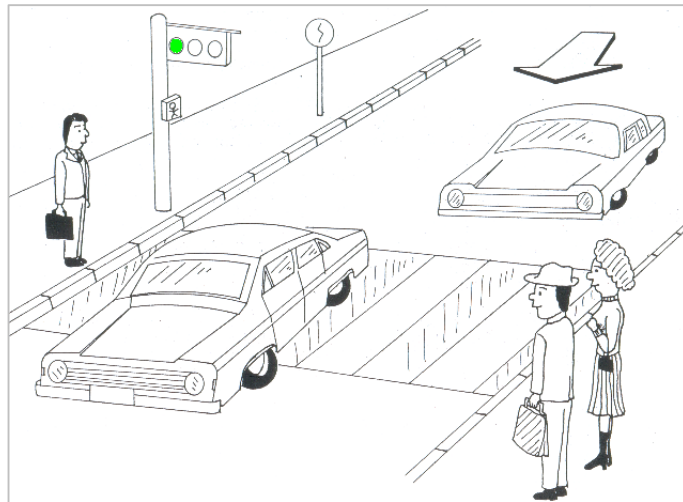
## 2. MÓDULO HOLD (retención de entidades en cola)

Este módulo retiene a una entidad en una cola, en espera de una señal, o en espera de alguna condición que se vuelva verdadera o que se mantenga en forma indefinida hasta que sea removida o extraída mediante el módulo Remove o el módulo Pickup.

### Ejemplo:

Suponga una situación en la que se modela la circulación de vehículos en un determinado cruce de avenidas congestionadas. La variable en estudio que se desea medir es el tiempo promedio de espera de los vehículos cuando el semáforo se encuentra en luz roja.

Cuando el semáforo cambie a luz roja, los vehículos (*entidades*), pueden ser retenidos en el módulo Hold hasta que se prenda la luz verde, entonces estos salen y continúan su recorrido.



Veamos tres alternativas de utilización del módulo Hold:

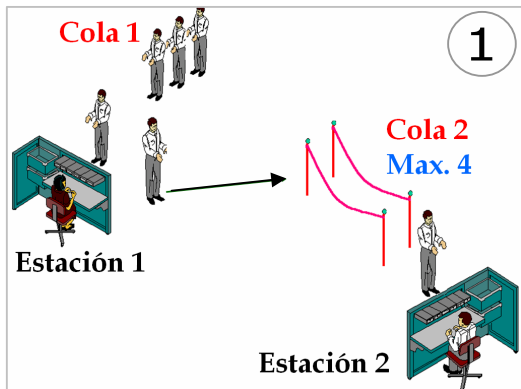
**Wait for Signal:** Cuando se da la señal, entonces las entidades retenidas salen, luego se cierra automáticamente. La señal se genera en el módulo Signal.

**Scan for Condition:** Cuando la condición es VERDADERA, entonces las entidades retenidas salen una a una. Antes de cada salida, se evalúa si la condición continua es verdadera. El Hold quedará abierto hasta que la condición se haga FALSA.

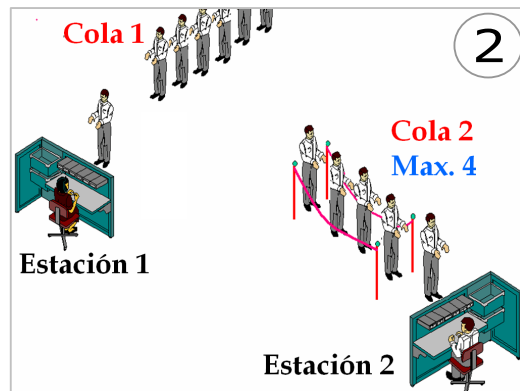
**Infinite Hold:** Las entidades retenidas permanecen en el Hold en forma indefinida, hasta que sea removida o sacada por los módulos REMOVE ó PICKUP.

**Ilustración:** Bloqueo de actividades

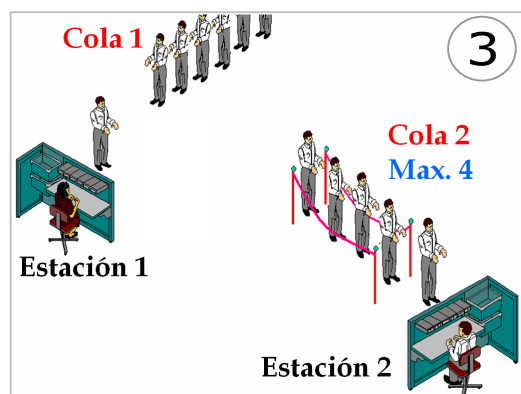
La siguiente secuencia ilustra cómo se origina un estado de Bloqueo en una actividad, veamos:



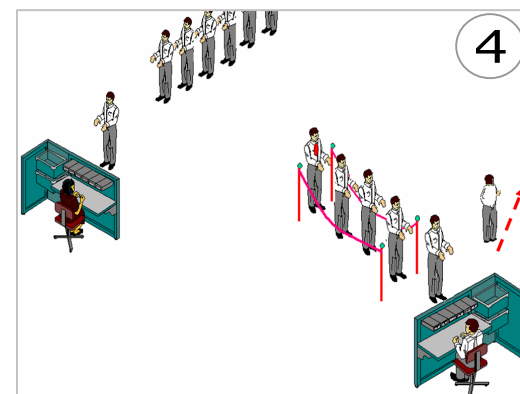
Los clientes que terminan de ser atendidos en la Estación 1 pasan a la Estación 2.



La cola 2 tiene una capacidad para 4 clientes. Actualmente está saturada.

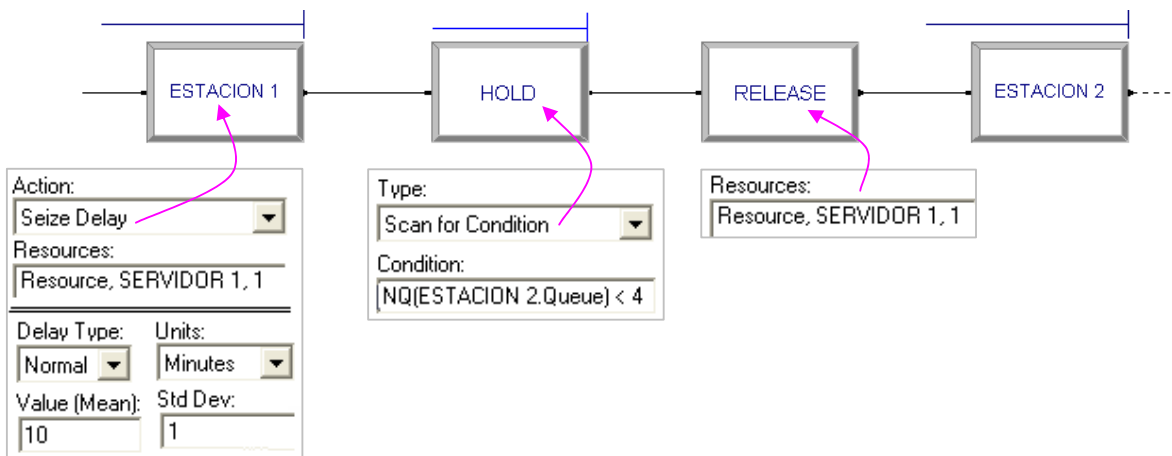


En la Estación 1 se observa a un cliente que no puede pasar, pues no hay capacidad en la cola 2. La Estación 1 queda bloqueada, ya que el servidor queda inactivo, al no poder atender al siguiente cliente. La Estación 1 se paraliza.



En la Estación 2 se produce el retiro de un cliente, que origina una vacante en la cola 2, que es ocupada por el cliente que viene de la Estación 1. Entonces termina la situación de bloqueo para la Estación 1 y el servidor reanuda su actividad.

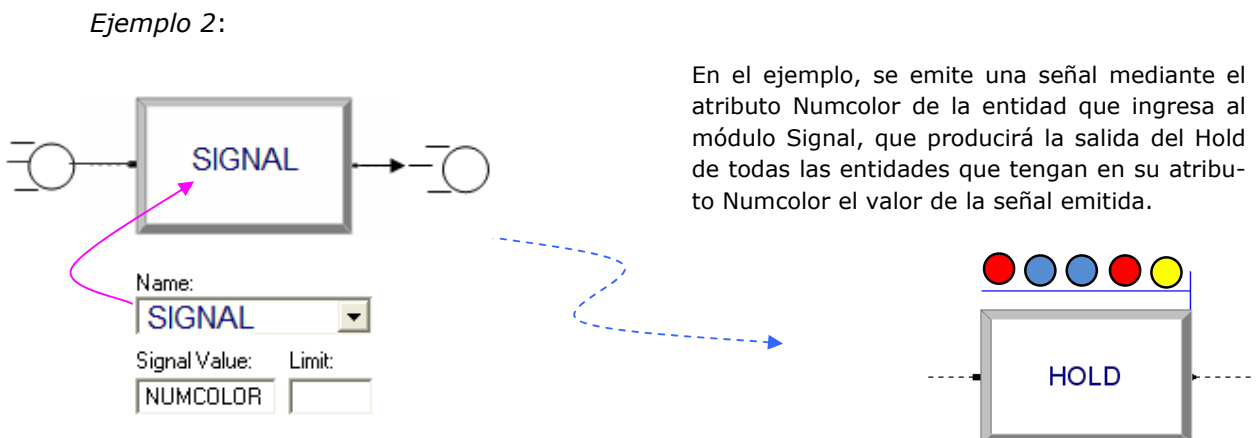
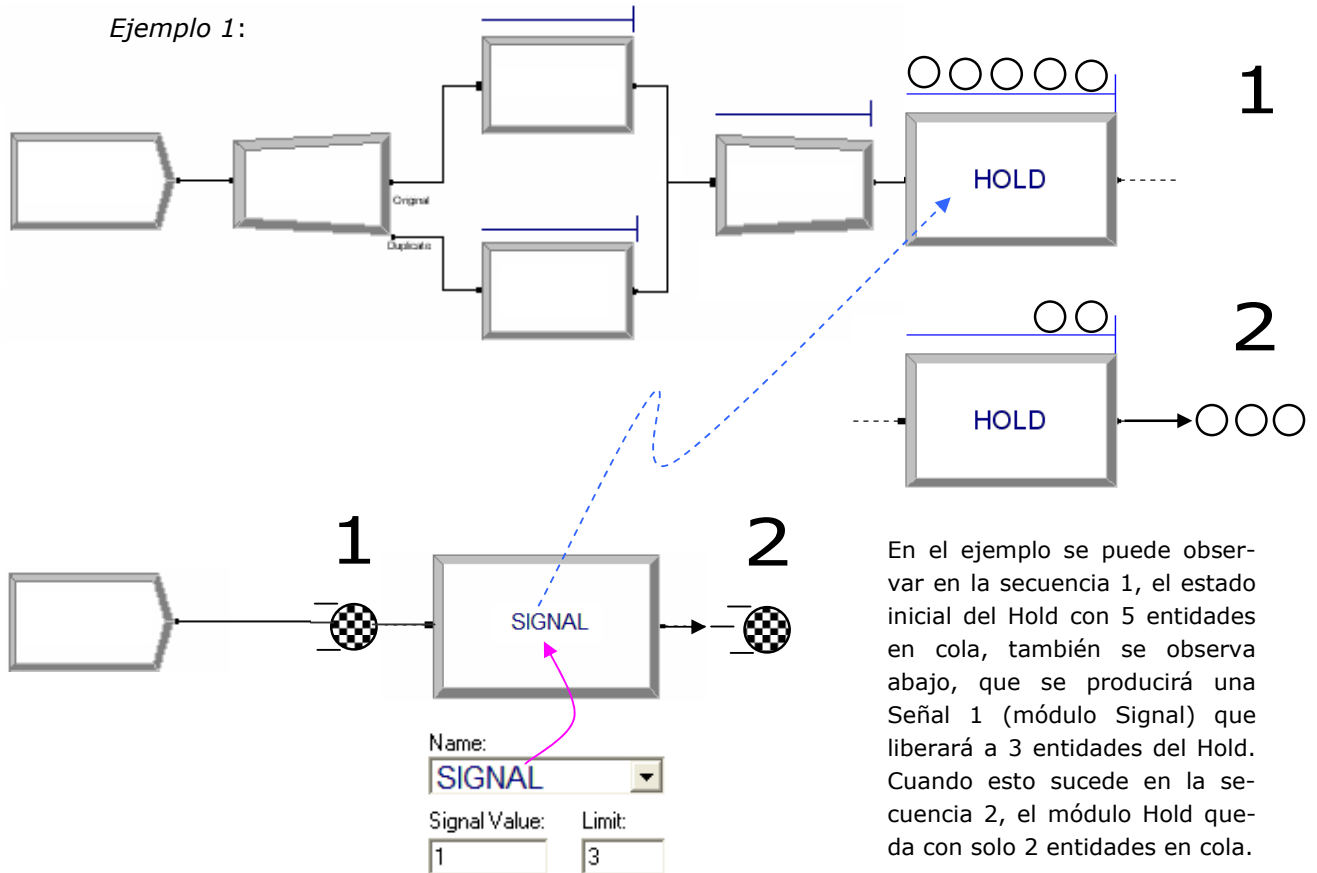
La situación de bloqueo de la Estación 1 se puede modelar de la siguiente manera:



### 3. MÓDULO SIGNAL (emisión de señales)

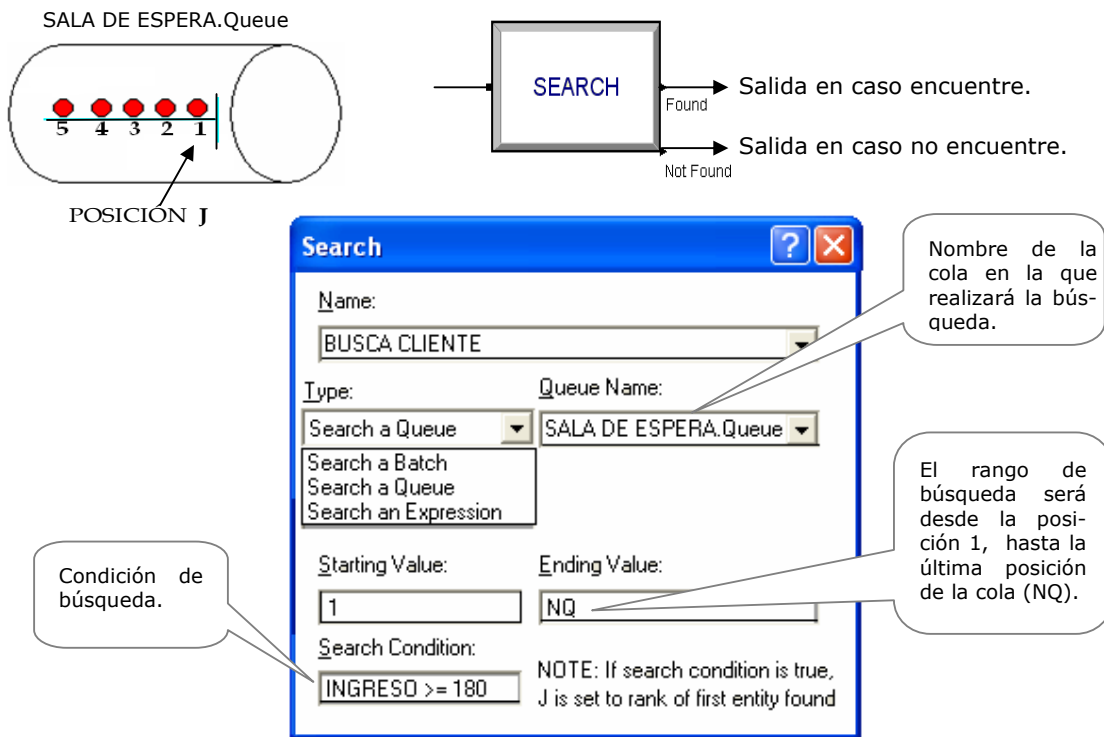
Este módulo envía una señal por medio de un valor a cada uno de los módulos Hold que esperen por una señal (*wait for signal*), entonces libera el Límite especificado de entidades. Si el Hold y el Signal tienen límites diferentes, entonces predomina el menor.

Cuando una entidad ingresa al módulo Signal, la señal es evaluada y luego enviada. En ese momento, las entidades retenidas en uno o más módulos Hold, que están esperando por la misma señal, son removidas de sus colas de espera.



## 4. MÓDULO SEARCH (búsqueda de entidades en cola)

Este módulo busca en una cola, en un grupo (*batch*) o en una expresión, a una entidad que satisfaga una condición de búsqueda. Cuando una entidad ingresa al módulo Search la variable global del sistema "J" almacena el índice o posición de la entidad con que se empieza la búsqueda, luego se evalúa la condición; si esta es falsa, la variable "J" almacena el índice de la siguiente entidad y así sucesivamente hasta que la condición es verdadera, entonces finaliza la búsqueda, pero retiene el índice de la entidad encontrada en la variable "J". Si la búsqueda tiene éxito la entidad sale del módulo Search por la salida superior (Found), de lo contrario sale por la salida inferior (Not Found). Es decir, la entidad que ingresa al módulo Search saldrá por una de las dos salidas disponibles, dependiendo del éxito o fracaso de la búsqueda.



El módulo Search busca en el *file* SALA DE ESPERA.Queue la posición de la entidad que cumple la condición. Si la encuentra, entonces retiene el índice en la variable "J" y termina la búsqueda.

El módulo Search no tiene la capacidad de remover a una entidad de una cola; sin embargo, sí puede realizar la búsqueda y guardar el índice de la entidad a remover en la variable "J". El paso siguiente lo realizará el módulo Remove, que extraerá de la cola a la entidad cuya posición fue encontrada por el módulo Search.



## 5. MÓDULO REMOVE (extracción de entidades de cola)

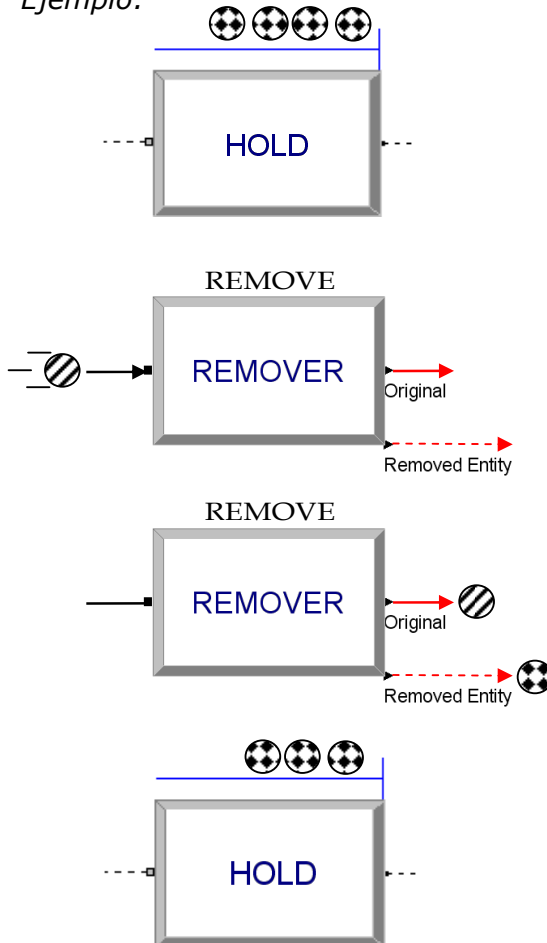
Este módulo extrae o remueve a una entidad de su posición en una determinada cola y la envía a un módulo designado.

Elimina la entidad que ocupa el índice "J" en la cola. Mediante el módulo Search se ubicó el índice de la entidad a remover.

Elimina la entidad que ocupa el índice 1 en la cola.

Última posición en la cola, que ocupa la entidad a ser removida.

*Ejemplo:*



1. El estado actual de la cola (Hold) es de 4 entidades.
2. Una entidad ingresa al módulo Remove.
3. Por la salida superior sale la entidad que ingresó al módulo Remove  
Por la salida inferior sale la entidad removida de la cola.
4. El estado actual de la cola es de 3 entidades.

## 3

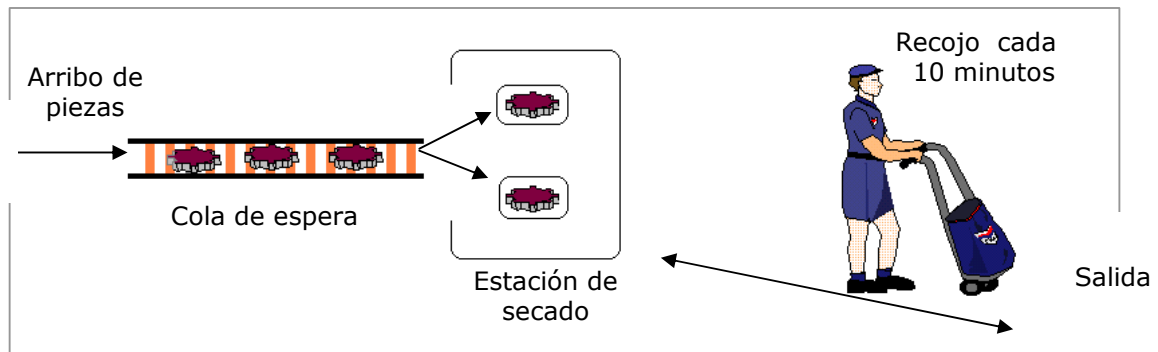
## Caso de estudio

**Duración de una actividad dependiente de condición<sup>2</sup>**

## Objetivos:

- Aplicación de los módulos Hold (Wait for Signal/Infinite Hold/ Scan for Condition) y Signal para modelar compuertas (retener y controlar el flujo de entidades a través del sistema).
- Módulos Search y Remove para buscar entidad en cola y removerla.
- Uso del módulo de datos Statistic.

En una línea de acabado, luego de una operación de pintado, las piezas pasan a una estación de secado que tiene un horno con capacidad para 2 unidades.



Las piezas llegan con un tiempo entre arribos distribuido exponencialmente con una media de 10 minutos. El transporte de las piezas hacia la estación de secado demora un tiempo uniformemente distribuido entre 1 y 3 minutos. Si los dos espacios en el horno estuvieran llenos, las piezas permanecerán en cola delante de la estación de secado. En la estación de secado, las piezas permanecen en el horno hasta el momento en que un operario viene a recogerlas para iniciar el siguiente proceso.

Se ha planeado que el operario recoja constantemente, cada 10 minutos, las piezas que hubiere en el horno. Al momento del recojo no debe importar el tiempo que las piezas han permanecido en el horno de secado.

Simular el proceso partiendo del estado vacío y desocupado, llegando la primera unidad en el minuto cero y hasta que se hayan llevado por lo menos 200 piezas en total. Se pide:

Formule un modelo para simular el comportamiento del sistema y determine:

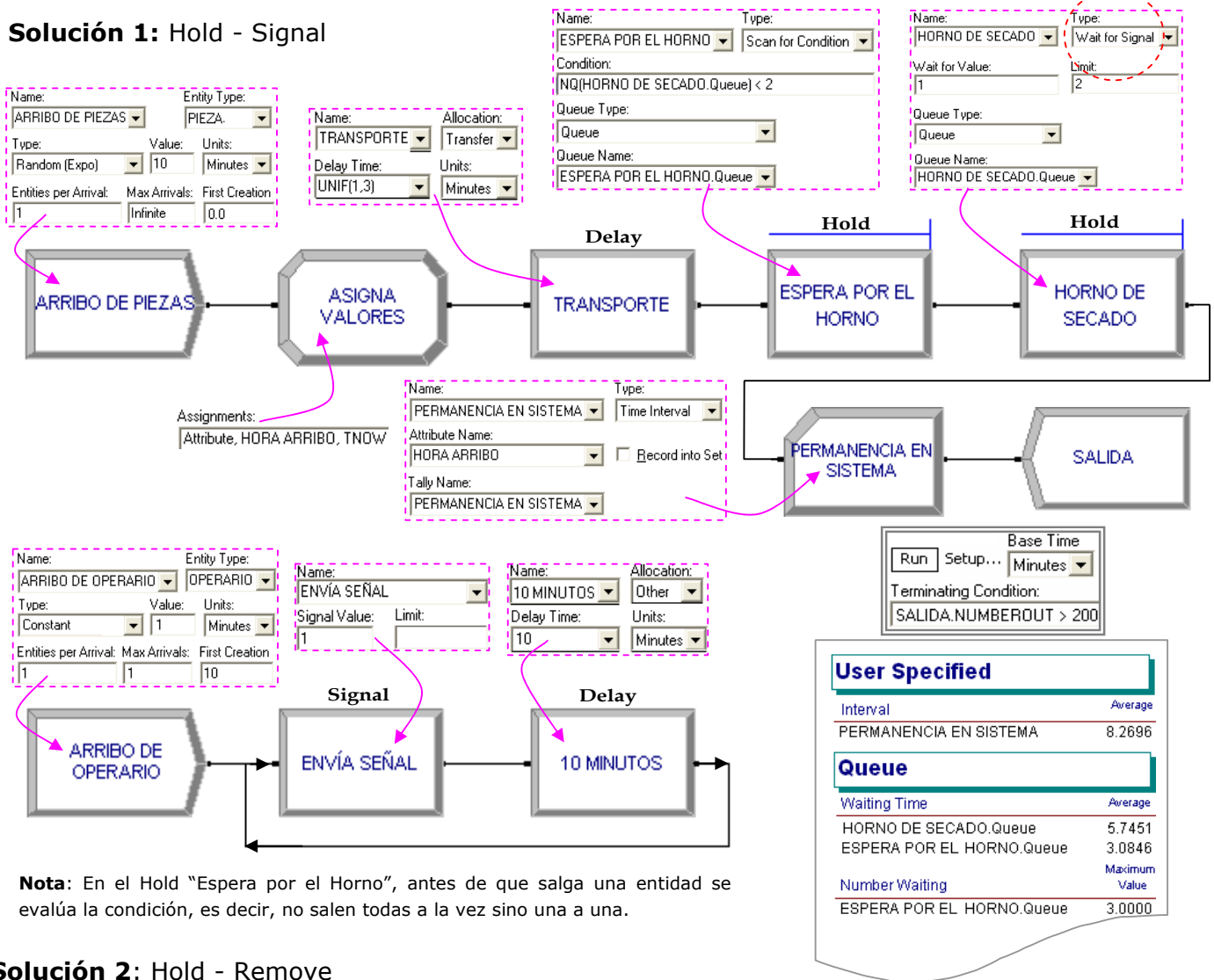
- El tiempo promedio que las piezas permanecen en la línea de acabado.
- El tiempo promedio que las piezas permanecen en el horno.
- El tiempo promedio de espera de las piezas, por el horno.
- Máximo número de piezas en la cola, por el horno.

**Escenario**

Suponga que se desean sacar del horno solo las piezas que han permanecido por lo menos 3 minutos en el proceso de secado. Se desean contabilizar los intentos fallidos, es decir, cuántas veces no hubo recojo porque las piezas en el horno estaban por debajo de los 3 minutos.

<sup>2</sup> Ibídem.

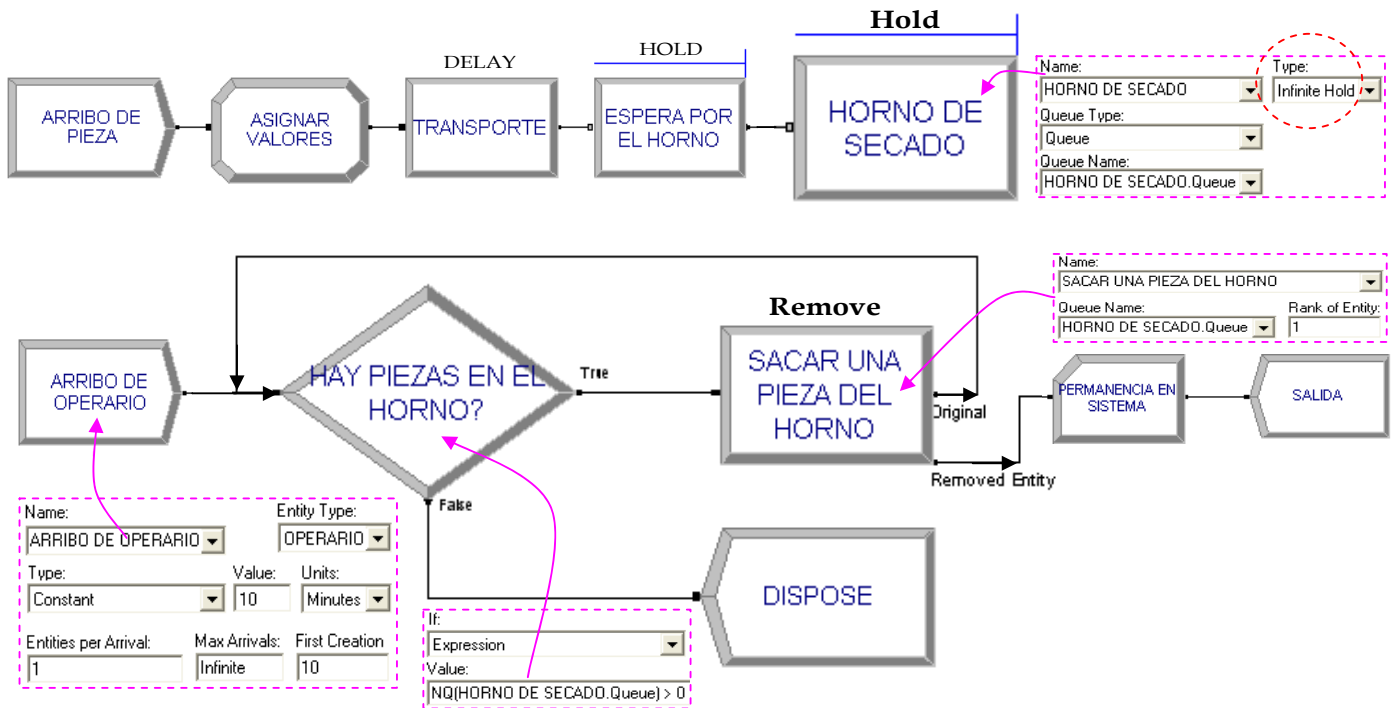
### Solución 1: Hold - Signal



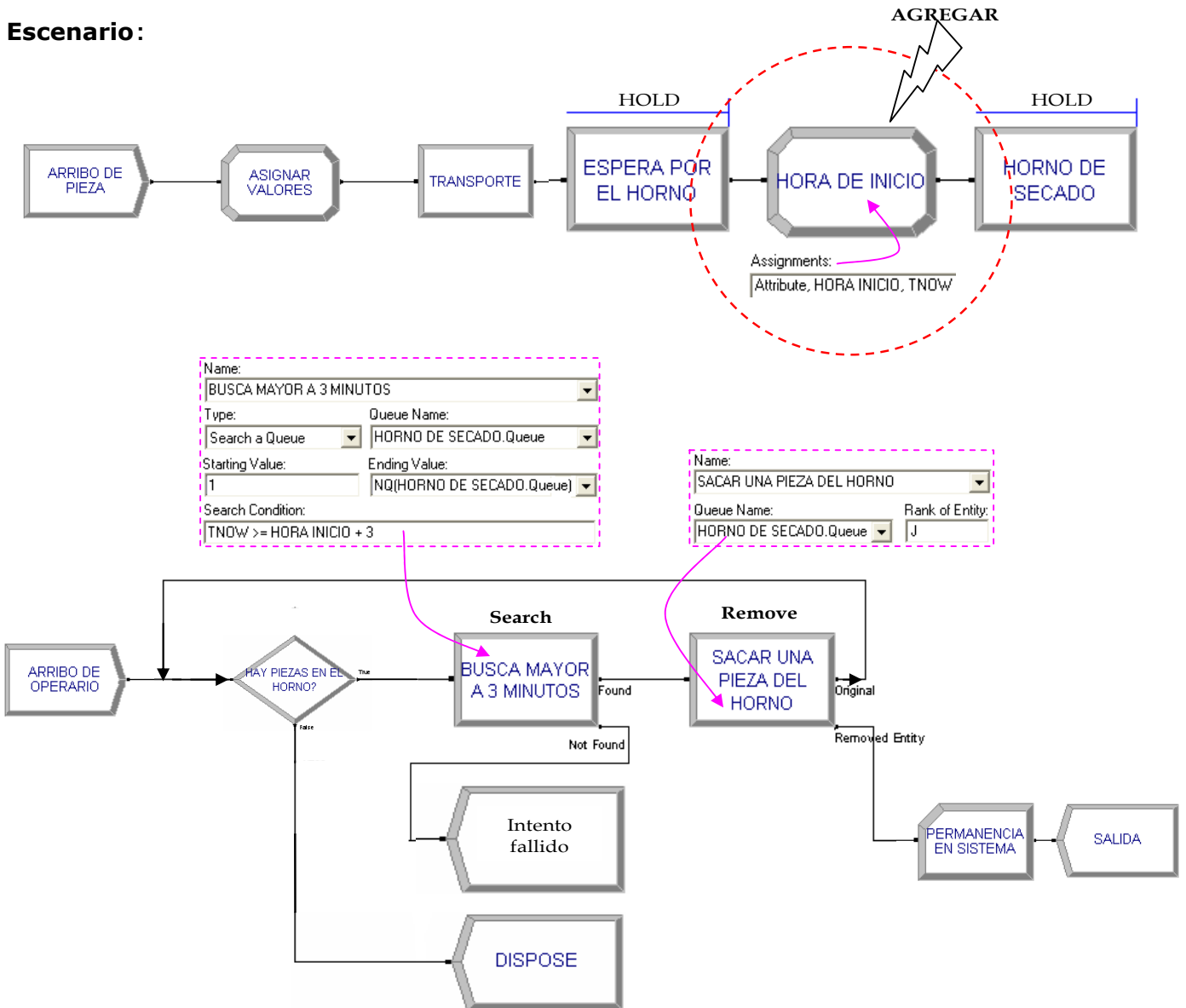
User Specified	
Interval	Average
PERMANENCIA EN SISTEMA	8.2696
Queue	
Waiting Time	Average
HORNO DE SECADO.Queue	5.7451
ESPERA POR EL HORNO.Queue	3.0846
Number Waiting	Maximum Value
ESPERA POR EL HORNO.Queue	3.0000

**Nota:** En el Hold "Espera por el Horno", antes de que salga una entidad se evalúa la condición, es decir, no salen todas a la vez sino una a una.

### Solución 2: Hold - Remove



**Escenario:**



	Name	Type	Expression	Report Label
1	NO HUBO RECOJO	Output	INTENTO FALLIDO.NumberOut	NO HUBO RECOJO

User Specified	
Output	Value
NO HUBO RECOJO	213.00
Interval	Average
PERMANENCIA EN SISTEMA	11.5369

## 4

## Caso de estudio

**Análisis de tráfico por una sola vía<sup>3</sup>**

Objetivo:

- Aplicación práctica del módulo avanzado Hold para el modelado de compuertas, para retener y controlar el flujo de entidades a través del sistema.

El sistema a ser modelado corresponde al flujo de tráfico en dos direcciones a lo largo de una autopista de doble vía. En esta, una vía ha sido cerrada por una longitud de 500 metros, con el propósito de realizar operaciones de mantenimiento (véase la figura). Con el propósito de controlar el tráfico en la vía adyacente a la sección que está siendo reparada se ha colocado un semáforo en cada extremo de la vía cerrada. Las luces permiten el flujo de vehículos solo desde una dirección por un determinado tiempo, en forma alternada.



Cuando el semáforo cambia a luz verde, los vehículos de una determinada dirección, que estaban en espera, arrancan y demoran 2 segundos hasta llegar a dicho semáforo, donde inician su paso hacia el otro extremo. Se debe controlar que el paso de vehículos sea de uno en uno; es decir, atravesarán dicho tramo en fila, uno detrás de otro.

Si un vehículo llega a la zona y no hay vehículos en cola y el semáforo está en luz verde, entonces pasa directamente, sin detenerse y sin ninguna demora.

<sup>3</sup> Ibídem.

El arribo de vehículos en la dirección 1 ( $\rightarrow$ ) está distribuido exponencialmente con una media de 9 segundos, mientras que los vehículos que van en la dirección 2 ( $\leftarrow$ ) arriban conforme a una exponencial con media de 12 segundos.

Un ciclo de señalización consiste de luz verde en la dirección 1 durante 60 segundos, luego de luz roja en ambas direcciones durante 55 segundos, para que terminen de pasar los que quedaron a medio camino, en seguida de luz verde en la dirección 2 durante 30 segundos, luego de luz roja en ambas direcciones durante 55 segundos, y luego el ciclo se repite.

Considere que los vehículos que van en ambas direcciones arriban en el instante cero y deben esperar ambos 55 segundos antes de que se prenda la luz verde del semáforo en la dirección 1.

Simular la situación descrita durante 1 día (24 horas). Interprete los indicadores del reporte.

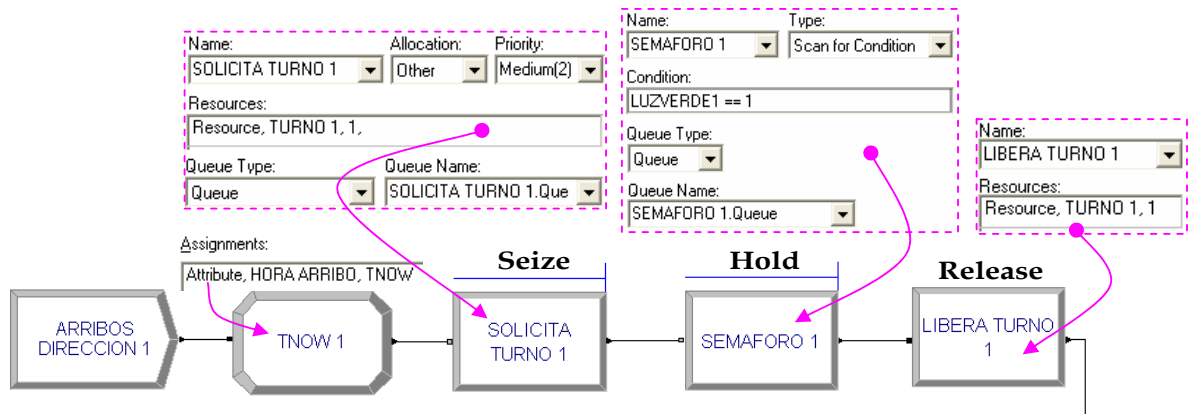
### **Escenario**

Suponga que el objetivo es determinar los valores del tiempo de luz verde en ambas direcciones, de tal forma que los tiempos de espera, en ambos casos, sean lo más uniformes.

### Solución

### Vehículos:

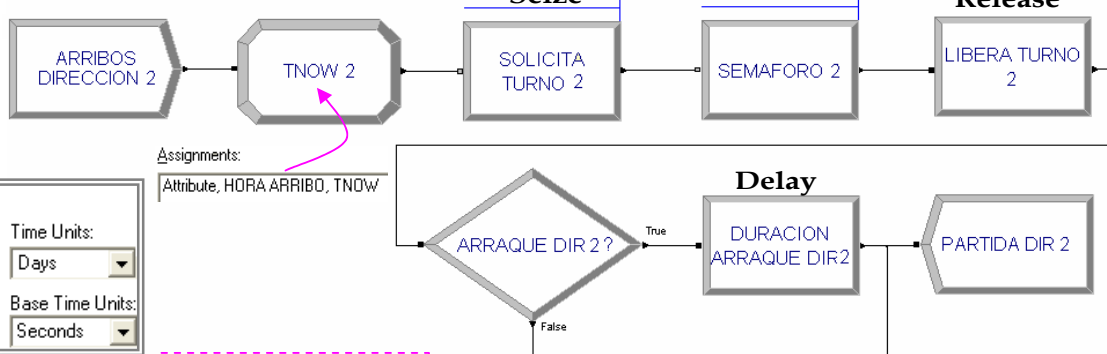
EXPO (9)  
Segundos  
Entity Type:  
DIRECCION 1



	Name	Type	Capacity
Resource	1 TURNO 1	Fixed Capacity	1
	2 TURNO 2	Fixed Capacity	1

**Nota:** El recurso **Turno**, al tener una capacidad de uno, impide que pasen todos a la vez, sino uno a uno.

EXPO (12)  
Segundos  
Entity Type:  
DIRECCIÓN 2



Run Setup...

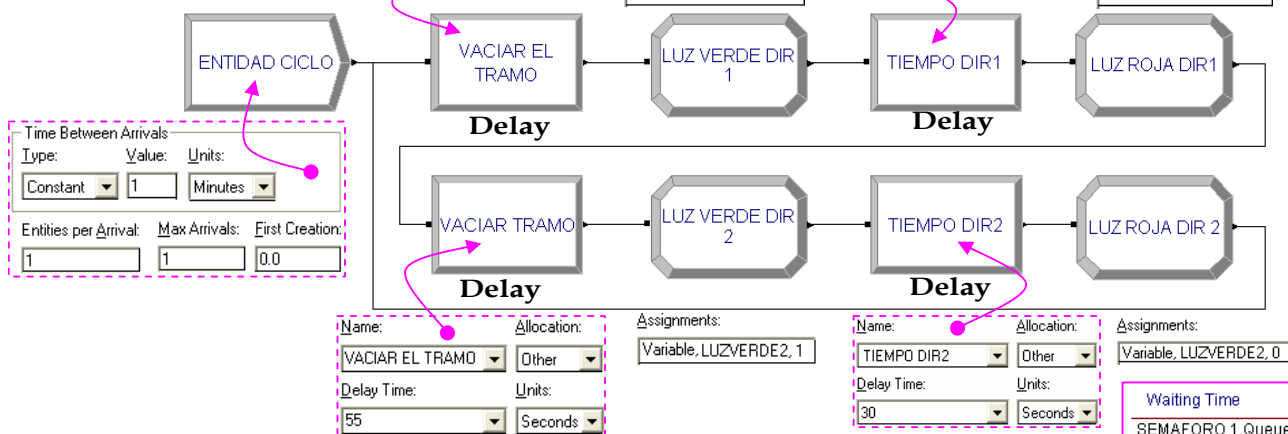
Replication Length: 1

Time Units: Days

Hours Per Day: 24

Base Time Units: Seconds

### Semáforos:



### Escenario:

Cambiando los tiempos de luz verde en cada dirección a 45 segundos, por igual, se hacen más homogéneos los tiempos de espera en ambas direcciones.

Waiting Time	Average
SEMAFORO 1.Queue	145.39
SEMAFORO 2.Queue	143.52

Waiting Time	Average
SEMAFORO 1.Queue	130.06
SEMAFORO 2.Queue	158.52

## 5

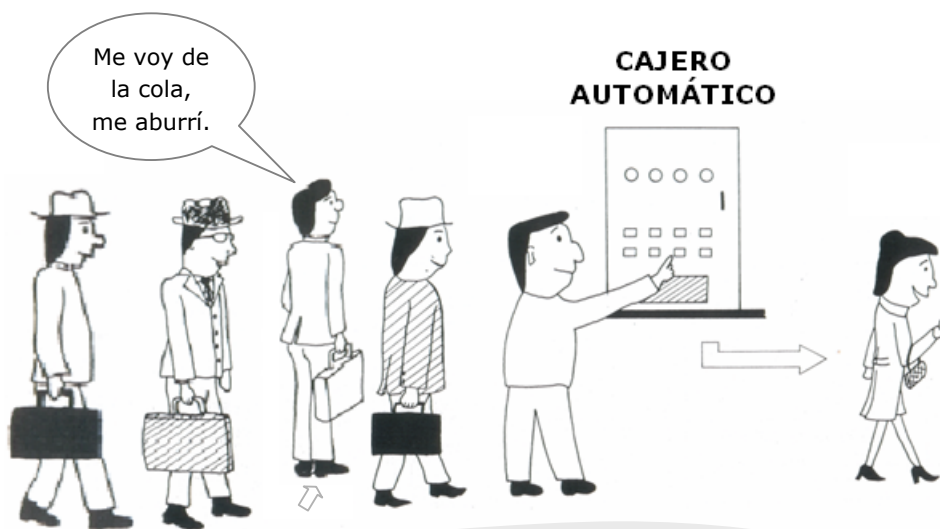
## Caso de estudio

**Transacciones en un cajero automático<sup>4</sup>**

## Objetivos:

- Uso de los módulos avanzados Search y Remove para ubicar la posición de una entidad en cola y luego removerla.
- Aplicación práctica del módulo de datos Statistic.
- Interpretación del reporte de resultados.

Los usuarios del cajero automático de un Banco llegan a este en intervalos de tiempo de 5 minutos en promedio, exponencialmente distribuidos. El tiempo que demora una persona en realizar una transacción en el cajero es en promedio de 6 minutos, exponencialmente distribuido.



Si un usuario espera en cola un cierto tiempo, que va mas allá de su tolerancia, entonces se aburre y se retira. Como es natural, las personas tienen diferentes límites para dicha tolerancia, sin embargo, se han investigado estos límites en este tipo de transacciones y se ha concluido que los clientes tienen en promedio una tolerancia de espera que se ajusta a una distribución uniforme entre 10 y 20 minutos, luego de dicho tiempo se impacientan y se van.

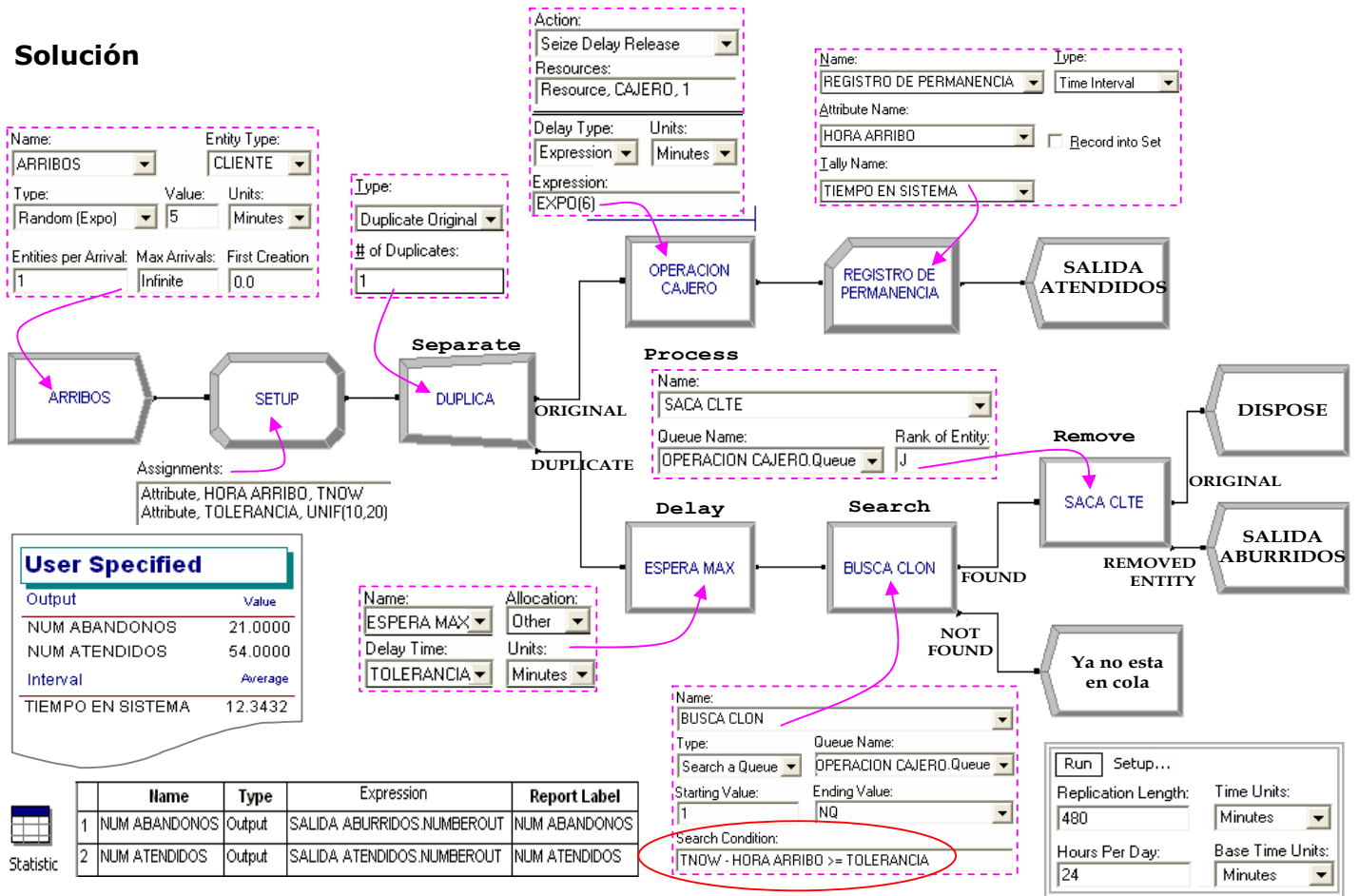
Se pide:

1. Simular la situación descrita durante 8 horas. Recolectar estadísticas sobre el número de personas que usaron el cajero y cuántos se aburrieron de esperar y se retiraron.
2. Dado que un cliente que se retira de la cola es un cliente potencial que se pierde, el administrador del Banco tiene especial interés en investigar sobre la proporción de clientes que abandonan respecto del total que ingresó a la cola. Determine apropiadamente dicho indicador.

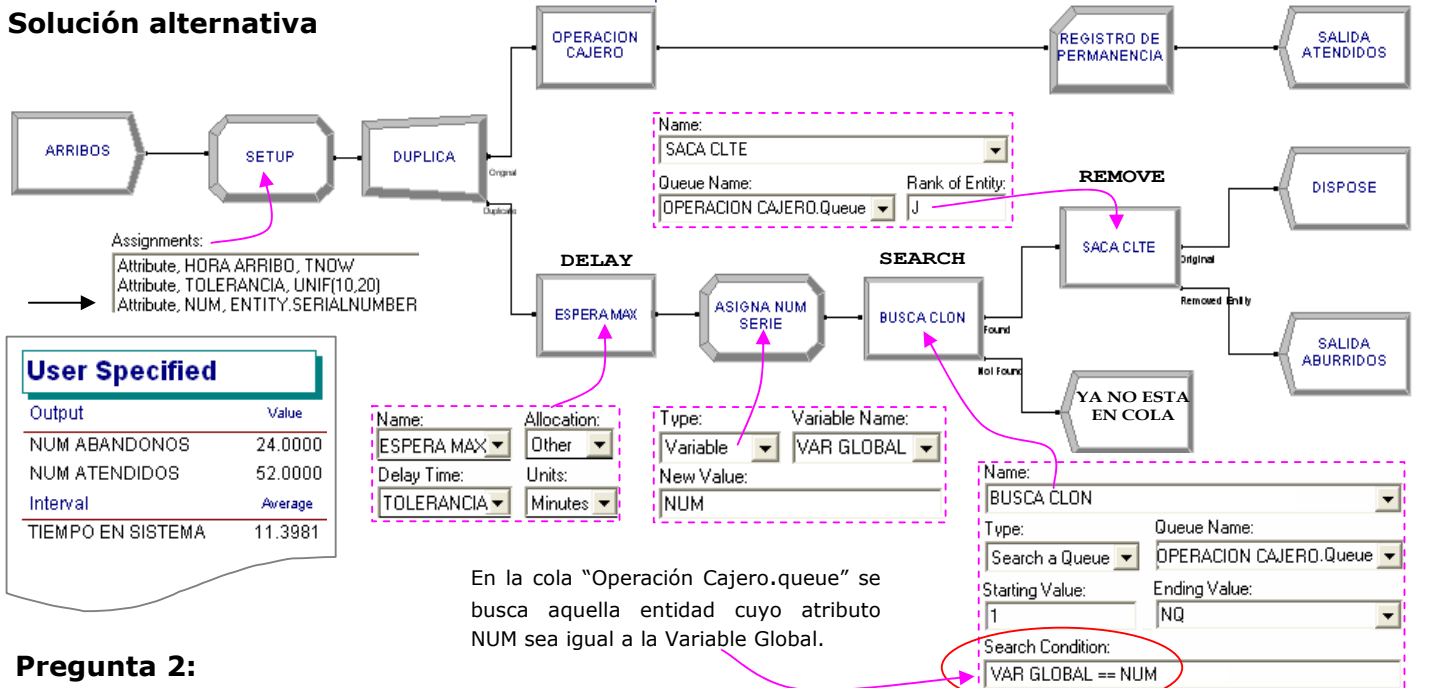
<sup>4</sup> Ibídem.



### Solución

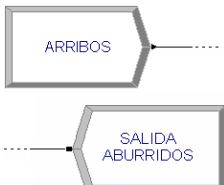


### Solución alternativa



En la cola "Operación Cajero.queue" se busca aquella entidad cuyo atributo NUM sea igual a la Variable Global.

### Pregunta 2:



**Cambios:** En el módulo "Statistic" se incluyó la expresión (Número Aburridos) / (Total Arribos)

Output	Value
PORCENTAJE QUE ABANDONA	26.2500

## 6

## Caso de estudio

**Sala de reposo en una clínica<sup>5</sup>**

## Objetivos:

- Aplicación práctica de los módulos avanzados Seize, Delay, Release, Match, Hold, Search y Remove.

En una clínica, los pacientes son atendidos en el área de emergencia y luego son derivados a una sala de reposo, donde permanecerán hasta que un médico de ronda les dé de alta.

Los pacientes llegan a la clínica acompañados de un familiar, de acuerdo a una exponencial (15) minutos. El paciente es atendido inmediatamente (considere que siempre existe disponibilidad de médicos para esta función), demorando una exponencial (10) minutos. Terminado esto, el paciente debe ingresar a la sala de reposo, donde hay dos camas disponibles (la asignación es cíclica y si no hubiera, debe esperar en emergencia hasta que se desocupe una). Mientras tanto, su familiar se encuentra realizando trámites administrativos con un empleado (solo hay uno). Esta operación demanda un tiempo uniforme (10,30) minutos. Si hasta entonces el paciente no ha sido dado de alta, el familiar pasa a una sala, en espera del aviso de que el paciente ha sido dado de alta.

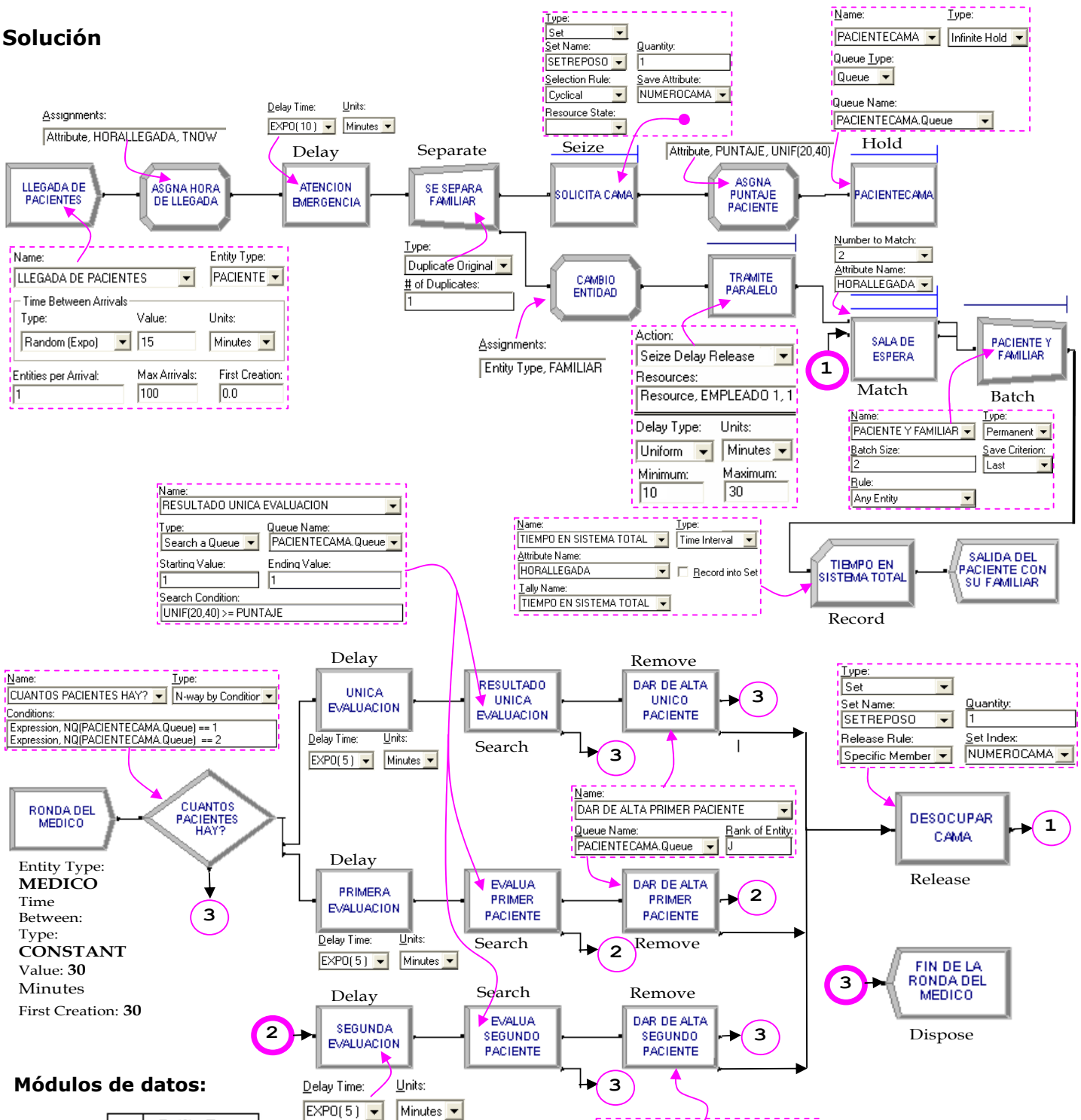
Cuando el paciente ingresa a una de las dos camas de reposo, este ya tiene un puntaje asignado en el chequeo de emergencia, este corresponde a una uniforme (20,40) puntos. Cada 30 minutos, un médico de ronda visita la sala de reposo (considere la primera visita a los 30 minutos de iniciada la simulación) y evalúa a cada uno de los pacientes en dicha sala. Esta evaluación demora una exponencial (5) minutos y como resultado de esta evaluación, el médico obtiene una nueva valoración correspondiente a una uniforme (20,40) puntos. Si el valor obtenido es mayor o igual que el puntaje que tenía la paciente, entonces este será dado de alta; en caso contrario, el paciente seguirá recuperándose y se someterá a una nueva evaluación en la siguiente ronda.

Se pide:

1. Simular la situación descrita durante un día (24 horas).
2. Presentar los siguientes indicadores:
  - Tiempo promedio de los pacientes en la sala de reposo.
  - Tiempo máximo de los pacientes en la sala de reposo.
  - Tiempo promedio de los pacientes en la clínica.
  - Número promedio de pacientes esperando cama.
  - Número máximo de pacientes esperando cama.
  - Tiempo promedio del familiar en sala de espera.
  - Tiempo promedio del paciente dado de alta, esperando al familiar
3. Explicar la situación administrativa del proceso descrito. ¿Cree usted que las dos camas de la sala de reposo son suficientes? (justifique). ¿Cuáles podrían ser sus sugerencias para mejorar el proceso? (justifique).

<sup>5</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen parcial 2006-2".

### Solución



### Módulos de datos:

Entity Type	
1	MEDICO
2	FAMILIAR
3	PACIENTE

Resource			
1	EMPLEADO	Fixed Capacity	1
2	CAMA1	Fixed Capacity	1
3	CAMA2	Fixed Capacity	1

Resource Name	
1	CAMA1
2	CAMA2

Name	Type	Members	
1	SETREPOSO	Resource	2 rows

- Indicadores:**
- 45.48 minutos
  - 97.89 minutos
  - 245.72 minutos
  - 17.76 pacientes
  - 44 pacientes
  - 30.23 minutos
  - 3.81 min.



## Caso de estudio

**Almacenes "Mundo"<sup>6</sup>**

## Objetivos:

- Uso de los módulos avanzados Hold, Remove, Store y Unstore.
- Uso del Record (Expression).
- Función NSTO.
- Variable Process.WIP.

Como consecuencia del incremento del comercio exterior en el país, se desea analizar el proceso de retiro de contenedores de los barcos en el puerto de descarga y su traslado en camiones a los respectivos depósitos autorizados de almacenamiento.

Cuando un barco de carga llega al puerto, los camiones de transporte forman cola para recibir un contenedor, luego lo trasladan al depósito autorizado. Descargar un contenedor del barco y cargarlo en el camión demanda un tiempo distribuido en forma exponencial con una media de 10 minutos. El traslado del camión cargado desde el puerto hasta el depósito de almacenamiento y la descarga en dicho depósito tiene una duración distribuida en forma uniforme entre 120 y 180 minutos. El regreso al puerto del camión sin carga toma 10 minutos y solo regresa previo aviso por radio del agente de aduana, quien le comunica si es que faltan contenedores por recoger, descontando los contenedores que se cargarán en los camiones que ya se encuentran en camino de regreso. En caso de que no hubiera contenedores por recoger, el camión se retira.

Se solicita modelar el trabajo de descarga, traslado y almacenamiento de un despacho; se han contratado 5 camiones y se desea descargar 14 contenedores de un barco. Considere que los camiones tardarán 10 minutos en llegar al muelle, para iniciar el proceso de descarga y traslado de estos contenedores. Los contenedores empezarán su tiempo de espera para ser trasladados desde el inicio de la simulación. Esta espera tiene que ser medida.

Formule el modelo que represente el trabajo de descarga de contenedores y su traslado al depósito autorizado. Presentar los siguientes resultados obtenidos al simular el modelo:

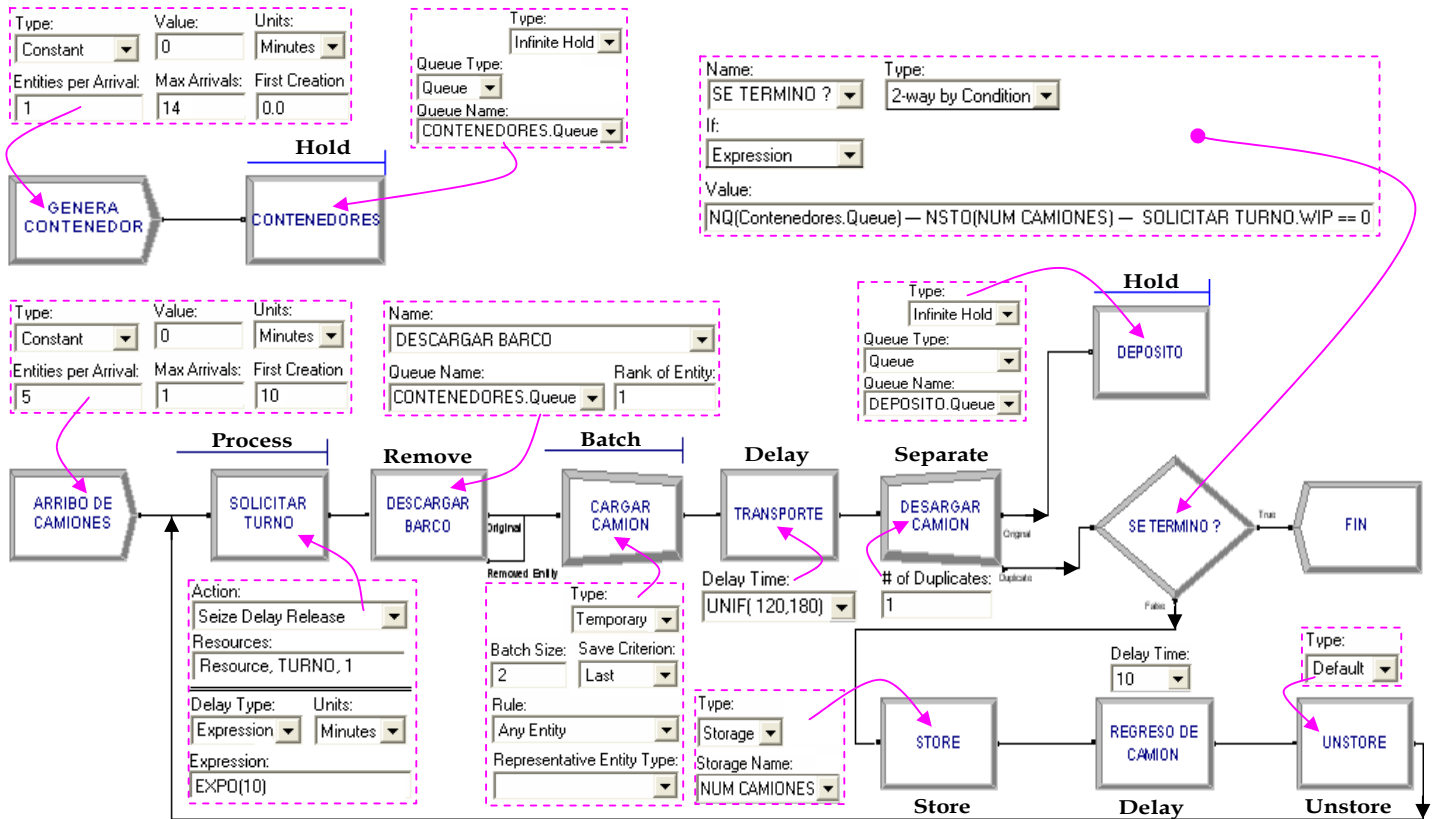
- Tiempo promedio que un contenedor debe esperar para ser trasladado.
- Tiempo total que toma el traslado de todos los contenedores.

**Escenario**

Suponga que se desea generar estadísticas sobre el número de contenedores que traslada un camión (mínimo, promedio, máximo) y el tiempo promedio que cualquier camión tarda desde que recibe un contenedor hasta que regresa al muelle a recoger otro contenedor. Realice los cambios necesarios en modelo original.

<sup>6</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen parcial 2006-2".

### Solución



Run Setup...

Replication Length: Infinite

Time Units: Hours

Hours Per Day: 24

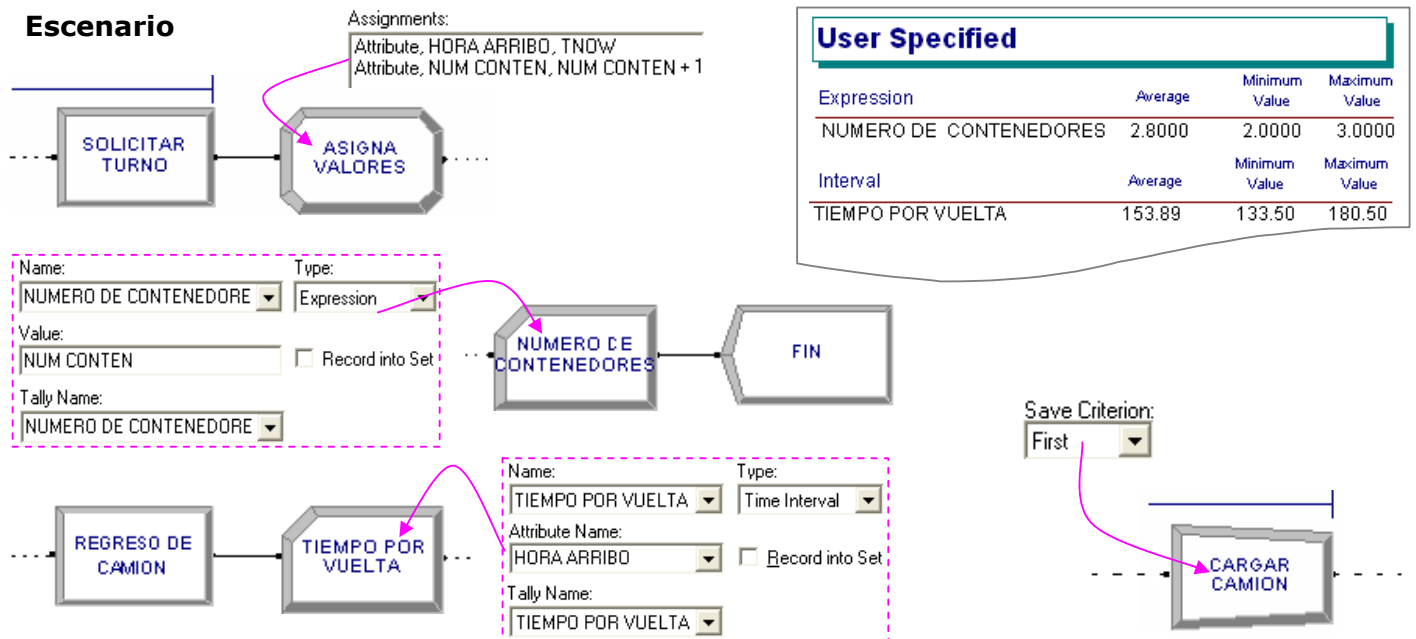
Base Time Units: Minutes

Terminating Condition:

Queue			
Waiting Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
CONTENEDORES.Queue	194.86	13.4615	418.91

Final de la simulación 1 / 1 (580.7422 Minutes) Tuesday, May 05, 2007

### Escenario



User Specified			
Expression	Average	Minimum Value	Maximum Value
NUMERO DE CONTENEDORES	2.8000	2.0000	3.0000
Interval	Average	Minimum Value	Maximum Value
TIEMPO POR VUELTA	153.89	133.50	180.50

## 8

## Caso de estudio

**Atención de clientes en un supermercado**

## Objetivos:

- Uso de los módulos avanzados Hold (Scan for Condition, utilizado como sensor) y Remove.
- Procedimiento para cambio de cola.
- Indicadores de desempeño.

Un supermercado recibe clientes, quienes llegan en intervalos de tiempo que se ajustan a una distribución EXPO(0.5) minutos en las horas de mayor congestión y realizan diversas compras, luego pagan y se retiran. Existen dos cajas disponibles para la atención al público, cada una posee su propia cola. El tiempo de servicio del cajero 1 sigue una distribución UNIF(2, 4) minutos, mientras que el cajero 2 tarda una distribución UNIF(2, 3) minutos. La administración del establecimiento desea focalizar su estudio en investigar el desempeño de las cajas.

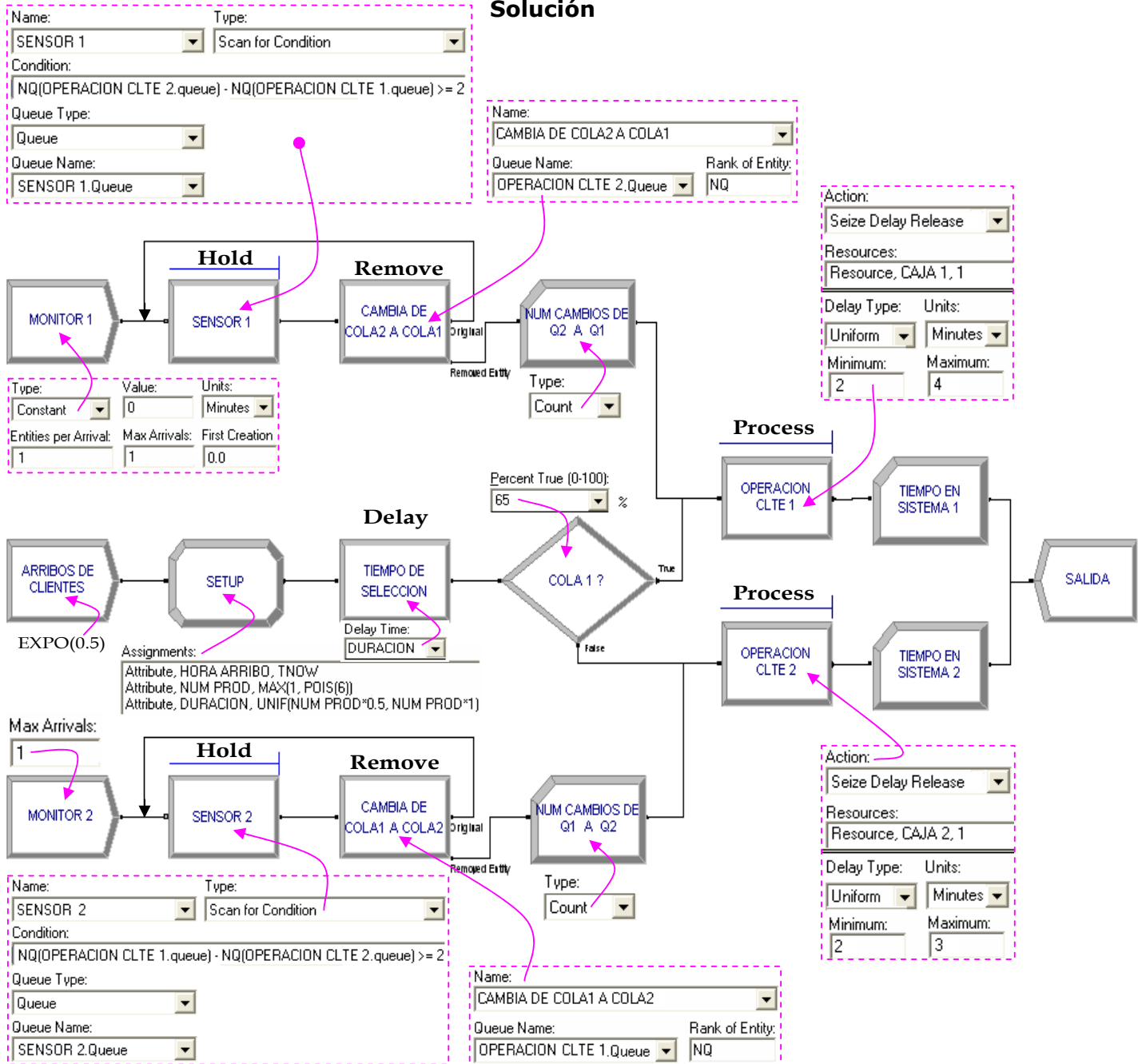


La cantidad de productos por llevar se ajusta a una distribución Poisson con una media de 6 productos (considere que por lo menos lleva un producto); la selección de cada producto demanda al cliente un tiempo equivalente a una UNIF(0.5,1) minutos. Finalmente, el cliente se dirige a pagar sus productos y se ubica en la cola de alguna de las cajas. Se sabe que aproximadamente el 65% de los clientes se dirigen a la caja 1 y el resto a la caja 2. Durante la espera en cola, si observa que existe una diferencia de dos clientes entre una cola y otra, entonces el cliente se cambia de cola.

Se desea simular el sistema durante la hora pico, que es entre las 11.00 y las 13.00 horas. Obtener los siguientes indicadores:

- El número de clientes que optaron por pagar en la caja 1 y en la caja 2.
- El tiempo que sus clientes permanecen en el supermercado. Discrimine por caja.
- El número de clientes que se cambiaron de la cola 1 a la cola 2 y viceversa.

### Solución



Run Setup...

Replication Length: 2 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

#### User Specified

Interval	Average
TIEMPO EN SISTEMA 1	41.4871
TIEMPO EN SISTEMA 2	39.3296
Count	Value
NUM CAMBIOS DE Q1 A Q2	57.0000
NUM CAMBIOS DE Q2 A Q1	17.0000

#### Resource

Total Number Seized	Value
CAJA 1	36.0000
CAJA 2	47.0000

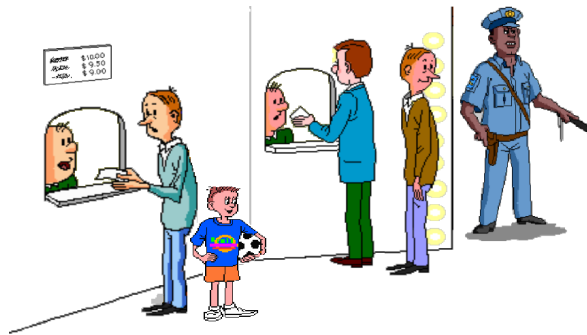
## 9

## Caso de estudio

**Venta de entradas en la Copa América 2007****Objetivos:**

- Modelo de inventarios con Estado Transitorio, cambios dinámicos en la capacidad del Recurso, variables MR y NR.
- Módulo avanzados Hold (Scan for Condition, como SENSOR).
- Selección de cola más corta: variable Process.WIP. Módulo Statistic.

Se desea poner a la venta las entradas para el partido final de la Copa América. Dada la importancia del evento, los organizadores han encargado a los técnicos propuestas sobre la mejora del sistema de venta de las entradas.



Se ha considerado como muestra uno de los locales de venta, allí existen dos ventanillas con colas separadas. Los aficionados que acceden a ellas se dirigen a la ventanilla que tiene menos clientes en cola y si las dos tuvieran la misma cantidad van a la más cercana, que es la ventanilla 1. El tiempo entre arribos de los aficionados corresponde a una EXPO (0.55) minutos. Cada aficionado puede comprar un máximo de 3 entradas. Se estima que el 10% compre una, el 30% dos y el resto tres entradas.

El tiempo de atención en la ventanilla 1 se ajusta a una TRIA(0.65, 1.15, 1.65) minutos, en la ventanilla 2 se atiende más rápido, según una TRIA(0.5, 1, 1.5) minutos. Se dispone de un *stock* por día de atención de 1000 entradas; en caso de que se acabe el *stock* las ventanillas se cierran hasta el próximo día. Si al último cliente no se le pudiera satisfacer su pedido se le venden las entradas que quedan. Se pide:

1. Analizar si la simulación del caso propuesto es de *estado estable* o de *estado transitorio*. Justifique su respuesta.
2. Formule un modelo adecuado al sistema descrito y determine los siguientes indicadores de desempeño:
  - Permanencia promedio en el local.
  - Tiempo total para culminar con la venta de las entradas del día.

**Escenario:**

Considerar que si la cantidad de personas en ambas colas es igual o mayor que 10 se incrementa un empleado que apoye en la Ventanilla 1, con el mismo tiempo de atención. En dicha ventanilla se atenderían dos aficionados a la vez. Si el número en ambas colas disminuye a 5 o menos, entonces se restablece la capacidad original de la Ventanilla 1, es decir 1. Realice los cambios necesarios al modelo original.



### Solución

Variable

Resource

Name	Initial Values
1 LIMITE	1 rows 99999

Name	Type	Capacity
1 STOCK	Fixed Capacity	1000

Statistic

Name	Type	Expression
1 TIEMPO TOTAL	Output	TNOW

Type: Random (Expo)

Expression: 0.55

Units: Minutes

Entities per Arrival: 1

Max Arrivals: LIMITE

First Creation: 0.0

If: Expression

Value:  $MR(STOCK) - NR(STOCK) \geq NUMENTRADAS$

Name: DESCARGAR STOCK

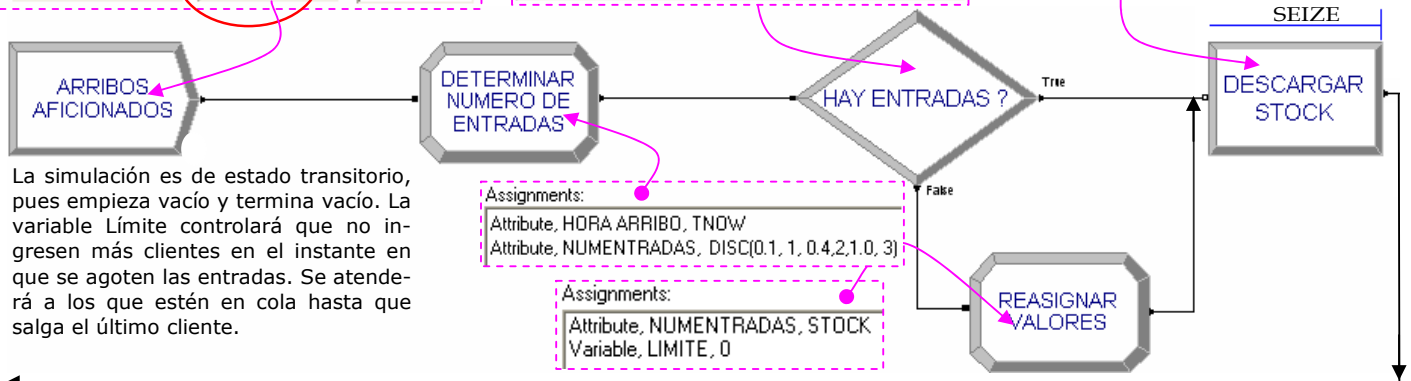
Allocation: Other

Priority: Medium(2)

Resources: Resource, STOCK, NUMENTRADAS,

Queue Type: Queue

Queue Name: DESCARGAR STOCK.Queue



La simulación es de estado transitorio, pues empieza vacío y termina vacío. La variable Límite controlará que no ingresen más clientes en el instante en que se agoten las entradas. Se atenderá a los que estén en cola hasta que salga el último cliente.

Assignments:

Attribute, HORA ARRIBO, TNOW

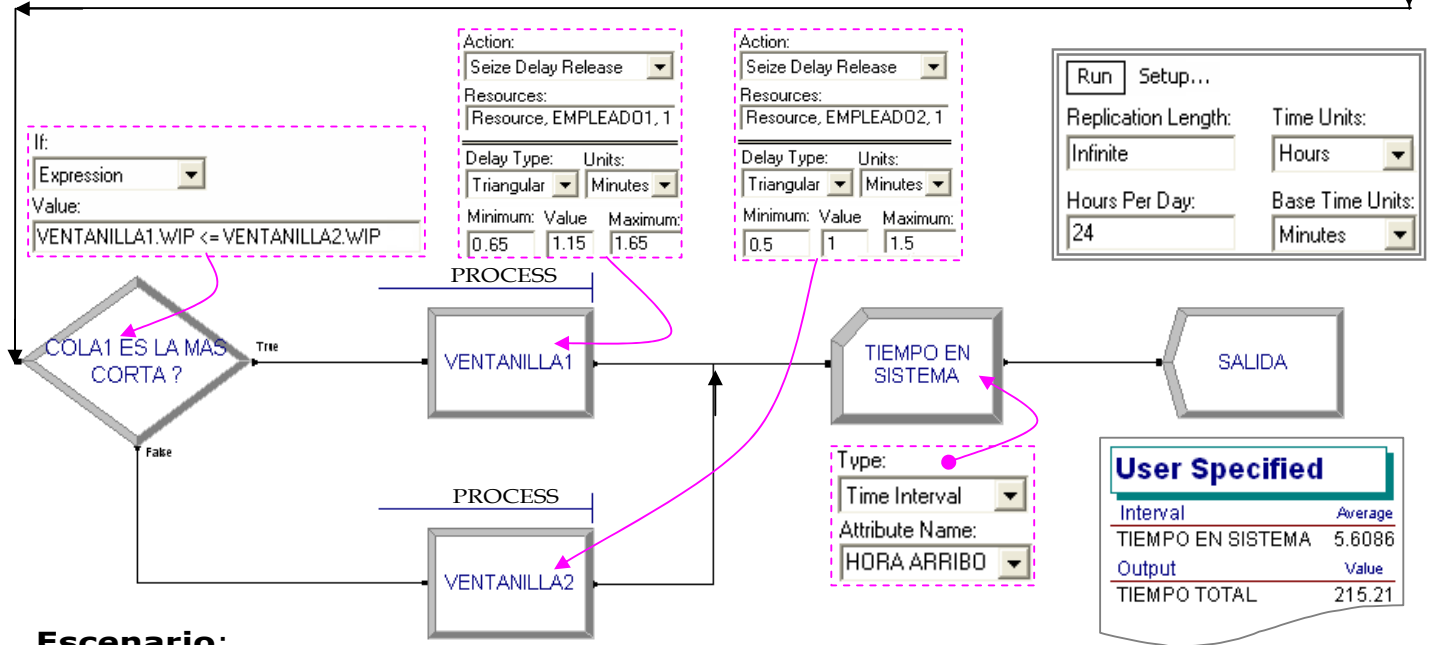
Attribute, NUMENTRADAS, DISC(0.1, 1, 0.4, 2, 1.0, 3)

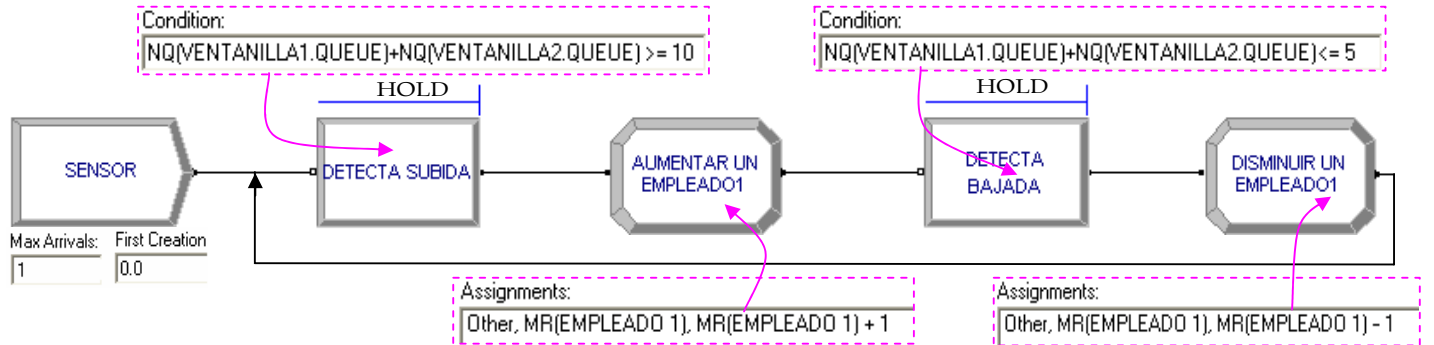
Assignments:

Attribute, NUMENTRADAS, STOCK

Variable, LIMITE, 0



### Escenario:



10

Caso de estudio

## Partido de definición del campeón nacional

Objetivos:

- Módulos avanzados: Match, Batch y Delay.
- Obtención de indicadores con Record (expression) y el módulo Statistic.
- Aplicación práctica del concepto de Valor Esperado.

Universitario de Deportes y Alianza Lima jugarán una nueva edición del clásico del fútbol peruano, esta vez para disputar el título de Campeón Nacional 2008. Los "cremas", campeones del torneo Apertura, dirigidos por "El Tigre" Gareca, y Los Íntimos, campeones del torneo Clausura, dirigidos por "quién sabe quién", jugarán quizás el partido más importante del año.



Se desea formular un modelo de simulación para estimar cuánto tiempo tomará el partido y así presupuestar el costo de alumbrado de la cancha. El partido puede terminar en tiempo regular o en tiempo suplementario, o en definición por penales; en este último caso, el partido se definirá después de cinco penales por equipo. Se dispone de los siguientes datos:

Demora en salir al terreno de juego: UNIF (3, 6) min.

Sorteo de cancha y dejar listo a los equipos: UNIF (4, 6) min.

Períodos regulares de juego: 02

Duración primer tiempo: UNIF (45, 48) min.

Duración segundo tiempo: UNIF (46, 50) min.

Período de descanso entre tiempos: UNIF (15, 20) min.

Demora de suplementario: UNIF (30, 33) min.

Preparación de ronda de penales: UNIF (8, 10) min.

Cambio de arquero más disparo de penal: UNIF (1, 2) min. por penal

Árbitro: Réferi FIFA Silvia Reyes.

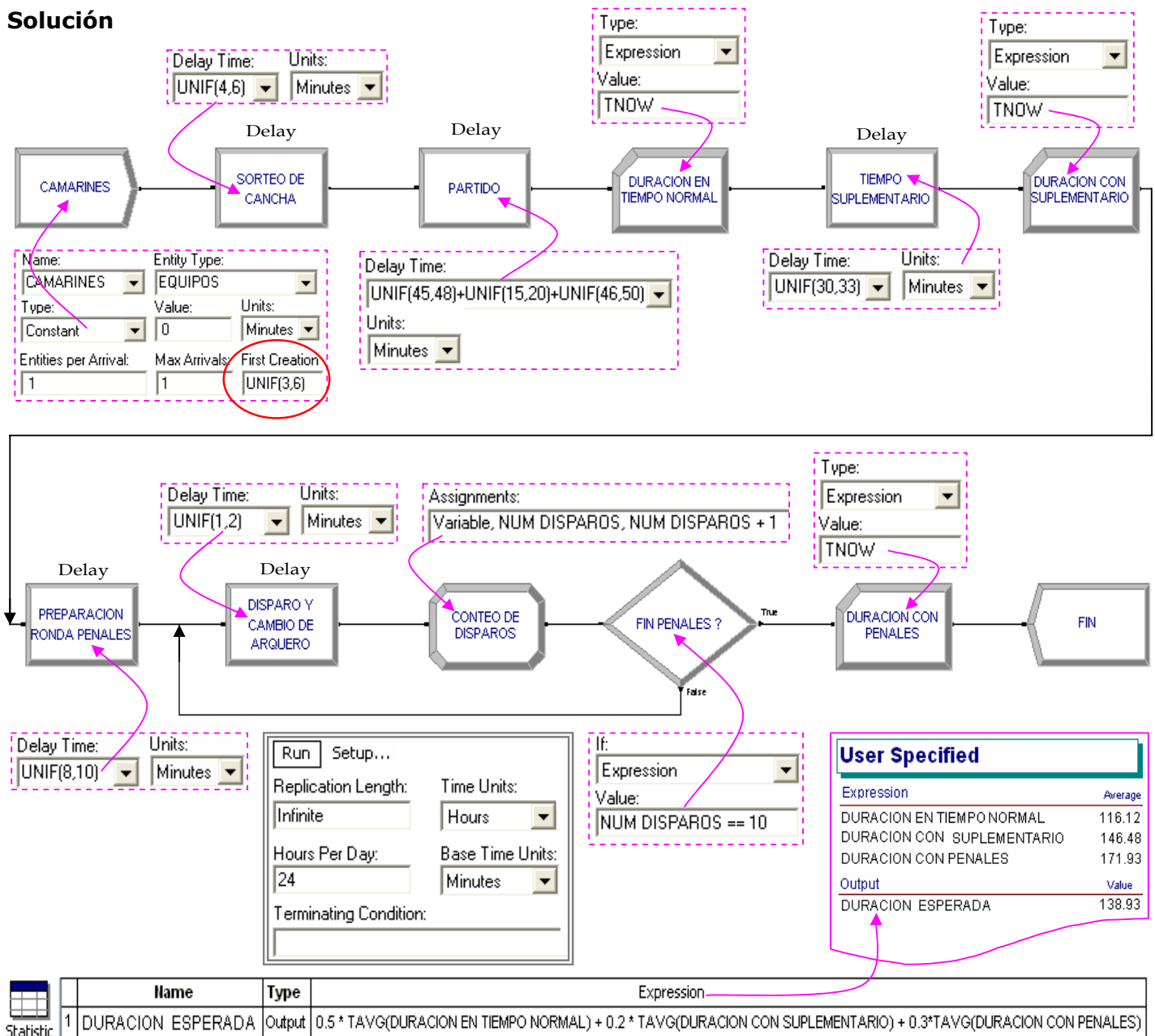
Se da aviso a ambos equipos para que salgan juntos a la cancha e inmediatamente empieza el partido, y termina cuando el árbitro hace sonar su silbato señalando el centro del campo.

1. Formule un modelo de simulación que permita determinar en cuántos minutos terminaría el partido en tiempo regular, en tiempo suplementario y con penales.
2. Simule el modelo formulado y presente los siguientes indicadores de desempeño:
  - Duración del encuentro en cada una de las tres situaciones.
  - Determine el tiempo esperado del encuentro, si existe un 50% de probabilidad de que el partido termine en tiempo regular, 20% en tiempo suplementario y 30% en ronda de penales.

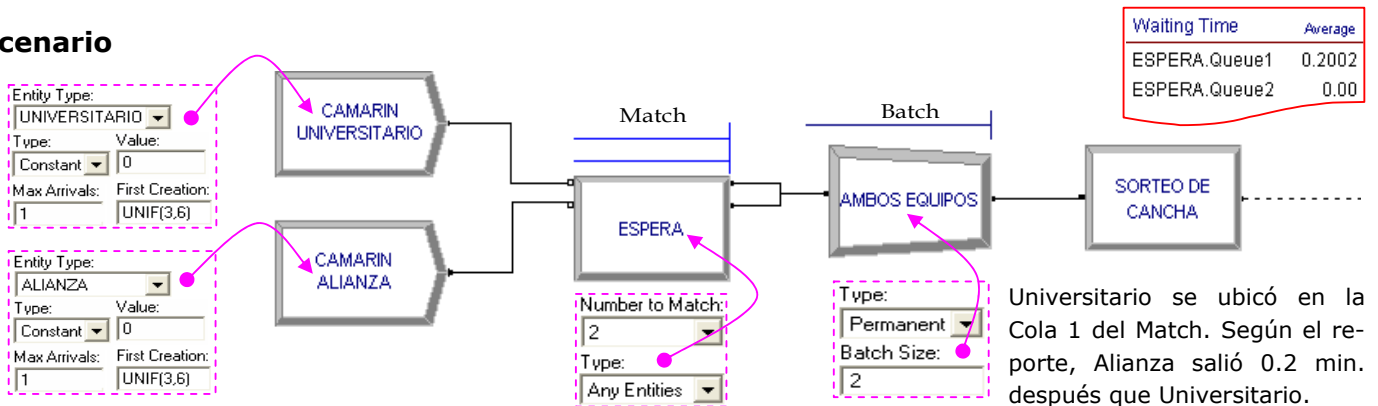
### Escenario

Suponga que al salir a la cancha ambos equipos tienen demoras independientes de acuerdo a una UNIF(3,6) min. Si un equipo sale antes, tiene que esperar al otro. ¿Qué equipo salió primero y cuánto tiempo esperó por el otro equipo?

### Solución



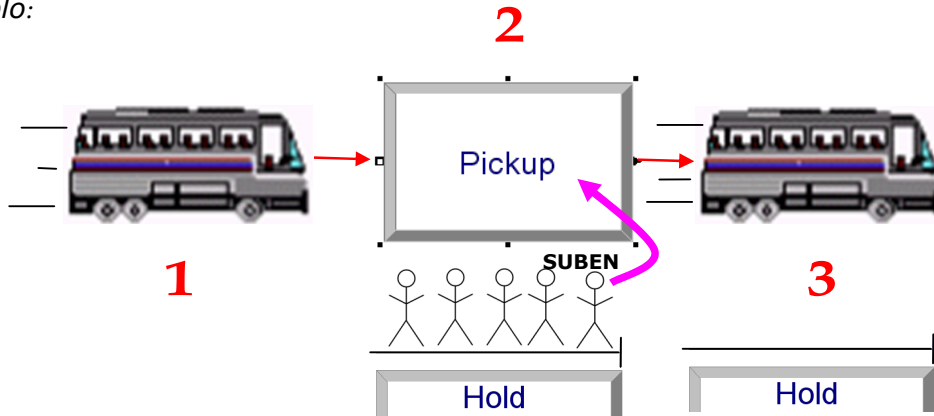
### Escenario



## 6. MÓDULO PICKUP (entidad grupo)

Este módulo extrae o remueve un número consecutivo de entidades de una determinada cola, empezando desde una posición específica. Las entidades removidas son agregadas al final de las entidades contenidas en la Entidad Grupo (aquella formada en un módulo Batch o en un módulo Pickup) que ingresó al módulo Pickup.

Ejemplo:



Pickup	
Name:	Quantity:
SUBEN PASAJEROS	NQ ( PARADERO.Queue )
Queue Name:	Starting Rank:
PARADERO.Queue	1

La Entidad Grupo está representada por el Ómnibus; la cola está representada por el Paradero; los miembros de la Entidad Grupo son los Pasajeros. Recoge a todos (NQ).

Ejemplo:

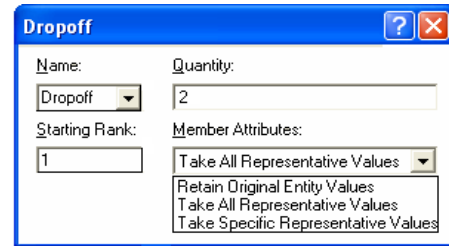
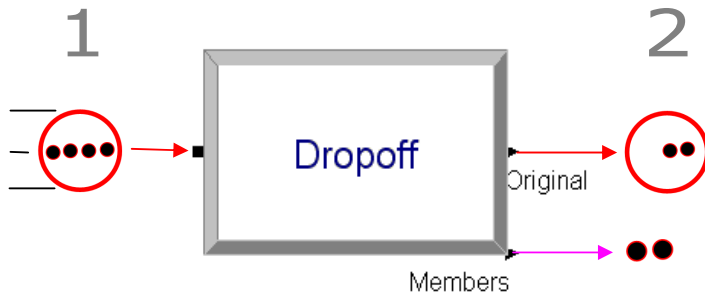


Pickup	
Name:	Quantity:
TOMA PRODUCTO	1
Queue Name:	Starting Rank:
ALMACEN.Queue	J

En el ejemplo, la carretilla es la Entidad Grupo y al ingresar esta al módulo Pickup recoge de la cola "Almacén" una sola entidad (producto), cuya ubicación en la cola se guarda en la variable **J**, esta búsqueda la realizó previamente el módulo Search.

## 7. MÓDULO DROPOFF (entidad grupo)

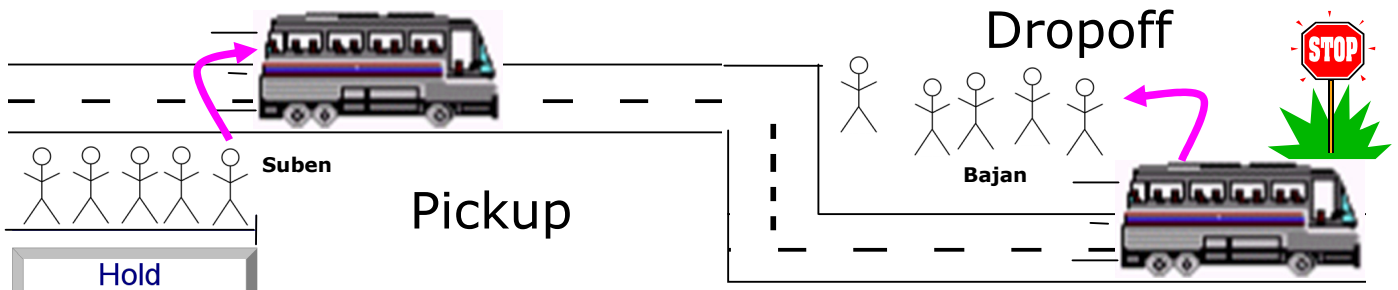
Este módulo retira un determinado número de entidades "miembro" de una Entidad Grupo (formada por un módulo Batch o un módulo Pickup). Si es Batch debe definirse como Temporal; de lo contrario, el Dropoff no tendrá ningún efecto.



- Definir el número de entidades que serán removidas del grupo.
- Definir a partir de qué posición se retiran las entidades.
- Definir el criterio de asignación de los atributos de las entidades salientes.

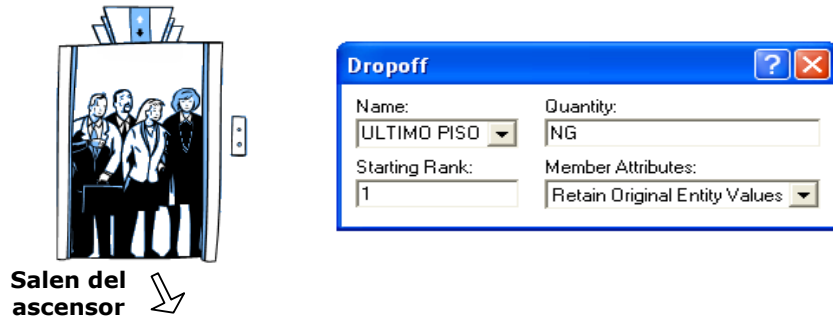
Mientras que el módulo Separate desagrega o separa a todas las entidades contenidas en el grupo, el módulo Dropoff selecciona un número de miembros de la Entidad Grupo para que sean removidos o retirados de esta. Luego, la Entidad Grupo continúa su recorrido en la red, con las entidades remanentes en el grupo. Posteriormente, la entidad grupo será separada por el módulo Separate, porque se definió como temporal.

*Ejemplo:*



En el ejemplo, por medio del módulo Pickup la entidad grupo que está representada por el ómnibus, en primera instancia recoge a entidades o pasajeros que esperan en un paradero (Hold). En segunda instancia, mediante el módulo Dropoff la entidad grupo deja pasajeros en otro paradero de la ruta.

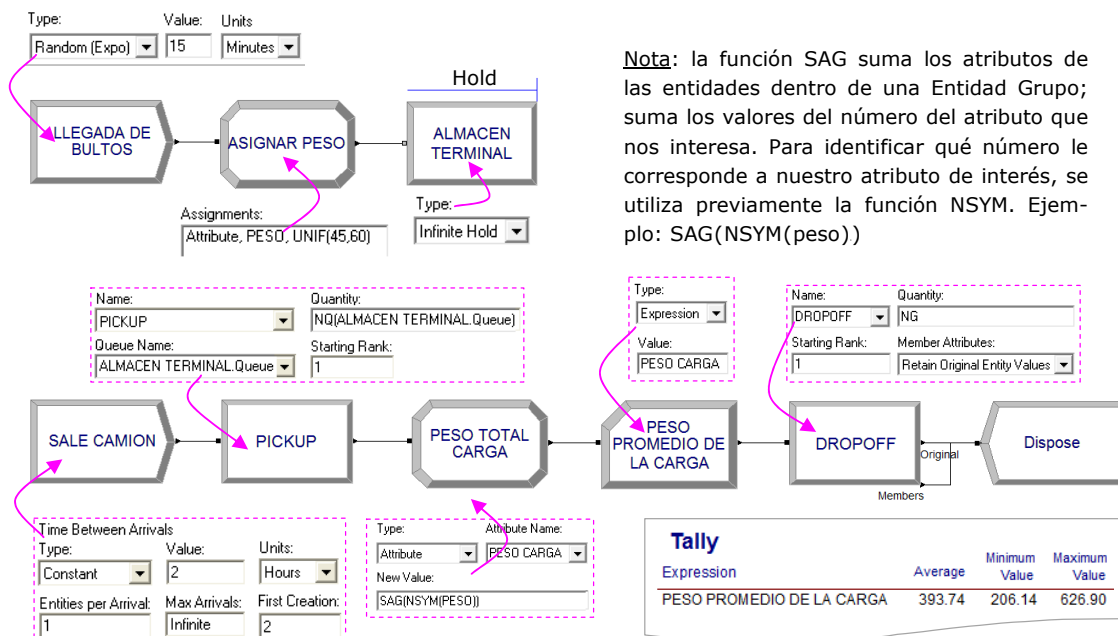
Ejemplo:



El ejemplo ilustra la salida de todas las personas de un ascensor; la entidad grupo es el ascensor. La variable NG evalúa el tamaño de la Entidad Grupo que ingresa al Dropoff; es decir, el efecto que se busca es retirar a "todos" los miembros del grupo. En cada piso, el ingreso de las personas al ascensor lo realiza el módulo Pickup.

Ilustración:

Bultos de peso variable son traídos al terminal para que sean transportados por camiones. Está programada la salida de un camión cada dos horas, el cual recogerá a todos los bultos que hayan en ese momento. Se desea simular el sistema descrito durante 24 horas continuas y medir la carga promedio por camión.



**Nota:** la función SAG suma los atributos de las entidades dentro de una Entidad Grupo; suma los valores del número del atributo que nos interesa. Para identificar qué número le corresponde a nuestro atributo de interés, se utiliza previamente la función NSYM. Ejemplo: SAG(NSYM(peso))

Tomar en cuenta lo siguiente:

- Las entidades que se integraron o se agregaron a Entidades Grupo utilizando los módulos Pickup o Batch pueden ser removidas e individualizadas nuevamente, utilizando los módulos Dropoff o Separate.
- Si la entidad grupo fue definida en el módulo Batch como Temporal, entonces no debe salir por un Dispose sin antes haber separado completamente a sus entidades miembros.

11

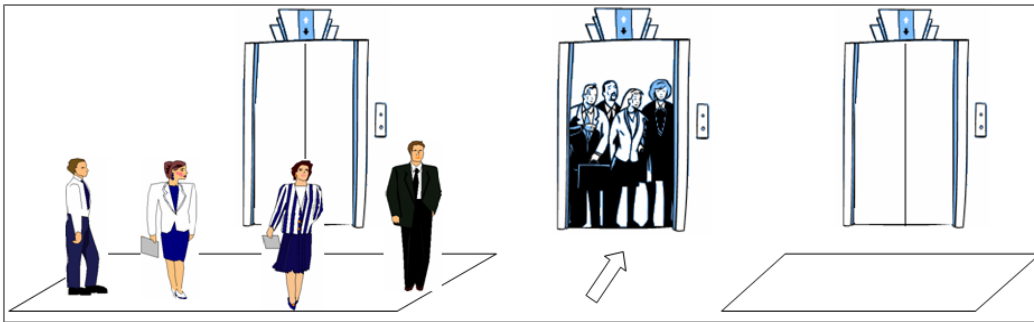
Caso de estudio

**El ascensor<sup>7</sup>**

Objetivos:

- Aplicación práctica de los módulos avanzados: Pickup, DropOff, Store, Unstore y Hold
- Indicadores de desempeño del sistema.

En un edificio para oficinas de cuatro pisos, funciona un ascensor que transporta personas para subir o bajar; los usuarios del ascensor son el personal y los clientes de las oficinas del edificio. Se ha realizado un estudio y se ha determinado que las personas llegan a la zona de espera por el ascensor, con un intervalo de tiempo de una EXPO(1) minuto.



Por cuestiones de costos operativos, para hacer uso del ascensor este debe estar lleno, es decir, debe haber 8 personas, que es su capacidad. Si a la llegada del ascensor el grupo no está completo entonces el ascensor permanece en el primer piso hasta que se complete. Se estima que en el segundo piso bajará 1 persona, en el tercer piso bajarán 4 personas y en el cuarto piso bajarán 3 personas.

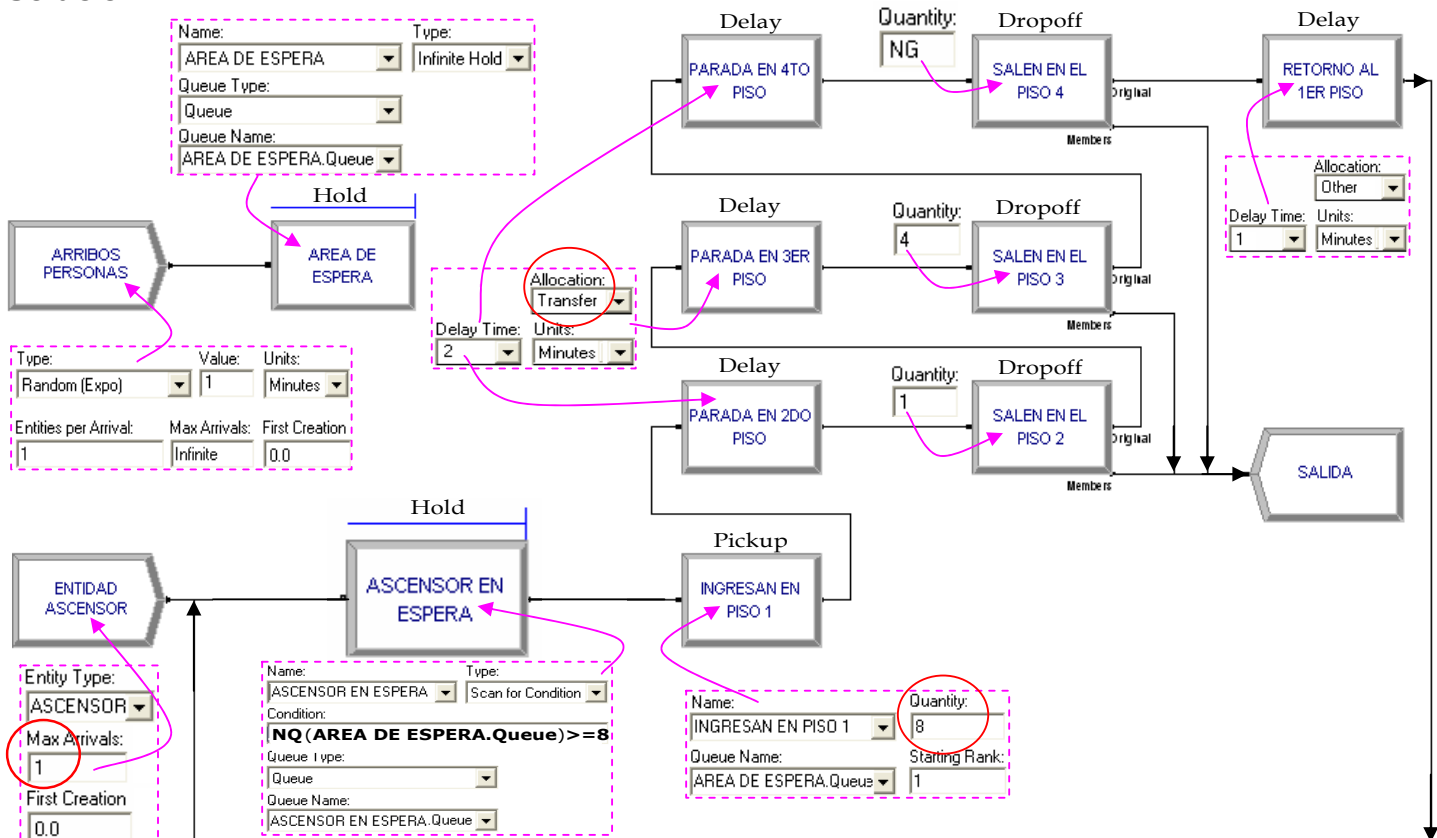
Se desea investigar sobre el desempeño del ascensor solo cuando sube llevando personas. El tiempo que el ascensor demora en subir a un piso y dejar personas es de 2 minutos; bajar del cuarto piso directamente al primero tarda 1 minuto.

Formule un modelo adecuado a la situación descrita y simúlelo durante una jornada de 8 horas. Se pide:

1. ¿Cuál fue el máximo número de personas que estuvo en el área de espera?  
¿Cuántos minutos de tolerancia se deberían considerar, antes de que una persona opte por subir por las escaleras.
2. ¿Cuánto tiempo en promedio demora una persona en viajar en el ascensor?
3. Se desea medir el número promedio de personas, desde que ingresaron hasta que salieron del ascensor, en su piso.
4. Realice una comparación entre los indicadores WIP (Work in Process) del reporte y los obtenidos mediante el Storage. Saque sus conclusiones.
5. Si se tuviera la posibilidad de incrementar el número de ascensores, sobre todo para satisfacer la demanda en las horas de mayor congestión, ¿cuántos más recomendaría? Sustente su respuesta en base a los indicadores y a su criterio.

<sup>7</sup> Enunciado tomado de VENEROS MANRIQUE, H.

### Solución



Entity Type		Name	
Entity	1 PERSONA	Queue	1 AREA DE ESPERA.Queue
	2 ASCENSOR		2 ASCENSOR EN ESPERA.Queue

Queue			
	Average	Minimum Value	Maximum Value
AREA DE ESPERA.Queue	4.6355	0.00	14.0000
AREA DE ESPERA.Queue	4.8495	0.00	16.0892

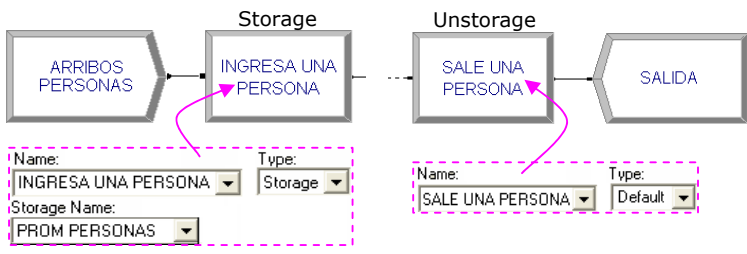
Run Setup...

Replication Length: 8 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

- Tamaño máximo de cola:  $\rightarrow$
- Tiempo promedio en transporte:  $\rightarrow$
- Número promedio de personas:  $\rightarrow$

Entity			
	Average	Minimum Value	Maximum Value
PERSONA	4.4944	2.0000	6.0000



	Name	Type	Expression
Statistic	1 NUM PROM PERSONAS	Time-Persistent	NSTO(PROM PERSONAS)

User Specified			
	Average	Minimum Value	Maximum Value
NUM PROM PERSONAS	8.8849	0.00	17.0000

**4. Storage**

User Specified			
	Average	Minimum Value	Maximum Value
NUM PROM PERSONAS	8.8849	0.00	17.0000

**Work in process**

Entity			
	Average	Minimum Value	Maximum Value
PERSONA	8.8849	0.00	17.0000

Se llega al mismo resultado. El concepto es el mismo para ambos; el Storage mide en cualquier segmento de la red. El WIP es automático y mide en la red principal.

- Adicionar un Ascensor más. El indicador utilizado fue el Valor Máximo del Storage:  $17/8 = 2$



12

Caso de estudio

**Atención en consultorio médico<sup>8</sup>**

Objetivos:

- Uso de los módulos avanzados Pickup, Dropoff, Hold, Remove, Signal.
- Uso de la variable MR(Resource).
- Uso del módulo de datos Statistic.
- Indicadores de desempeño del sistema.

Los pacientes llegan a la sala de espera de un consultorio e inmediatamente deben registrarse con la asistente, quien llamará al paciente por orden de llegada (FIFO) para que sea atendido por el doctor. Una vez atendido el paciente, este se retira del consultorio y el doctor termina de llenar la historia clínica del paciente; luego, por medio de un intercomunicador, solicita a su asistente que haga pasar al siguiente paciente. Si no hay pacientes el doctor debe esperar hasta que llegue un nuevo paciente.



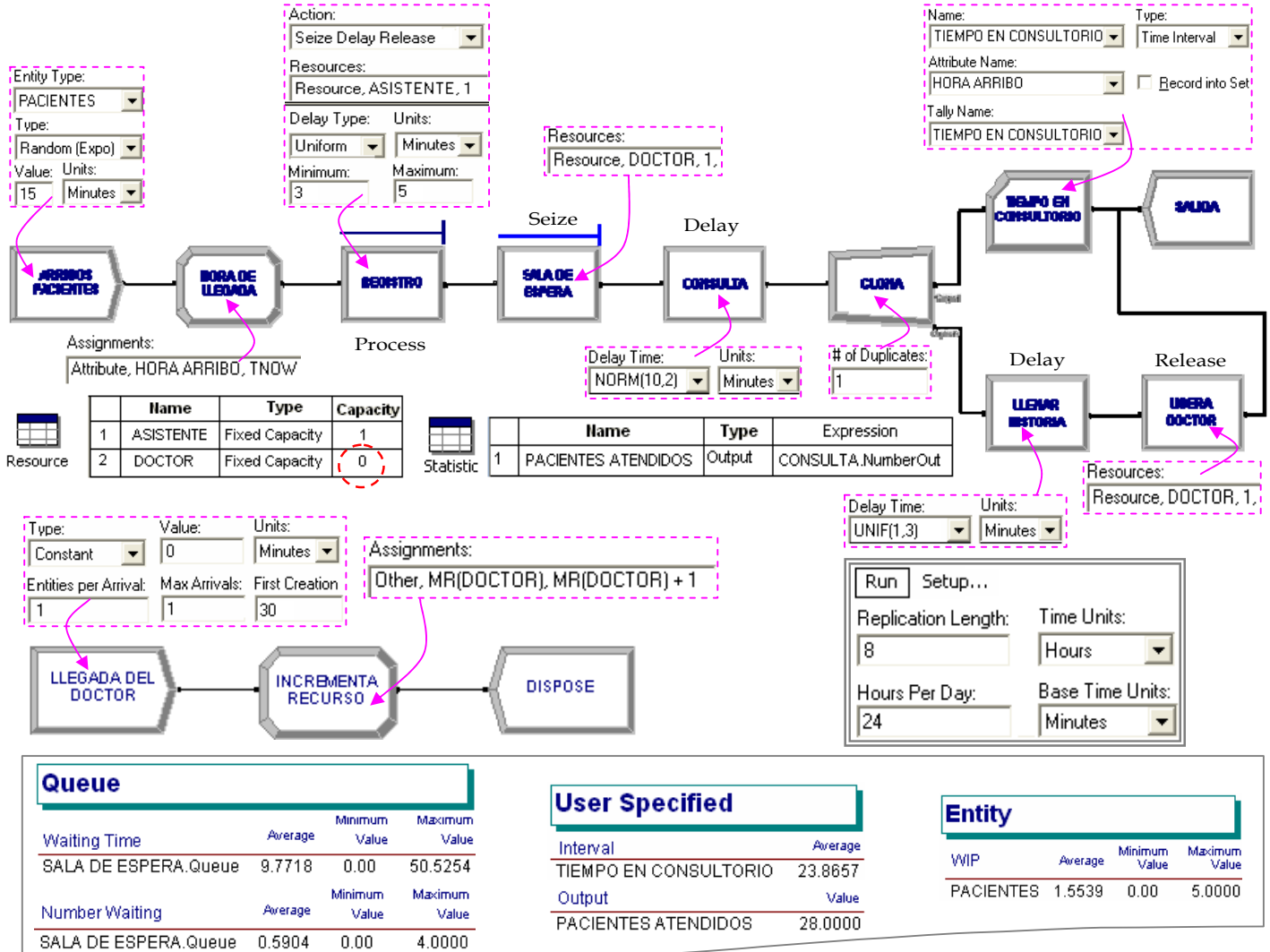
Los pacientes llegan con un intervalo de una distribución Exponencial con una media de 15 minutos. El tiempo de registro se estima en una distribución Uniforme entre 3 y 5 minutos y el tiempo de la consulta con el doctor se estima en una distribución Normal con una media igual a 10 minutos y una desviación estándar de 2 minutos. Cuando el paciente se retira, el doctor tarda un tiempo uniformemente distribuido entre 1 y 3 minutos en concluir la historia clínica. La atención del doctor empieza después de 30 minutos de la llegada del primer paciente.

Se pide:

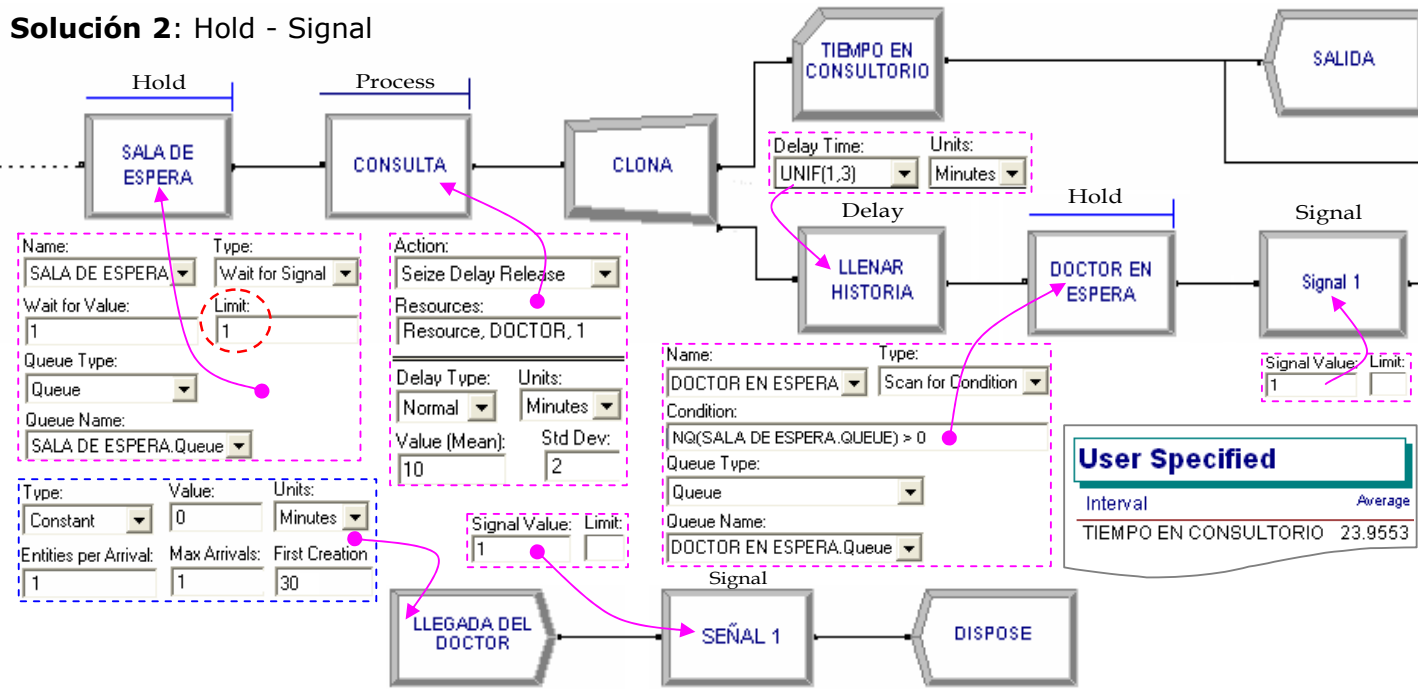
1. Formular un modelo adecuado a la situación planteada. Simular por 8 horas.
2. Tiempo de permanencia en el consultorio y cuántos pacientes se atendieron.
3. Tiempo promedio de espera del paciente para ser atendido.
4. ¿Cuál es el máximo número de entidades en proceso y cuál fue el máximo número de pacientes esperando por su consulta?

<sup>8</sup> Ibídem.

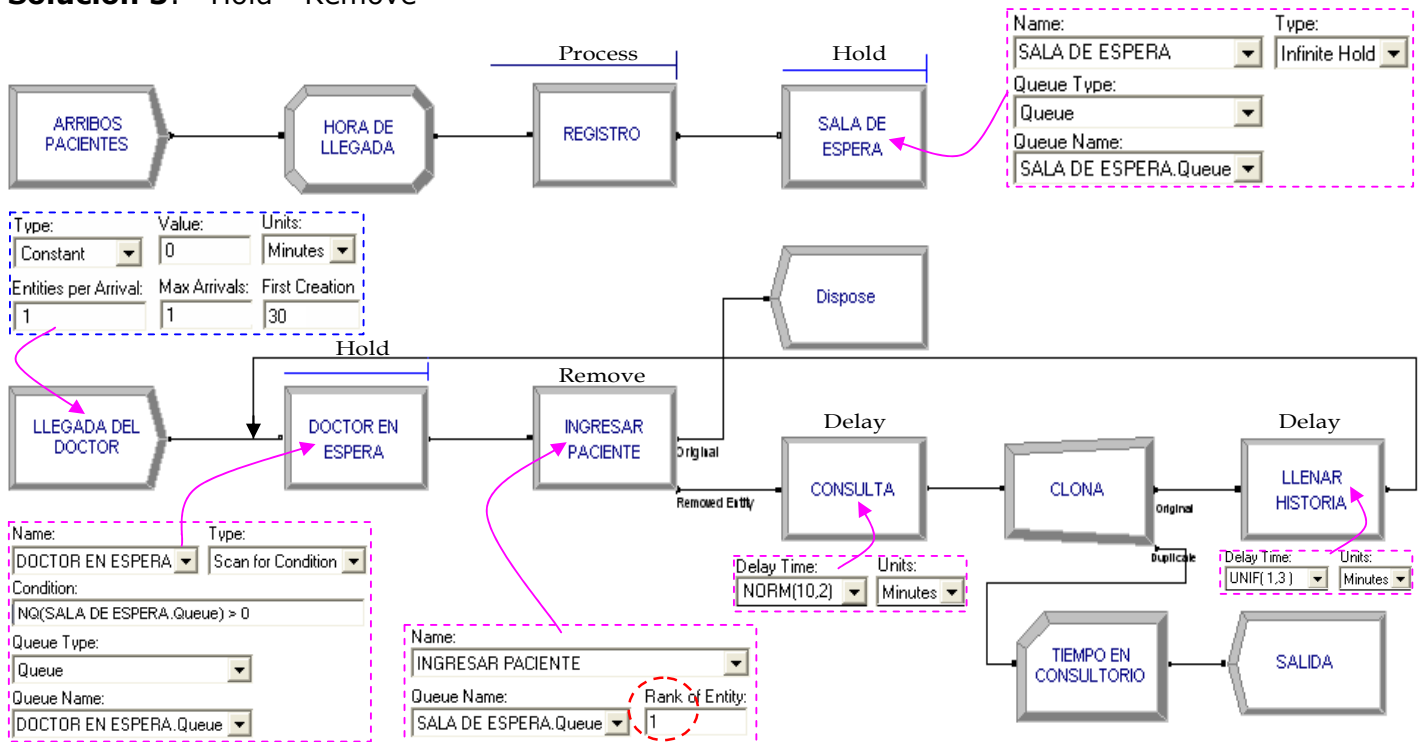
### Solución 1: Seize - Delay - Release



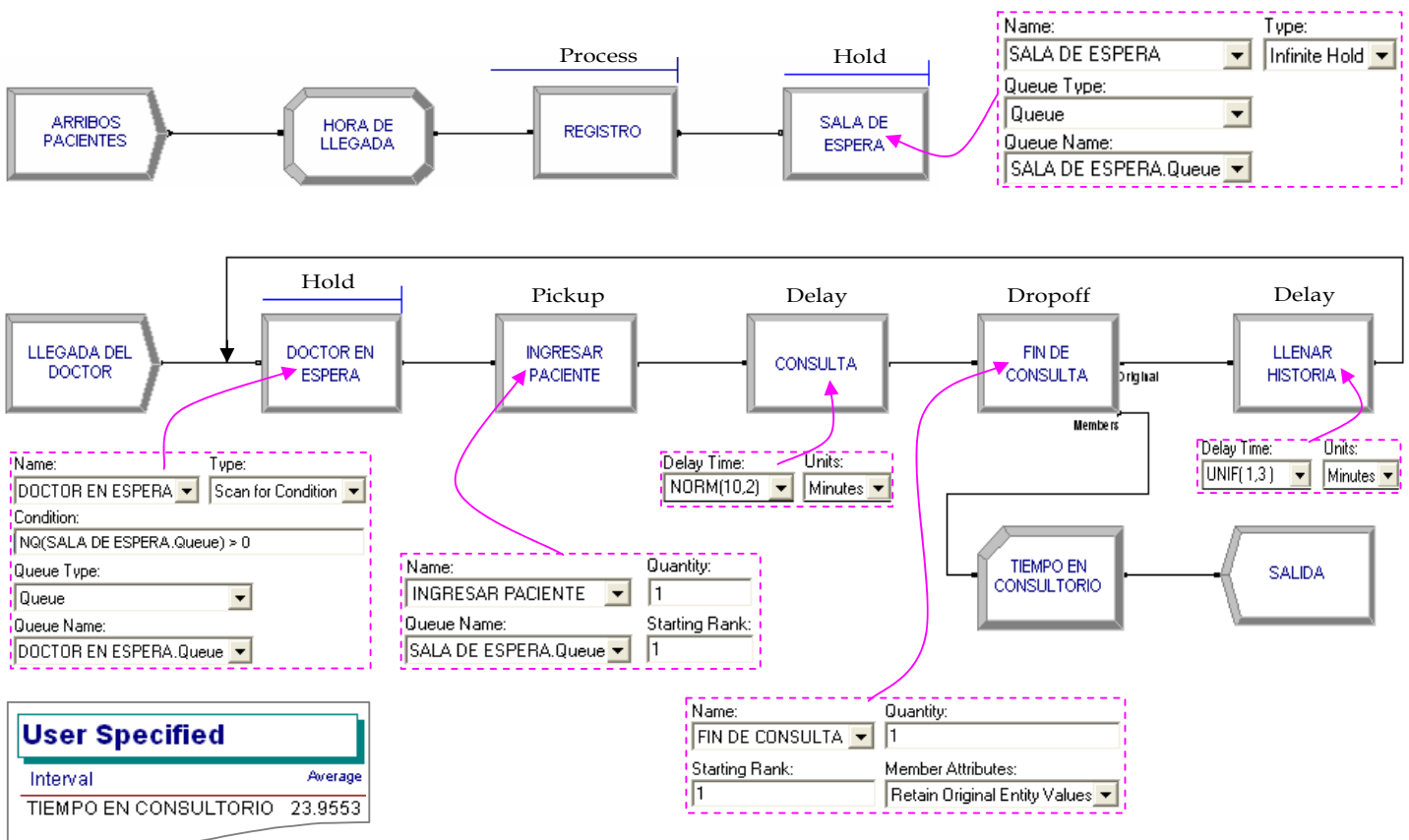
### Solución 2: Hold - Signal



### Solución 3: Hold - Remove



### Solución 4: Pickup - Dropoff





## Caso de estudio

**Operaciones en una manufacturera<sup>9</sup>**

## Objetivos:

- Manejo Avanzado de Conjuntos Advanced Set (Queue Type: Set).
- Aplicación práctica de los Módulos de Datos: Expression (Matriz).
- Interpretación del reporte de resultados.

El sistema a ser modelado consiste en el mantenimiento de equipos de regular tamaño. Cuando llega un equipo, se le aplica un primer proceso que consiste en la división de este en tres partes y cada parte debe ser procesada de acuerdo a una secuencia de operaciones, donde cada operación se realiza en un área de trabajo.

Existen 4 áreas y en cada área se dispone de 2 máquinas. En las tablas siguientes se muestra la secuencia de operaciones y los tiempos de actividad en cada una de las áreas, y que corresponden a una distribución de probabilidad triangular:

	<b>Secuencia de operaciones</b>						
<b>Parte 1</b>	Área 1	→	Área 2	→	Área 3	→	Área 4
<b>Parte 2</b>	Área 1	→	Área 2	→	Área 4	→	Área 3
<b>Parte 3</b>	Área 2	→	Área 1	→	Área 3		

	<b>Tiempos de operación (minutos)</b>			
	<b>Área 1</b>	<b>Área 2</b>	<b>Área 3</b>	<b>Área 4</b>
<b>Parte 1</b>	4 , 6 , 8	6 , 9 , 12	12 , 15 , 20	10 , 14 , 19
<b>Parte 2</b>	9 , 13 , 18	3 , 7 10	20 , 25 , 28	12 , 18 , 22
<b>Parte 3</b>	5 , 10 , 14	6 , 8 , 12	14 , 19 , 25	

Al final de la secuencia las partes se ensamblan para armar nuevamente el equipo. Tenga presente que el equipo debe ensamblarse con sus partes originales correspondientes.

Los intervalos de llegada de los equipos siguen una distribución exponencial con una media de 30 minutos. La operación para separar en partes el equipo o para ensamblar las partes del equipo la realiza cualquiera de los 2 operarios auxiliares de que se dispone; individualmente, cada auxiliar tarda un tiempo que se ajusta a una normal con una media de 20 minutos y una desviación estándar de 5 minutos por operación. El tiempo que se demora cada parte separada, para ser enviada al área de mantenimiento, es una uniforme entre 3 y 5 minutos.

1. Formule un modelo de simulación adecuado a la situación descrita y simúlelo durante 6 días (24 hrs/día).
2. Obtenga estadísticas sobre Tiempo de Ciclo General (Plazo promedio de entrega).
3. Obtenga estadísticas sobre Tiempo Promedio de Mantenimiento por cada una de las partes.

<sup>9</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen parcial de rezagados 2008-1".

### Solución



	Name	Rows	Columns	Expression Values
1	SECUENCIA	3	5	11 rows
1	TIEMPO	3	4	11 rows



	Name	Type	Capacity
1	MAQA1	Fixed Capacity	2
2	MAQA2	Fixed Capacity	2
3	MAQA3	Fixed Capacity	2
4	MAQA4	Fixed Capacity	2
5	AUXILIAR	Fixed Capacity	2



	Name	Type	Members
1	MAQUINA	Resource	4 rows
2	TIEMPO PROM MANT	Tally	3 rows

	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	0.0
2	1	2	4	3	0.0
3	2	1	3	0.0	0.0

	1	2	3	4
1	TRIA(4,6,8)	TRIA(6,9,12)	TRIA(12,15,20)	TRIA(10,14,19)
2	TRIA(9,13,18)	TRIA(3,7,10)	TRIA(20,25,28)	TRIA(12,18,22)
3	TRIA(5,10,14)	TRIA(6,8,12)	TRIA(14,19,25)	0.0



	Name	Set Type	Members
1	COLA	Queue	4 rows

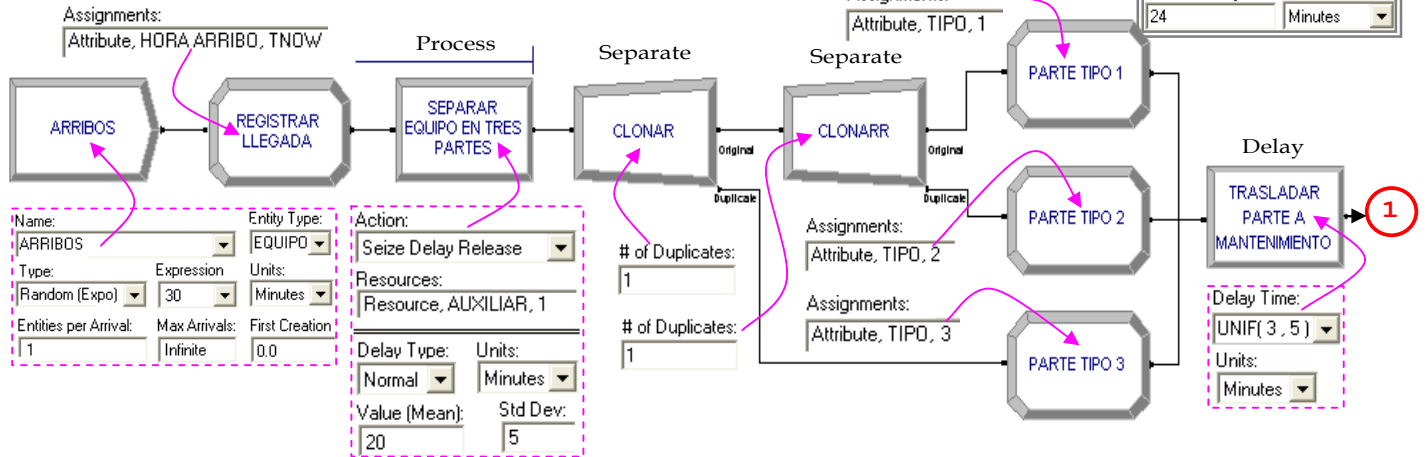
	Members	Queue Name
1	COLA AREA1	
2	COLA AREA2	
3	COLA AREA3	
4	COLA AREA4	

Run Setup...

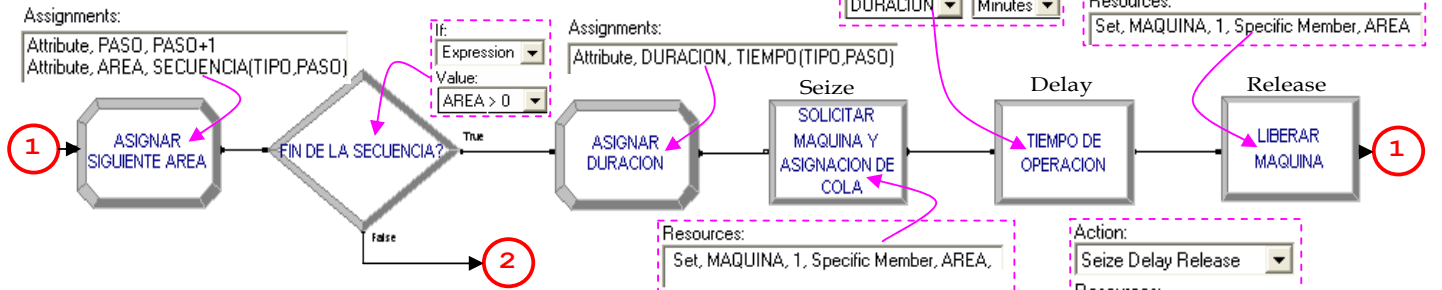
Replication Length: Time Units: 6 Days

Hours Per Day: Base Time Units: 24 Minutes

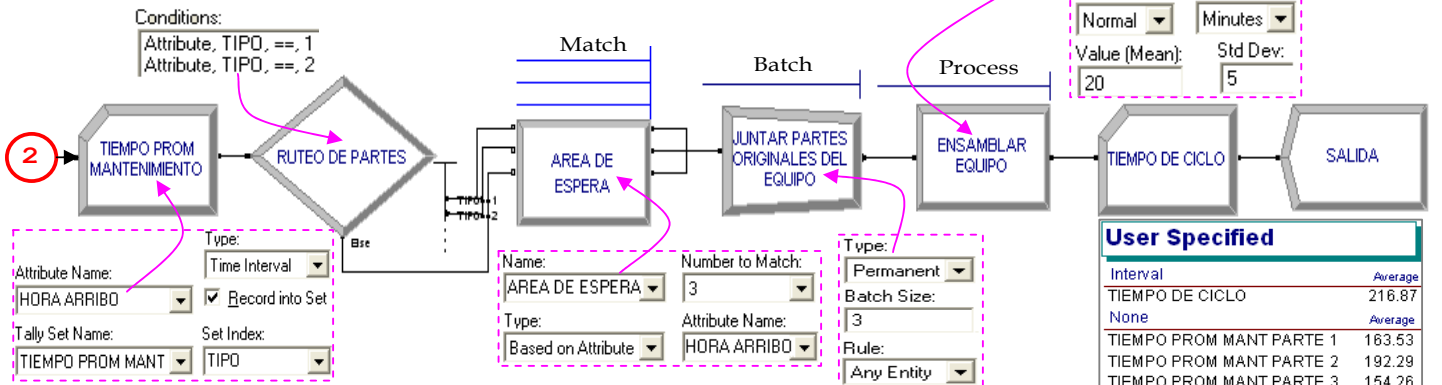
### Desarmar equipo:



### Mantenimiento de partes



### Armar equipo



## 14

## Caso de estudio

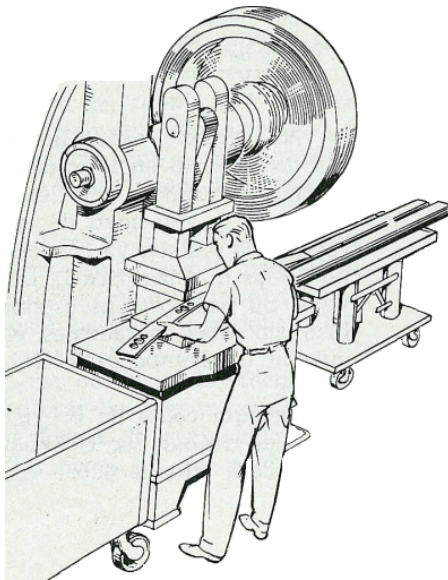
**Uso de recurso en secuencia de operaciones<sup>10</sup>**

## Objetivos:

Uso del módulo de datos (avanzado) Statistic para generar Estados de uso de un Recurso, definidos por el mismo usuario y que están asociados a los Estados del sistema (por defecto: Busy/Idle). Es decir, desagregar o subdividir los estados Busy y/o Idle en nuevos estados.

Una empresa produce muebles de madera para oficina. Uno de sus procesos consiste en producir una pieza base, que representa la columna vertebral del mueble, para ello se requiere de bloques de madera de ciertas dimensiones y de la participación de un operario. El proceso consiste en tres operaciones: Setup→Trabajo→Inspección, que requieren de la participación del operario asignado al proceso, es decir que el mismo operario realiza cada una de las tres operaciones.

El tiempo entre arribos de los bloques de madera es una EXPO(7) minutos y automáticamente son ingresadas a una cámara de secado, con capacidad suficiente para atender la demanda y deben permanecer exactamente 80 minutos, tiempo suficiente para que el bloque salga con los límites de humedad permisibles. Luego el bloque seguirá la siguiente secuencia de operaciones:



Operación	Duración (minutos)
Setup	Expo(2)
Trabajo	Norm(10, 4)
Inspección	Unif(2, 5)

Finalmente, el bloque es llevado a la siguiente sección de la planta de producción.

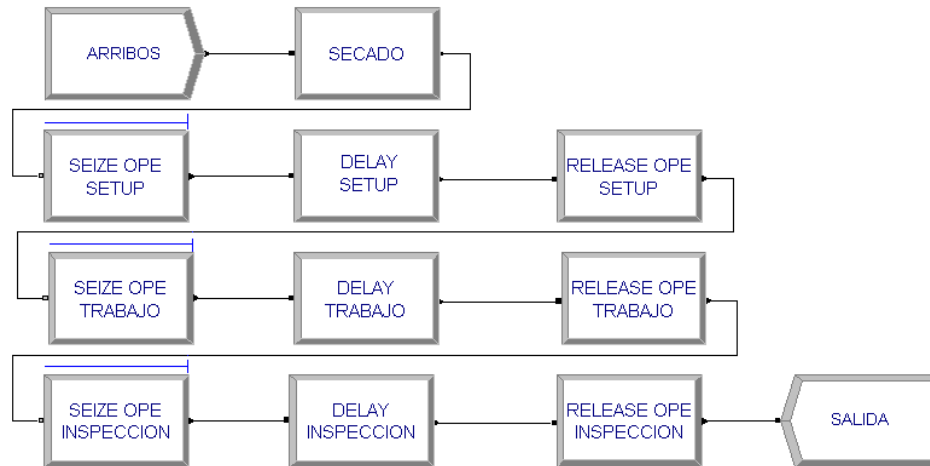
Se pide:

1. Modele el sistema descrito durante 1440 minutos y obtenga estadísticas sobre la utilización del recurso operario; discrimine según la categoría: Busy/Idle (*report frequency*).
2. Determine en forma detallada la composición porcentual del estado ocupado (Busy) del operario, respecto a su utilización en cada operación del proceso.

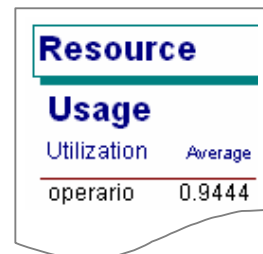
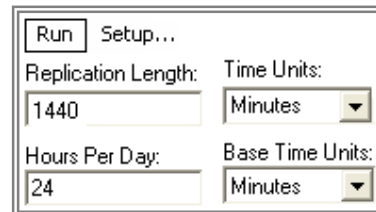
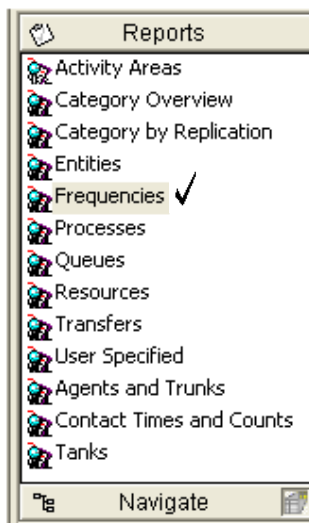
<sup>10</sup> Enunciado tomado de VENEROS MANRIQUE, H. Op. cit.

## Solución

### 1. Modelo:

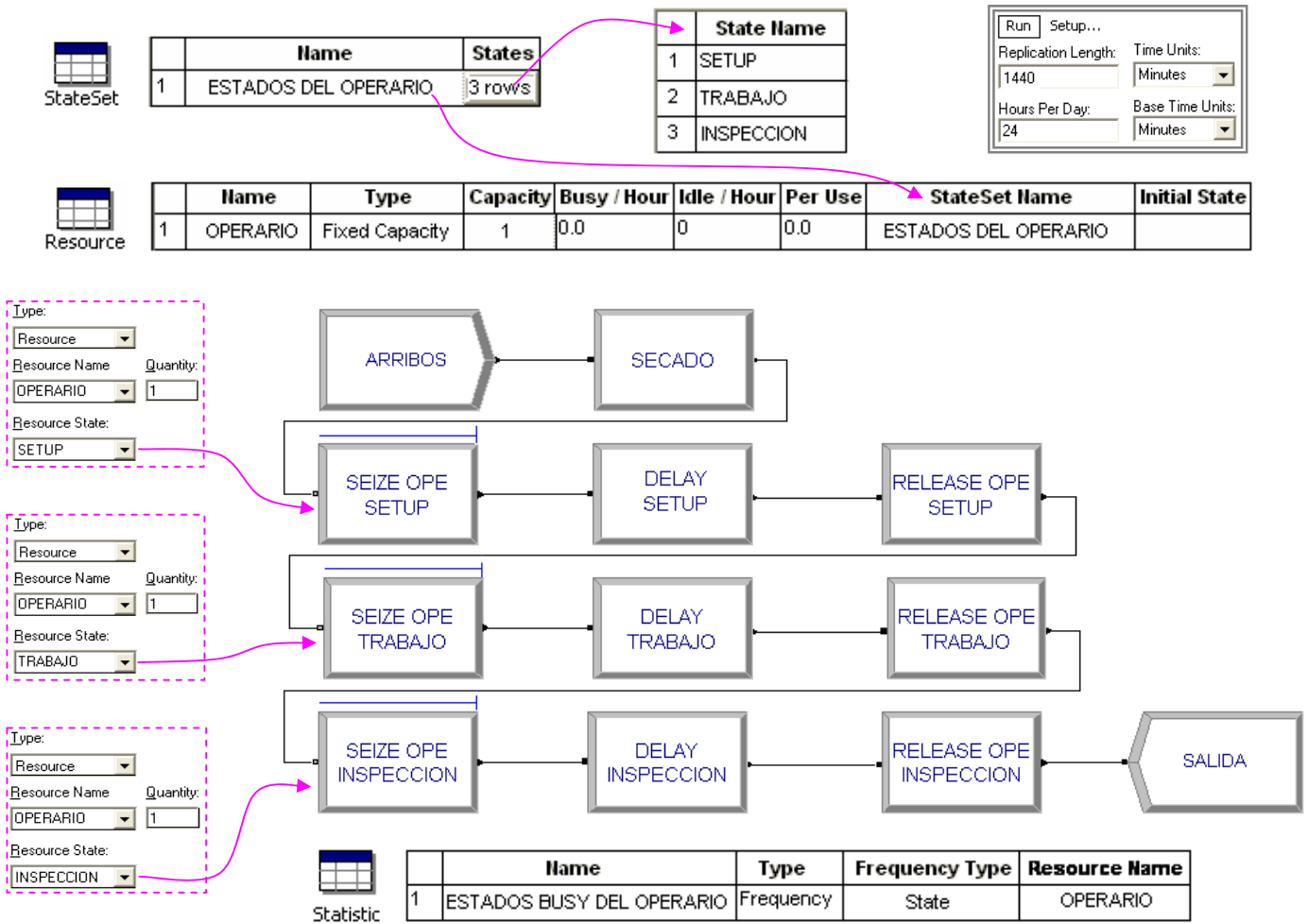


	Name	Type	Frequency Type	Resource Name	Report Label
1	ESTADISTICA DEL OPERARIO	Frequency	State	OPERARIO	ESTADOS



Frequencies				
Replication 1		Start Time: 0.00	Stop Time: 1,440.00	Time Units: Minutes
estados	Number Obs	Average Time	Standard Percent	Restricted Percent
BUSY	1	1,360.00	94.44	94.44
IDLE	1	80.0000	5.56	5.56

2. Creación de un Conjunto de Estados del Operario, asociados a su estado Busy:



TALLY VARIABLES				
Identifier	Average	Minimum	Maximum	observations
SEIZE OPE INSPECCION.Queue.waitingTime	188.44	14.747	358.56	66
SEIZE OPE TRABAJO.Queue.waitingTime	183.09	.00000	366.32	89
SEIZE OPE SETUP.Queue.waitingTime	191.96	.00000	364.30	129
				284

OUTPUTS	
Identifier	Value
Entity 1.NumberIn	195.00
Entity 1.Numberout	66.000
OPERARIO.Numberseized	284.00
OPERARIO.scheduledutilization	0.9444
System.Numberout	66.000

En total salieron **66 entidades** del sistema. La eficiencia del operario fue del **94.44%** (véase detalle abajo en BUSY) y fue asignado **284 veces** en total (véase detalle arriba), la operación de inspección fue el "cuello de botella".

Frecuencias			
ESTADOS	Number Obs	Average Time	Standard Percent
SETUP	75	3.5525	18.50
TRABAJO	44	19.7299	60.28
INSPECCION	56	4.0258	15.66
		94.44	5.56
IDLE	1	80.0000	5.56
		100.00	

Frecuencias		
estados	Average Time	Standard Percent
BUSY	1,360.00	94.44
IDLE	80.0000	5.56



15

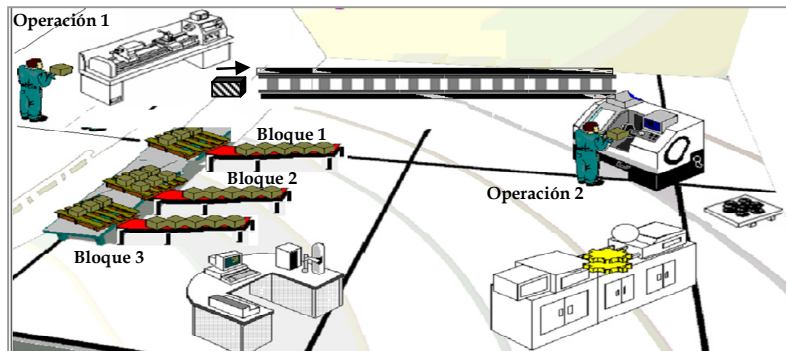
Caso de estudio

**Simulación de fallas en las máquinas<sup>11</sup>**

Objetivos:

- Modelado de fallas o DownTimes en las máquinas mediante el módulo Failure.
- Uso del módulo Statistic, para obtener resultados sobre los estados Busy-Idle-Failed de las máquinas.
- Aplicación del módulo Expression como estructura de datos.
- Estado transitorio de la simulación.

Una empresa metalmeccánica produce 3 tipos de piezas de acero, para lo cual dispone de dos máquinas de banco; las órdenes de trabajo llegan a la planta de producción de acuerdo a una EXPO(15) minutos; la composición de estas órdenes corresponde a un 40% del tipo 1, un 40% del tipo 2 y un 20% del tipo 3. Cada tipo requiere de un bloque diferente, de acero en bruto, el cual será maquinado. Existe inventario suficiente de los tres tipos de bloque.



El proceso de producción utiliza una distribución en serie de las máquinas, es decir, cada orden requiere de la operación de las dos máquinas en forma consecutiva. El tiempo para desplazar el producto en proceso, desde la máquina 1 hasta la máquina 2, es de 2 minutos. El tiempo de proceso depende del tipo producto y del tipo de máquina, tal como se muestra en la tabla siguiente, cuyos valores se expresan en minutos:

Tipo	Máquina 1	Máquina 2
1	EXPO(15)	NORM(10,1)
2	UNIF(8,10)	EXPO(10)
3	EXPO(10)	UNIF(6,10)

En base a estadísticas sobre frecuencia de fallas de las máquinas y a sus manuales de operación, se ha estimado que las fallas en la máquina 1 se ajustan a una EXPO(5) horas y el tiempo de falla se ajusta a una distribución UNIF(0.5,1.5) horas.

Las fallas en la máquina 2 se producen de acuerdo a un número de unidades procesadas, que se ajusta a una UNIF(100, 150) unidades. El tiempo de falla para esta máquina corresponde a una distribución UNIF(0.5, 1) horas. Simule el sistema durante 4800 minutos y determine el tiempo en sistema por tipo de pieza.

**Escenario:**

Estado transitorio de la simulación. Las órdenes ingresarán al sistema solo hasta que se cumplan 4800 minutos. Pero la simulación continuará hasta que hayan salido todas las órdenes que ingresaron.

<sup>11</sup> Ibídem.

### Solución

**Arrivals Configuration:**  
 Name: ARRIBOS, Entity Type: ORDENES, Type: Random (Expo), Value: 15, Units: Minutes, Entities per Arrival: 1, Max Arrivals: Infinite, First Creation: 0.0

**Process 1 Configuration:**  
 Action: Seize Delay Release, Resources: Resource, MAQ1, 1, Set, BLOQUE, 1, Specific Member, TIPO, Delay Type: Expression, Units: Minutes, Expression: TIEMPO(TIPO,1)

**Process 2 Configuration:**  
 Action: Seize Delay Release, Resources: Resource, MAQ2, 1, Delay Type: Expression, Units: Minutes, Expression: TIEMPO(TIPO,2)

**Delay Configuration:**  
 Name: PERMANENCIA EN SI, Type: Time Interval, Attribute Name: HORA ARRIBO, Record into Set: , Tally Set Name: TIEMPO EN SISTEMA, Set Index: TIPO

**Assignments:**  
 Attribute, HORA ARRIBO, TNOW  
 Attribute, TIPO, DISC(0.4,1,0.8,2,1,3)

**Resources Table:**

Name	Type	Capacity	Failures
1 MAQ1	Fixed Capacity	1	1 rows
2 MAQ2	Fixed Capacity	1	1 rows
3 BLOQUE 1	Fixed Capacity	Infinite	0 rows
4 BLOQUE 2	Fixed Capacity	Infinite	0 rows
5 BLOQUE 3	Fixed Capacity	Infinite	0 rows

**Failures Table:**

Failure Name	Failure Rule
1 FALLA MAQ 1	Preempt
1 FALLA MAQ 2	Preempt

**Set Configuration:**  
 Name: BLOQUE, Type: Resource, Members: 3 rows  
 Name: TIEMPO EN SISTEMA, Type: Tally, Members: 3 rows

**Expression Configuration:**  
 Name: TIEMPO, Rows: 3, Columns: 2, Expression Values: 6 rows

**Frequency Tables:**

ESTADOS MAQ 1	Number Obs	Average Time	Standard Percent
BUSY	52	67.5775	73.21
FAILED	12	54.3646	13.69
IDLE	41	15.4536	13.20

ESTADOS MAQ 2	Number Obs	Average Time	Standard Percent
BUSY	103	29.1814	62.62
FAILED	2	44.9912	1.87
IDLE	102	16.7091	35.51

**User Specified:**

	Average
TIEM SIST PIEZA 1	79.9224
TIEM SIST PIEZA 2	77.0372
TIEM SIST PIEZA 3	87.5224

**Failure Configuration:**

Name	Type	Up Time	Up Time Units	Count	Down Time	Down Time Units
1 FALLA MAQ 1	Time	EXPO(5)	Hours		UNIF(0.5, 1.5)	Hours
2 FALLA MAQ 2	Count			UNIF(100, 150)	UNIF(0.5, 1)	Hours

**Statistic Configuration:**

Name	Type	Frequency Type	Resource Name	Report Label	Output File	Categories
1 ESTADOS MAQ 1	Frequency	State	MAQ1	ESTADOS MAQ 1		0 rows
2 ESTADOS MAQ 2	Frequency	State	MAQ2	ESTADOS MAQ 2		0 rows

### Escenario: Estado transitorio

**Time Between Arrivals Configuration:**  
 Type: Constant, Value: 1, Units: Minutes, Entities per Arrival: 1, Max Arrivals: 1, First Creation: 0.0

**If Configuration:**  
 Expression: TNOW <= 4800

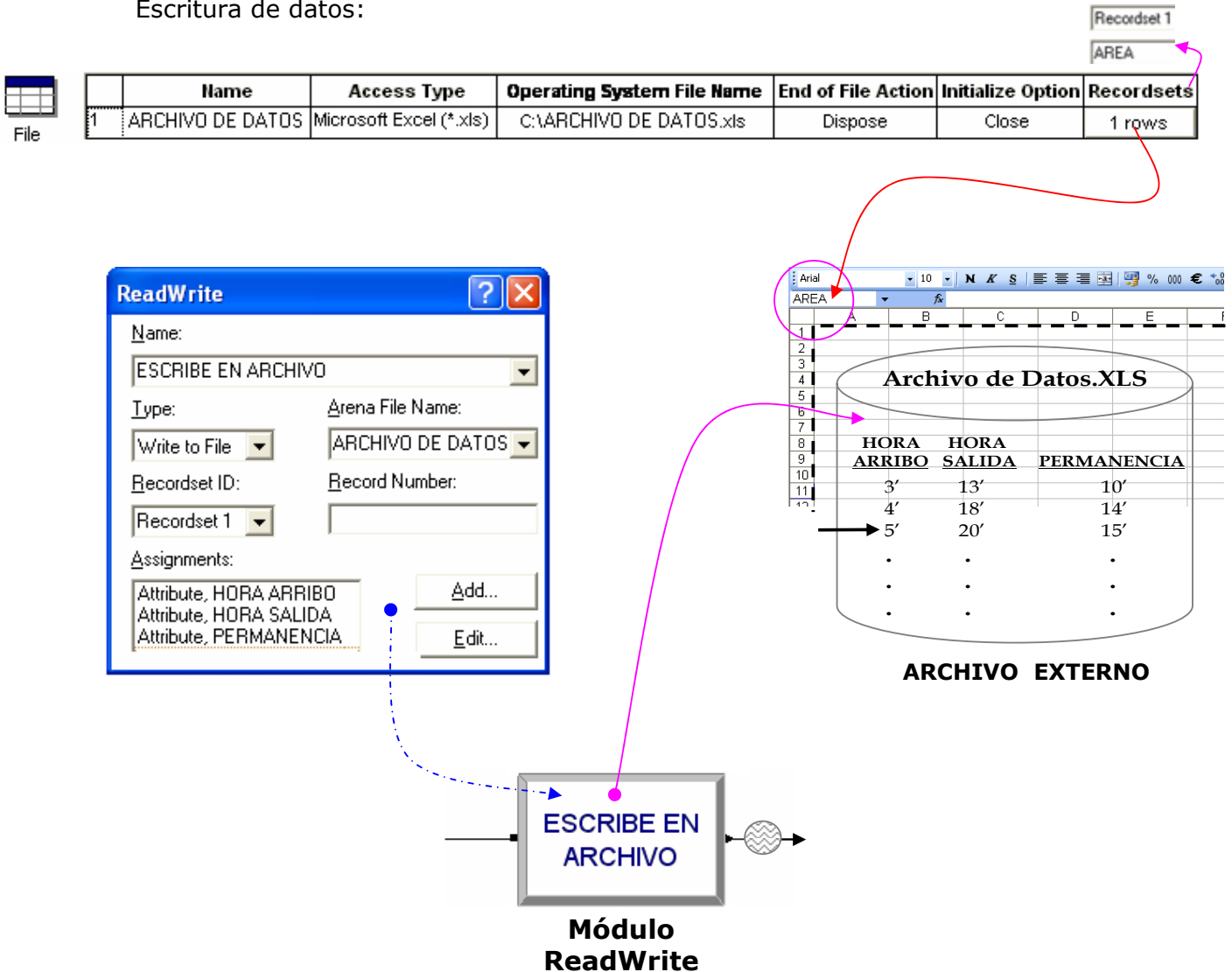
**Delay Configuration:**  
 Delay Time: EXPO(15)

**Replication Length Configuration:**  
 Replication Length: 4800, Time Units: Minutes, Hours Per Day: 24, Base Time Units: Minutes

## 8. MÓDULO READWRITE (interfase de lectura y escritura externa)

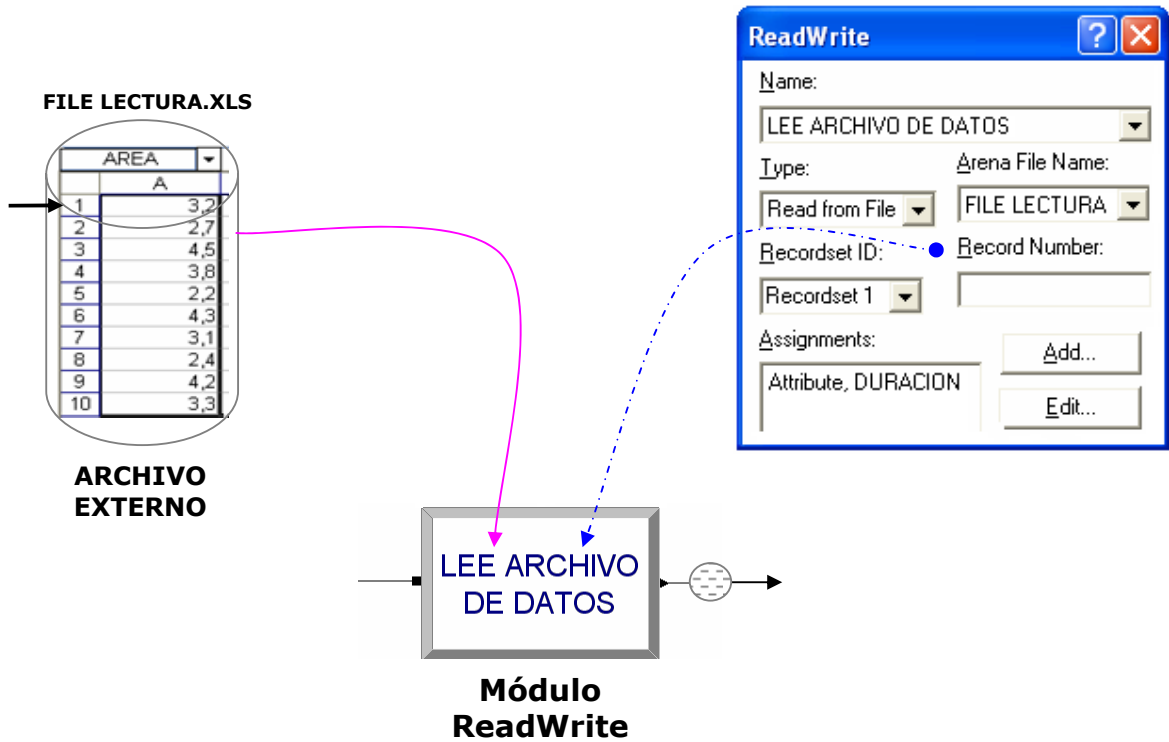
Entre las funciones principales de este módulo está el leer uno o más valores de un archivo externo, para utilizarlos durante la ejecución del modelo. Otra de sus funciones es escribir datos a un archivo externo, durante la ejecución del modelo. Cuando una entidad ingresa a este módulo, entonces lee o escribe un solo registro (fila); cada registro posee uno o más campos (por ejemplo: hora de arribo, hora de salida, etcétera).

Escritura de datos:



Lectura de datos:

	Name	Access Type	Operating System File Name	End of File Action	Initialize Option	Recordsets
1	FILE LECTURA	Microsoft Excel (*.xls)	C:\FILE LECTURA.xls	Dispose	Close	1 rows



## 16

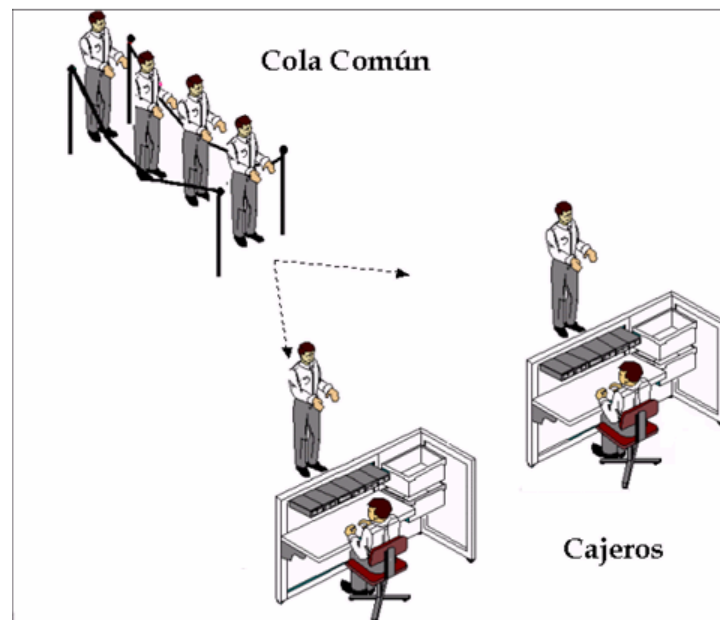
## Caso de estudio

**Escritura de datos en archivo externo**

## Objetivos:

- Uso del módulo avanzado Readwrite para escritura de datos en un archivo externo, durante la ejecución del modelo.
- Indicadores de desempeño del sistema.

Una agencia bancaria recibe a clientes, quienes realizan diversas transacciones en dos cajeros y una cola común. El tiempo de servicio de cada cajero con un cliente sigue una distribución uniforme entre 6 y 12 minutos. Los clientes llegan a la agencia con un tiempo entre arribos distribuido exponencialmente con una media de 10 minutos, a las horas de mayor congestión. Deseamos simular el comportamiento del sistema para esas horas. Considerar también que el primer cliente llega al minuto 5 del experimento de simulación.

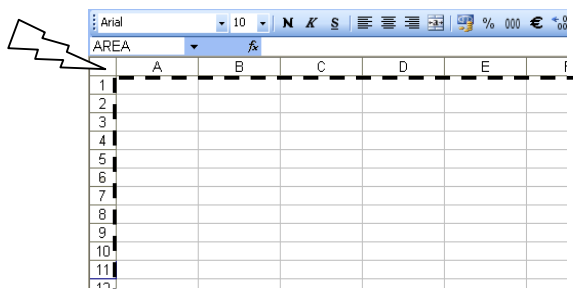


Se pide:

- Simular el sistema hasta que 100 clientes hayan sido atendidos.
- Obtener estadísticas individuales (por cliente) de la hora de arribo, hora de salida y permanencia en el sistema.
- Determine el tiempo promedio de permanencia en sistema de los clientes, mediante la media aritmética del punto anterior.
- Compare el tiempo promedio en sistema obtenido en el punto anterior con el generado con el módulo Record (Tally).

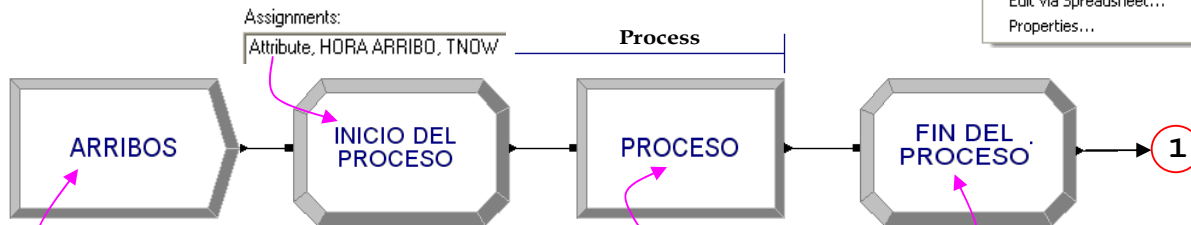
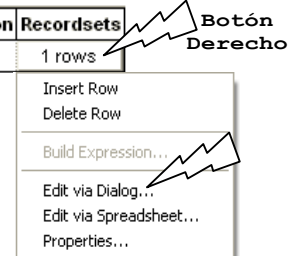
### Solución

Creamos un archivo "vacío" y definimos un Rango de celdas, al que le damos un nombre (Área), para que el modelo escriba los datos en dicho rango. Grabar y cerrar.



File	Name	Access Type	Operating System File Name	End of File Action	Initialize Option	Recordsets
1	ARCHIVO DE SALIDA	Microsoft Excel (*.xls)	C:\ARCHIVO DE SALIDA.xls	Dispose	Close	1 rows

Resource	Name	Type	Capacity
1	CAJERO	Fixed Capacity	2



Type: Random (Expo) Value: 10 Units: Minutes  
 Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: Infinite First Creation: 5

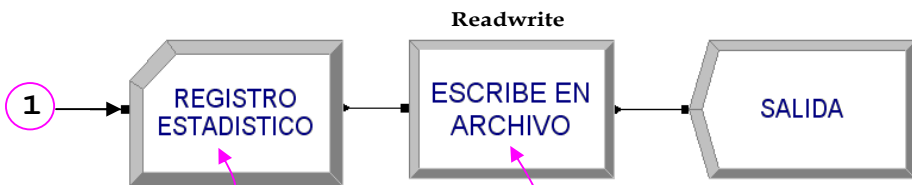
Action: Seize Delay Release  
 Resources: Resource, CAJERO, 1  
 Delay Type: Uniform Units: Minutes  
 Minimum: 6 Maximum: 12

Assignments: Attribute, HORA SALIDA, TNOw  
 Attribute, PERMANENCIA, HORA SALIDA - HORA ARRIBO

ESCRITURA DE DATOS .XLS

AREA	A	B	C
1	5,00	13,16	8,16
2	8,46	14,81	6,35
3	11,16	24,81	13,65
4	12,57	25,93	13,36
5	13,82	31,60	17,78
...	...	...	...
95	1060,63	1072,42	11,79
96	1106,49	1113,20	6,71
97	1126,62	1138,23	11,61
98	1133,72	1143,32	9,61
99	1135,60	1147,47	11,87
100	1138,24	1150,90	12,66

PROMEDIO: 10,55



Type: Time Interval  
 Attribute Name: HORA ARRIBO  
 Tally Name: TIEMPO EN SISTEMA

**ReadWrite**  
 Name: ESCRIBE EN ARCHIVO  
 Type: Write to File Arena File Name: ARCHIVO DE SALIDA  
 Recordset ID: Recordset 1 Record Number:  
 Assignments: Attribute, HORA ARRIBO; Attribute, HORA SALIDA; Attribute, PERMANENCIA

**Área**  
 Nombre del Rango en la Hoja de cálculo, donde se escribirá o de donde se leerá.

**Run Setup**  
 Base Time Units: Minutes  
 Terminating Condition: SALIDA.NUMBEROUT == 100

**User Specified**  
 Tally Interval Average  
 TIEMPO EN SISTEMA 10.5580

17

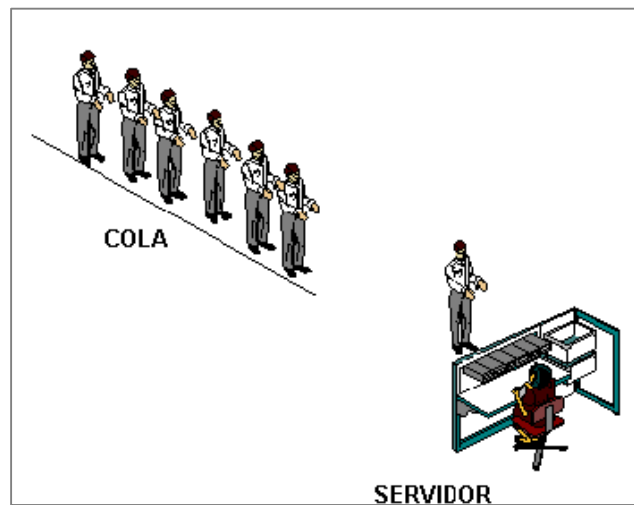
Caso de estudio

**Lectura de datos de un archivo externo**

Objetivos:

- Uso del módulo avanzado Readwrite para lectura de datos de un archivo externo o escribir datos en un archivo externo, durante la ejecución del modelo.
- Obtención de indicadores de desempeño del sistema.

Considere un sistema simple, de una cola y un servidor (véase esquema adjunto). En este, existen tres diferentes elementos: Clientes (entidades) que arriban al sistema, una cola FIFO y un servidor para la atención de los clientes.



El tiempo entre arribos de clientes a la cola cambia en forma aleatoria. Los clientes son atendidos individualmente en el servidor. Se asume que los tiempos entre arribos y la duración del servicio se ajustan a funciones estadísticas de distribución de probabilidad, cuyos valores se muestran a continuación:

A =	1.2	2.4	3.1	1.7	2.4	1.6	3.7	2.9	3.3	1.6	2.3
S =	3.2	2.7	4.5	3.8	2.2	4.3	3.1	2.4	4.2	3.3	2.9

A = Tiempo entre arribos (minutos)

S = Tiempo de servicio (minutos)

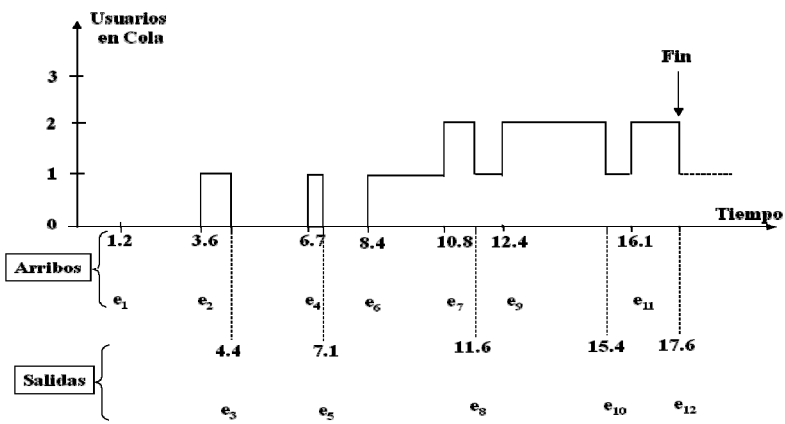
Se pide:

- Formular un modelo adecuado a la situación descrita, en el cual se lean, desde un archivo externo, los datos correspondientes al tiempo entre arribos y el tiempo de servicio de las entidades. El final de la simulación se da en el instante en que el quinto cliente sale del sistema.
- Estimar los indicadores de desempeño que considere importantes en el estudio del sistema.

### Solución

**FILE LECTURA.XLS**

AREA	A	B
1	1,2	3,2
2	2,4	2,7
3	3,1	4,5
4	1,7	3,8
5	2,4	2,2
6	1,6	4,3
7	3,7	3,1
8	2,9	2,4
9	3,3	4,2
10	1,6	3,3
11	2,3	2,9



Max Arrivals: 1  
First Creation: 0.0

**ReadWrite**

Name: LECTURA DE DATOS

Type: Read from File  
Arena File Name: FILE LECTURA

Recordset ID: Recordset 1  
Record Number:

Assignments:  
Attribute, INTRVL ARRIBOS  
Attribute, DURACION SERVICIO

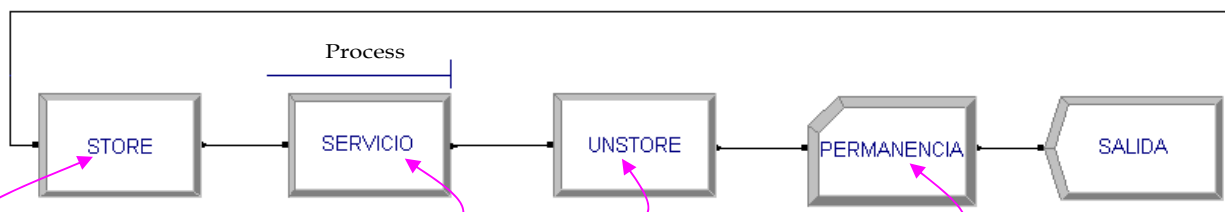
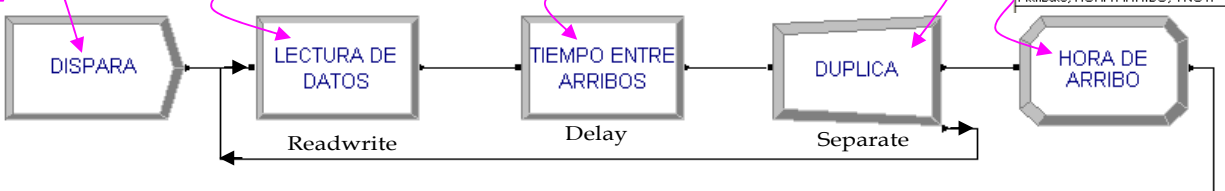
**TIEMPO ENTRE ARRIBOS**

Name: TIEMPO ENTRE ARRIBOS  
Allocation: Value Added  
Delay Time: INTRVL ARRIBOS  
Units: Minutes

**DUPLICA**

Type: Duplicate Original  
# of Duplicates: 1

Assignments:  
Attribute, HORA ARRIBO, TNOW



**STORE**

Name: STORE  
Type: Storage  
Storage Name: NUMERO

**SERVICIO**

Action: Seize Delay Release  
Resources: Resource, SERVIDOR, 1  
Delay Type: Expression  
Units: Minutes  
Expression: DURACION SERVICIO

**UNSTORE**

Name: UNSTORE  
Type: Default

**PERMANENCIA**

Name: PERMANENCIA  
Type: Time Interval  
Attribute Name: HORA ARRIBO  
Tally Name: TIEMPO EN SISTEMA

Recordset Name: Recordset 1  
Named Range: AREA

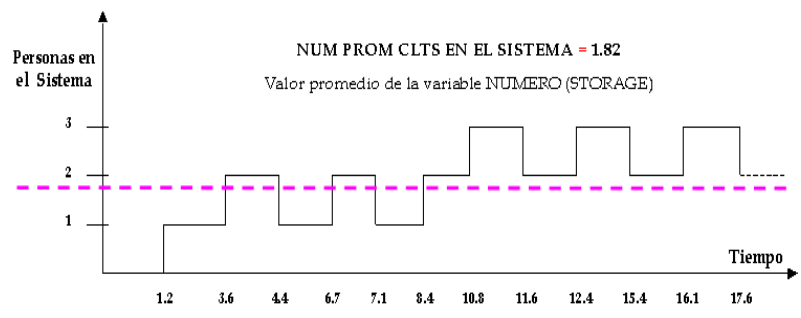
File	Name	Access Type	Operating System File Name	End of File Action	Initialize Option	Recordsets
1	FILE LECTURA	Microsoft Excel (*.xls)	C:\FILE LECTURA.xls	Dispose	Close	1 rows

Statistic	Name	Type	Expression
1	NUM. PROM. CLTS. EN SIST.	Time-Persistent	NSTO(NUMERO)
2	VELOCIDAD DEL SERVIDOR	Output	SALIDA.NUMBEROUT / TNOW

**Botón Derecho**

- Insert Row
- Delete Row
- Build Expression...
- Edit via Dialog...
- Edit via Spreadsheet...
- Properties...

- Indicadores:**
- Duración de la simulación: **17.6 minutos**
  - Tiempo promedio en el sistema: **5.08 minutos**
  - Número promedio de clientes en el Sistema: **1.82 clts.**
  - Tiempo promedio en cola: **2.24 minutos**
  - Longitud promedio de cola: **0.89 clientes**
  - Utilización del servidor: **93.2%**
  - Velocidad promedio del servidor: **0.28 clts./min.**







Final de capítulo

## Casos propuestos

### Caso 1: Almacén de distribución

Office Depot es una empresa distribuidora de artículos de oficina. Los pedidos llegan a su almacén vía correo electrónico solo durante su horario de atención: de 8:00 a 19:00 horas, de acuerdo a una EXPO(7) minutos. Las etapas del proceso de atención son las siguientes:

#### Área de despacho

Los pedidos llegan a esta primera estación de servicio, en la cual hay dos empleados disponibles para la atención de estos. El tiempo que emplea cada empleado en atender un pedido es una NORM(10, 2) minutos; luego, el pedido pasa a la estación de control.

#### Estación de control

En la estación se realiza una revisión o control de calidad en la cual existen dos empleados revisores. Cada revisor tarda una UNIF(3, 6) minutos en revisar el pedido y se obtiene como resultado que el 70% de los pedidos salen sin problemas de la estación de revisión hacia el almacén de salida. El resto de los pedidos están incompletos o equivocados, por lo cual el "mismo revisor" lleva el pedido a un almacén auxiliar.

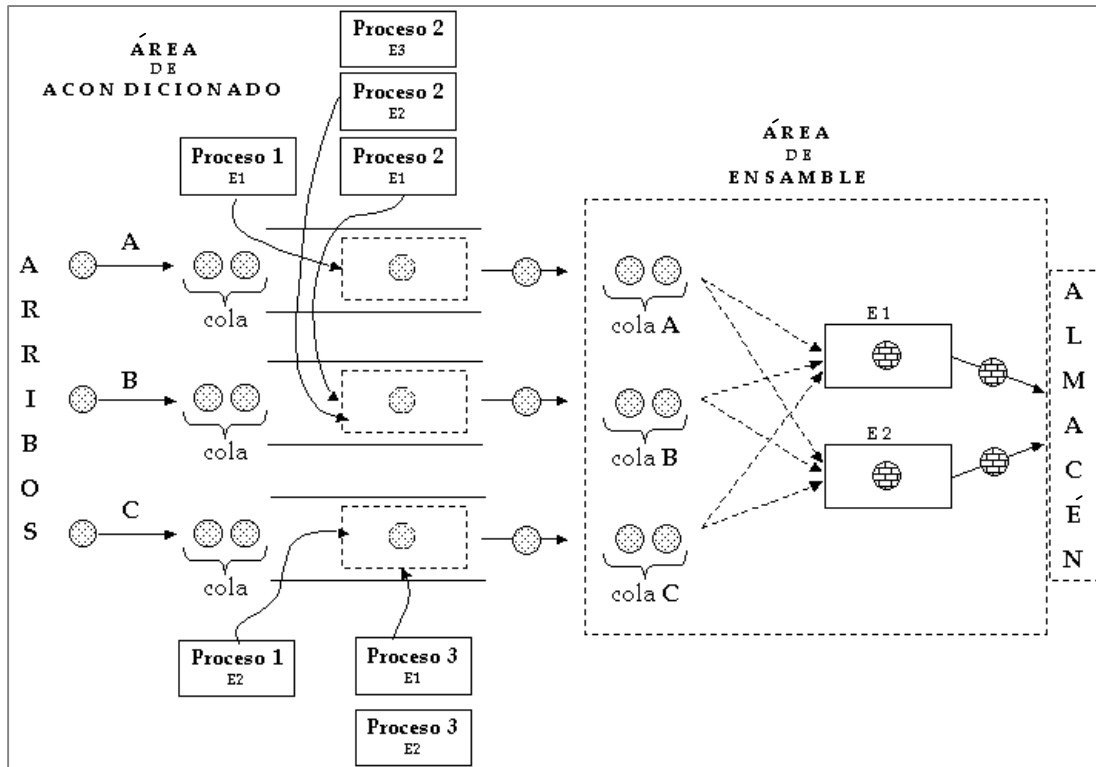
#### Almacén auxiliar

A este lugar llega el revisor de la estación de control trayendo el pedido. Aquí trabaja un almacenero; el revisor, junto con el almacenero, rectifica el pedido; el tiempo que demora dicha tarea es una EXPO(10) minutos. Finalmente, el pedido es enviado al almacén de salida. Se pide:

1. Formule el modelo RED para el caso descrito.
2. Simule la situación descrita por un tiempo equivalente a una jornada de trabajo (11\*60 minutos) y obtenga estadísticas del tiempo en el sistema de los pedidos que requirieron ser rectificadas, de los pedidos que salieron sin problemas y de todos los pedidos en general. Interprete la capacidad ociosa de mano de obra.
3. Suponga que con la finalidad de captar más pedidos vía correo electrónico se ha decidido dejar que estos ingresen durante todo el día, incluso durante horas fuera de atención. En este último caso, estos se acumulan y serán procesados apenas se inicie la atención. Considere que el nuevo horario de trabajo de la empresa es de lunes a viernes de 8:00 a 13:00 horas y de 15:00 a 19:00 horas.
4. Simule la situación descrita en la pregunta anterior durante 5 días continuos (5\*24\*60 minutos). Obtenga los mismos indicadores de la pregunta dos.
5. Respecto al escenario original, suponga que debido a la gran demanda, el horario de atención se amplía a 24 horas, desde las 8:00 horas del día lunes hasta las 13 horas del sábado, luego la empresa se cierra y no recibe ni acumula ningún pedido hasta el lunes a las 8:00 horas. Considere que se desea simular el modelo durante 15 días (15\*24\*60 min.). Obtenga los mismos indicadores de la pregunta dos.

## Caso 2: Proceso de acondicionado de componentes y ensamble

Una empresa industrial fabrica un producto mediante el ensamble de tres componentes A, B y C. El componente A llega al sistema cada  $NORM(15,4)$  minutos, el componente B llega cada  $UNIF(15,30)$  minutos y el componente C llega cada  $EXPO(10)$  minutos. Véase el esquema siguiente:



### Área de acondicionado

Tres son los procesos previos al proceso de ensamble para acondicionar los componentes. En el Proceso 1 existen 2 estaciones disponibles, en el Proceso 2 hay 3 estaciones y en el Proceso 3 se dispone de 2 estaciones.

- El componente A requiere de una estación del proceso 1, este demora  $UNIF(10,16)$  minutos.
- El componente B requiere de dos estaciones del proceso 2, demorando  $EXPO(20)$  minutos.
- El componente C requiere de una estación del proceso 3 y una estación del proceso 1, cuando ambas estaciones están disponibles la actividad demora  $NORM(12, 2)$  minutos.

Dado que el proceso 1 se requiere para los componentes A y C, entonces el componente A tendrá la prioridad. Al Terminar pasan al área de ensamble.

### Área de ensamble

En el área de ensamble, se forma una cola por cada componente. Dado que los componentes poseen dimensiones exactas, estos deben ser ensamblados en forma preci-

sa. El proceso de ensamble consiste en tomar una unidad de cada componente y unirlos perfectamente. Para este proceso se puede utilizar cualquiera de las 2 estaciones disponibles en esta área. Cada ensamble tarda 40 minutos. Luego, el producto terminado es llevado al almacén. Se pide:

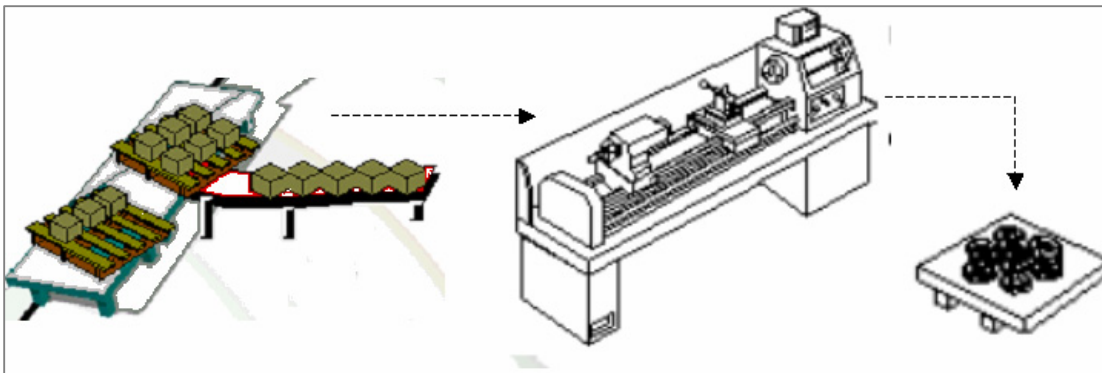
1. Formule un modelo adecuado al sistema descrito y simúlelo durante 480 minutos.
2. Obtenga estadísticas sobre el tiempo que demora la operación de ensamble y el tiempo de ciclo de cada producto terminado.

### Escenario 1

Suponga que el componente B arriba al sistema en lotes de 10 unidades. Además, para ensamblar un producto se requiere de 1 unidad de A, 2 de B y 1 de C. Compare el nuevo tiempo de ensamble con el del escenario original.

### Caso 3: Variabilidad en los tiempos entre arribos de las entidades

Considere una situación en la cual el tiempo entre arribos de piezas metálicas a la zona de operación de Torneado es variable y se va ajustando y reajustando, de acuerdo al número de entidades en espera, para ser procesadas.



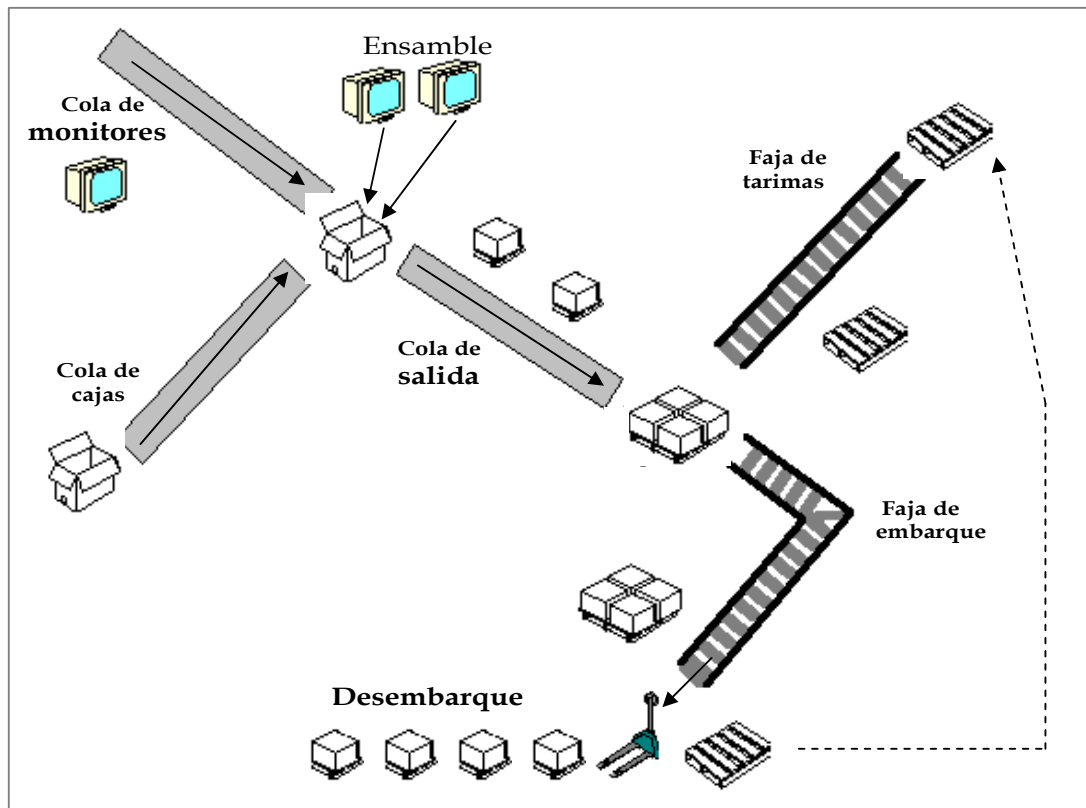
Inicialmente, el tiempo entre arribos de las piezas a la máquina se ha configurado de acuerdo a una distribución UNIF(6,12) minutos. Sin embargo si la cola que forman las piezas para ser procesadas llega a un número de 10 unidades o más, entonces el tiempo entre llegadas debe alargarse (espaciarse) a una distribución UNIF(16,22) minutos.

Posteriormente, si la cola en algún instante disminuye a 5 unidades, entonces los tiempos entre arribos se acortan y se restablecen como en el inicio. El tiempo para procesar la pieza se ajusta a una distribución NORM(25,1) minutos. Se pide:

1. Formule un modelo adecuado al sistema descrito y simúlelo por una jornada de 8 horas.
2. Determine los siguientes indicadores de desempeño:
  - Tiempo de ciclo de las piezas y la producción total.
  - Número de veces que la cola subió a 10 piezas y las veces que bajó a 5 piezas.
  - Tamaño promedio de cola y tiempo promedio de espera.

#### Caso 4: Proceso de embalaje de monitores (Promodel Corp.)

Se tiene un sistema de producción compuesto por las siguientes locaciones:



Los monitores ingresan al sistema en lotes de 3 unidades de acuerdo a una distribución exponencial con media de 2 minutos, y avanzan por la faja hasta la zona de ensamble. Las cajas vacías arriban en lotes de 5 unidades, de acuerdo a una distribución exponencial con media de 10 minutos, y avanzan por la faja hasta la zona de ensamble. En la operación de ensamble se juntan 2 monitores y luego se embalan en una caja; esta actividad tiene una duración correspondiente a una distribución normal con media 4 y desviación de 1 minuto.

Existe una faja transportadora que va surtiendo las tarimas a la zona de carga, hay solo 3 tarimas que circulan. Las cajas llenas se juntan en una tarima y cuando se tienen 4 cajas entonces se transportan por la faja de embarque. El tiempo de transporte hasta la zona de desembarque corresponde a una distribución uniforme de entre 2 y 4 minutos.

La operación de desembarque consiste en desmontar o descargar la tarima llena en unidades independientes. Realizada esta operación, la tarima vacía es trasladada a la banda de tarimas para que reingrese al circuito; mientras tanto, las cajas que contienen los monitores salen del sistema.

Simule el proceso descrito durante 100 minutos y considere que la variable en estudio es el tiempo de ciclo promedio por cada unidad embalada.

### Caso 5: Proceso de maquinado de piezas

Maffeppe es una empresa metalmecánica que procesa dos tipos de piezas: 1 y 2; el intervalo de llegadas de las piezas corresponde a una  $EXPO(3)$  minutos, el 40% corresponden al tipo 1 y el 60% al tipo 2. La empresa dispone de dos máquinas de iguales características técnicas; los tiempos de maquinado dependen del tipo de pieza, así, la duración para el tipo 1 es una  $UNIF(2,3)$ , mientras que para el tipo 2 es una  $UNIF(3,4)$  minutos.

Al término del maquinado, la pieza es colocada en una zona de almacenamiento temporal, común para ambas piezas. En forma sistemática, las piezas tipo 1 son recogidas de esta zona temporal cada 30 minutos (se recogen todas las que hubieren de ese tipo), mientras que las piezas tipo 2, cada 45 minutos. Luego, estas piezas salen de la planta hacia el almacén.

Es política de la gerencia de producción, que al final de la jornada diaria se deben recoger todas las piezas que queden en la zona temporal, es decir, esta zona debe quedar vacía, para iniciar una nueva jornada al día siguiente.

Simule el comportamiento del sistema durante un día de 8 horas de trabajo y obtenga la cantidad total de cada tipo recogido durante el día.

### Caso 6: Servicio de préstamo de libros en biblioteca

Una biblioteca universitaria realiza préstamos de libros a estudiantes, quienes llegan según una  $EXPO(2)$  minutos. El 30% de los estudiantes ya tienen ficha, el resto debe realizar la operación de búsqueda en la computadora (existen 10 disponibles), el tiempo que demanda esta operación se ajusta a una  $UNIF(3,5)$  minutos, si todas están ocupadas entonces el estudiante espera. El 60% de los estudiantes solicita un libro y el 40% solicita 2 libros; se considera que todo estudiante sale de la biblioteca por lo menos con un libro.

La biblioteca tiene 4 pisos, el 30% de los estudiantes visita el piso 1, el 20% el piso 2, el 25% el piso 3 y el 25% el piso 4; el tiempo estimado para subir cada piso es una  $NORM(1,0.5)$  minutos. Una vez en el piso, el estudiante hace una cola en la ventanilla de atención, donde hay dos empleados que reciben las fichas de los alumnos y buscan en los estantes los libros solicitados; esta operación demanda una  $UNIF(2,3)$  minutos. El estudiante que solicitó un libro, lo lleva siempre. El que solicitó 2 libros los revisa y tarda una  $UNIF(1,3)$  minutos por libro; después de la revisión, el 60% decide llevar un solo libro.

Una vez atendido en los pisos, el estudiante baja empleando un tiempo equivalente al de subida y espera en el primer piso hasta que llegue su pedido. En los pisos del 2 al 4, los libros son bajados en un pequeño ascensor y se deben juntar 5 libros para que este baje directo al primer piso; el tiempo en bajar los 5 libros es una  $UNIF(1,2)$  minutos. Finalmente, el empleado del primer piso entrega los libros que corresponden a cada estudiante, luego este se retira.

Determine el tiempo promedio que los estudiantes permanecen en la biblioteca; discrimine por número de libros prestados.

## Caso 7: Sistema de operación de una agencia bancaria

La Gerencia de Operaciones de un conocido Banco ha iniciado un proyecto de evaluación de todos sus procesos. El objetivo principal es simular el funcionamiento del Área de Servicio al Cliente, para analizar la complejidad de sus relaciones y los eventos aleatorios que ocurren.

En la agencia seleccionada para el "plan piloto", los clientes han sido clasificados por el banco como Clientes y No Clientes. Los primeros tienen un tiempo entre llegadas que se ajusta a una  $EXPO(4)$  minutos, y los segundos, de acuerdo a una  $EXPO(3)$  minutos. Luego de ingresar al banco, estos buscan alguna ubicación en la zona de espera, para tomar asiento, hasta que se desocupe un cajero y les corresponda su turno de atención, según el orden de llegada.

La capacidad instalada del banco, sin considerar cajeros automáticos, es de tres ventanillas de atención, en las que se atiende a ambos tipos de clientes. Cuando algún cajero se desocupa, un sistema electrónico genera en forma aleatoria un tipo de cliente; la política del Banco es dar preferencia a sus clientes, de tal forma que la probabilidad de que el sistema lo seleccione es del 65%, mientras que para los No Clientes es solo del 35%. El cliente seleccionado debe ser atendido por el cajero que se desocupó; los tiempos de atención de los tres cajeros, se ajustan, respectivamente, a las siguientes distribuciones de probabilidad:  $NORM(2, 0.5)$ ,  $UNIF(3, 4)$  y  $NORM(3, 0.5)$  minutos. Realizada la transacción, el cliente se retira.

El horario de atención al público es de 9:00 a 18:00 horas, de corrido. Actualmente, el banco posee un sistema en línea que se alimenta de las tarjetas de los clientes y proporciona información sobre los arribos, tiempos de espera, tiempos de atención, tipos de cliente, etcétera. Se espera que en el futuro toda esta información en línea sea la interfase que soporte un sistema de simulación que permita procesarla constantemente y monitorear si se cumplen los estándares establecidos.

Se pide:

Simular el comportamiento del sistema durante un día de trabajo y obtener los tiempos de permanencia de los clientes en la agencia.

## Caso 8: Aventura Culinaria

Un restaurante ofrece comida de "cocina gourmet" solo para llevar. Los clientes llegan en auto según una distribución  $EXPO(15)$  minutos y forman cola en una ventanilla, donde ordenan su pedido y pagan, todo ello sin necesidad de bajarse del auto.

Un pedido consiste en 1, 2 ó 3 platos con probabilidades de demanda igual a 0.2, 0.3, y 0.5 respectivamente. El cajero toma el pedido y realiza el cobro respectivo, todo ello tarda una duración que se ajusta a una distribución  $NORM(2,0.2)$  minutos; el cajero envía un mensaje a la cocina mediante un micrófono y ordena la preparación; el cliente se estaciona en la zona de parqueo y espera por su pedido.

Cada cliente selecciona los platos de su pedido, de acuerdo a las siguientes probabilidades: 0.25 para el plato 1, 0.35 para el plato 2 y 0.40 para el plato 3. Se dispone de tres cocineros, a quienes se les asigna en forma alternada la preparación de un plato, en caso estén disponibles, e inmediatamente empiezan la preparación del plato. Es decir, para completar un pedido se puede requerir de uno o más cocineros. El tiempo (en minutos) que se requiere, para la preparación de un determinado plato, es variable y depende de la experiencia del cocinero, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

	SANDRA	GASTÓN	TOSHIRO
PLATO 1	UNIF(3,4)	UNIF(2,3)	UNIF(3,5)
PLATO 2	UNIF(5,6)	UNIF(4,6)	UNIF(6,8)
PLATO 3	UNIF(8,12)	UNIF(9,10)	UNIF(10,12)

Se dispone de tres mozos para la atención de los clientes. Así, una vez listo el pedido, se requiere de un mozo para que lo empaque y lo lleve al cliente correspondiente que se encuentra en la zona de parqueo en espera de su pedido. El empaque y la entrega demanda un tiempo equivalente a una distribución UNIF(1.5, 2) minutos, por cada pedido. Finalmente, el cliente sale con su pedido de la zona de espera y se retira. Se desea simular el sistema descrito durante una jornada de 8 horas.

### Caso 9: Supermercados IncaMarket

INCAMARKET es un supermercado que se caracteriza por tener productos siempre frescos, contar con expertos en tienda, tener un layout innovador y ofrecerle al cliente una experiencia de compra gratificante. Atiende a sus clientes desde las 7 a.m., quienes arriban al establecimiento de acuerdo a una distribución exponencial con una media variable, dependiendo la hora en que se produce el arribo; véase el siguiente cuadro:

Intervalo	Tiempo entre arribos
07 - 09 a.m.	2 min.
09 - 16 p.m.	1 min.
16 - 22 p.m.	1.5 min.

Al llegar el cliente, éste toma una canastilla o una carretilla y luego comienza su recorrido por el establecimiento. La cantidad a comprar de cada cliente está uniformemente distribuida entre 1 y 12 artículos y le demanda un tiempo de selección de cada artículo que se ajusta a una UNIF(0.5,1.5) minutos, además de un tiempo total de desplazamientos y traslados que corresponde a una UNIF(5,10) minutos. Finalmente, si el número de productos comprados es igual o menor a 5, el cliente se dirige a cualquiera de las dos cajas rápidas existentes, de lo contrario va a cualquiera de las dos cajas normales existentes. Los clientes forman una sola cola frente a las cajas rápidas y una sola cola frente a las cajas normales para ser atendidos en orden de llegada. Considere que el tiempo en caja

se ajusta a una NORM(0.5,0.05) minutos. La simulación terminará cuando salga el último cliente del supermercado. Suponga que la selección de cada artículo a cada cliente le toma el mismo tiempo.

*Se pide:*

- 1.** Determinar el tiempo promedio de permanencia en el sistema para los clientes atendidos por las "cajas rápidas".
- 2.** ¿Cuál es el aforo que usted consideraría para el establecimiento?
- 3.** Suponga que el establecimiento abre una nueva sección. Los nuevos clientes arriban a esta nueva sección, de acuerdo a una EXPO(6) minutos y compran 4, 5, 6 y 7 unidades con probabilidades de 55%, 30%, 10% y 5%, respectivamente. Los tiempos de desplazamiento, selección del artículo y pago en caja se mantienen.

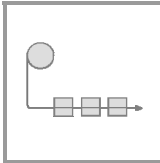


# Capítulo 6

## **Modelado de sistemas continuos y combinados**

- Conceptos fundamentales
- Modelado de procesos de flujo
- Módulo Tank
- Módulos Seize Regulador y Release Regulador
- Módulo Flow
- Módulo Sensor
- Módulo Regulate

En la simulación discreta, las variables de estado del sistema cambian de valor con la ocurrencia de eventos en el sistema; mientras no ocurra un evento los valores de las variables permanecen constantes. En la simulación continua, el estado del sistema está representado por variables dependientes que cambian continuamente con el simple avance del tiempo; por ello, el valor de estas variables se rige por una ecuación diferencial en función del tiempo. En este capítulo se presentan las herramientas de procesos de flujo del software Arena que nos permitirán modelar este tipo de situaciones, así como la convergencia de sistemas continuos con eventos discretos.



## Capítulo 6

## MODELADO DE SISTEMAS CONTINUOS Y COMBINADOS

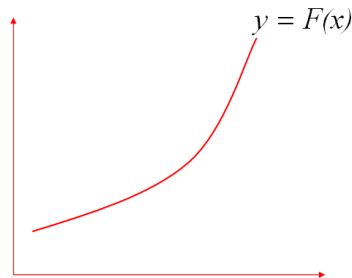
Consideremos una industria en la que el proceso de producción consiste en el ingreso de diversos líquidos o ingredientes a un tanque, en donde se mezclan. Luego, el líquido resultante es calentado y finalmente bombeado hacia un tanque de almacenamiento. En la situación descrita, lo que se desplaza a través del sistema no son las entidades discretas, sino más bien diversos flujos continuos que se envían de un lugar a otro o se almacenan en tanques. Esto es un ejemplo de los llamados sistemas continuos.

### 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

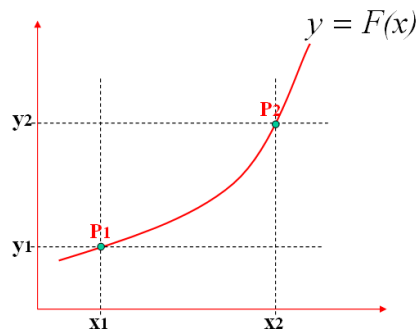
En un modelo de simulación discreta, las variables de estado del sistema cambian de valor con la ocurrencia de eventos en el sistema; mientras no ocurra un evento los valores de las variables permanecen constantes. En un modelo de simulación continua, el estado del sistema está representado por variables dependientes que cambian continuamente con el simple avance del tiempo, por ello, el valor de estas variables se rige por una ecuación diferencial en función del tiempo.

Para simular el funcionamiento de un sistema continuo, podemos valernos de la ecuación de Euler o también del método de Runge Kutta, que se basan en funciones de recurrencia, en donde se estima un nuevo valor, con base en un valor anterior, encontrándose inicialmente el sistema en un estado con parámetros conocidos. A continuación desarrollaremos la ecuación de Euler para el cálculo de la derivada de una función  $y = F(x)$ .

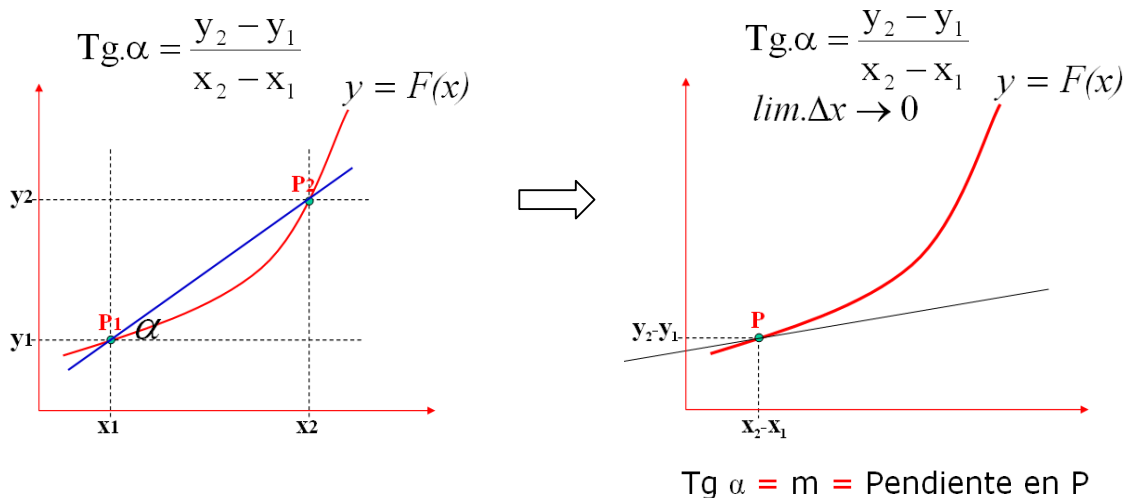
Dada la siguiente función:



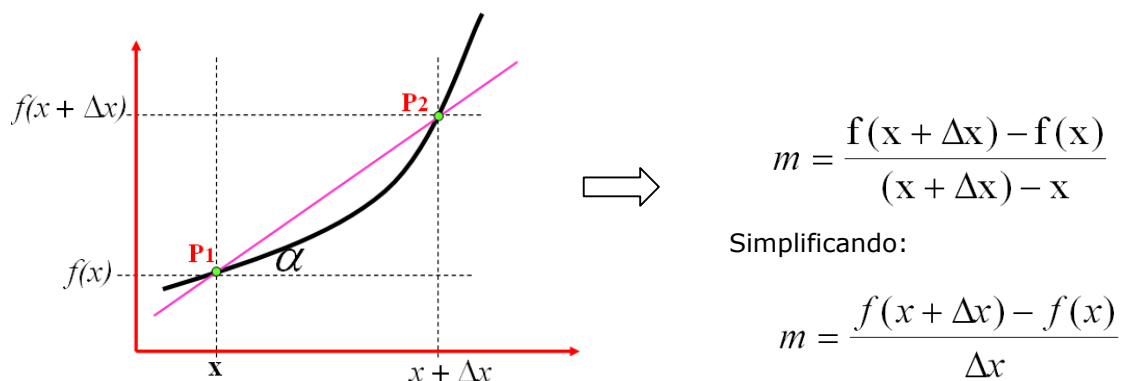
Definimos dos puntos cualesquiera P1 y P2:



Trazamos un segmento de recta que pase por P1 y P2:



Aplicando el cálculo Infinitesimal:



Aplicamos límite a m para obtener la función derivada:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} m = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = f'(x) \quad \Rightarrow \quad f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Despejando  $f(x + \Delta x)$ , obtenemos la ecuación de **EULER**:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x * f'(x)$$

donde:

- f(x + Δx)** = Función de Estado (evaluada en el punto actual)
- f(x)** = Función de Estado (evaluada en el punto anterior)
- Δx** = Incremento
- f'(x)** = Función Derivada (evaluada en el punto anterior)

**Ejemplo 1: Simulación de una función matemática**

Dada la función derivada  $f'(t) = 2t + 3$ , obtener su función primitiva. La variable independiente es el tiempo y varía continuamente. Se sabe que  $f(t=0)=0$ .

Simular durante 50 minutos la función primitiva  $f(t)$ , utilizando el método de Euler. Considere incrementos de 1 minuto ( $\Delta t = 1$ ).

**Solución**

Función derivada:  $f'(t) = 2t + 3$

Obtenemos su función primitiva:  $\int(2t + 3)dt$

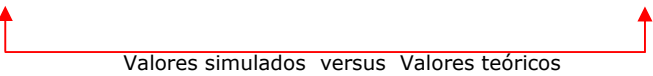
$$f(t) = t^2 + 3t + C$$

como  $f(0) = 0 \therefore C = 0$   $f(t) = t^2 + 3t$  (Función teórica)

Ecuación de Euler:  $f(t + \Delta t) = f(t) + \Delta t * f'(t)$  (Función simulada)

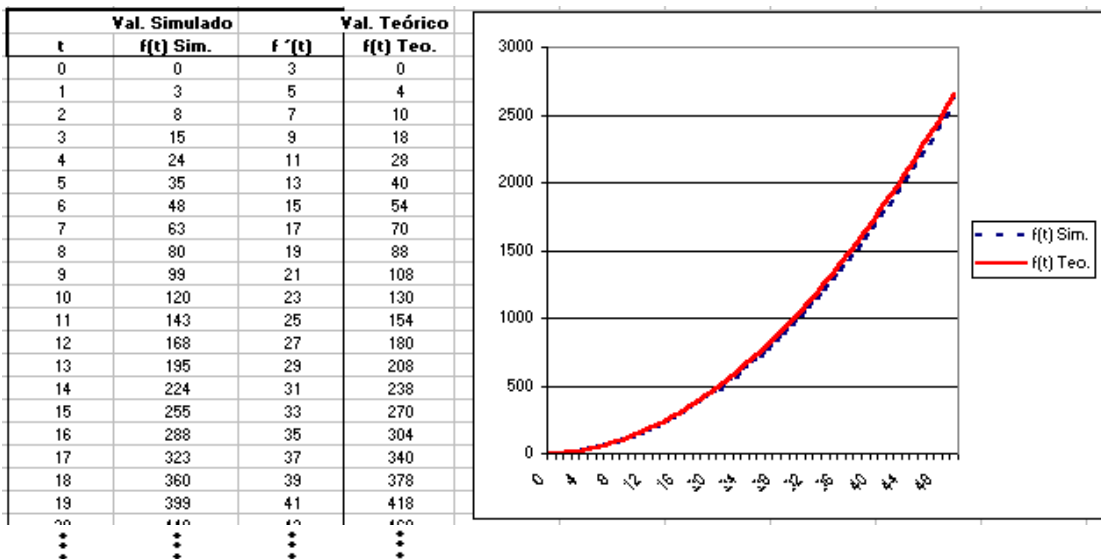
T	f(t) Función simulada $f(t) + \Delta t * f'(t)$	f'(t) Función derivada $2t + 3$	f(t) Función teórica $t^2 + 3t$
0	0**	$2(0) + 3 = 3$	0
1	$0 + 1(3) = 3$	$2(1) + 3 = 5$	$1^2 + 3(1) = 4$
2	$3 + 1(5) = 8$	$2(2) + 3 = 7$	$2^2 + 3(2) = 10$
3	$8 + 1(7) = 15$	$2(3) + 3 = 9$	$3^2 + 3(3) = 18$

$\Delta t = 1$  {



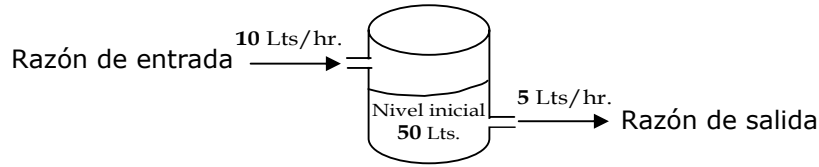
\*\* Dato del problema  $f(0)=0$

Tomando para  $t = 0...50$  y un incremento  $\Delta t = 1$ , tenemos:



**Ejemplo 2: Simulación del funcionamiento de un tanque**

Se tiene un tanque de 100 litros de capacidad, que posee una entrada por la que ingresa un líquido en forma continua, a razón de 10 lts/hr.; posee además una salida por la que sale el líquido continuamente, a razón de 5 lts/hr.



A las 8:00 horas, el nivel inicial del tanque es de 50 litros. Modele en Arena el sistema descrito, para determinar el volumen que tendrá el tanque a las 16:00 hrs.

**Solución analítica:**

Podemos monitorear paso a paso el cambio del volumen del tanque en el tiempo, por ejemplo cada hora,  $\therefore \Delta t=1$ . Sin embargo, podemos estimar de manera analítica el volumen final del tanque después de 8 horas de funcionamiento.

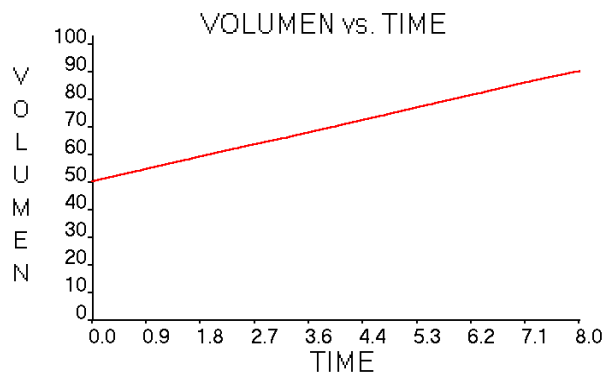
En base a la ecuación de Euler: 
$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x * f'(x)$$

formulamos la siguiente expresión:

$$\text{Volumen final} = \text{Volumen inicial} + (\Delta t) * \underbrace{(\text{Razón de entrada} - \text{Razón de salida})}_{\text{Razón de cambio}}$$

- 8:00 hrs: Volumen = 50 lts.
- 9:00 hrs: Volumen = 50 + (9hrs - 8hrs) \* (10 - 5) = 55 lts.
- 10:00 hrs: Volumen = 55 + (10hrs - 9hrs) \* (10 - 5) = 60 lts.
- ⋮
- ⋮
- ⋮
- 16:00 hrs: VOLUMEN = 85 + (16hrs - 15hrs) \* (10 - 5) = 90 lts.

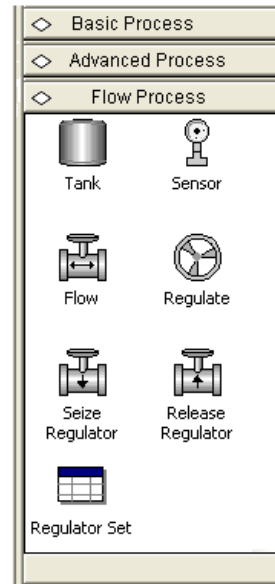
	Tiempo	Estado
1	0	50
2	0.8	54
3	1.6	58
4	2.4	62
5	3.2	66
6	4	70
7	4.8	74
8	5.6	78
9	6.4	82
10	7.2	86
11	8	90



**Respuesta:** Al término de la simulación, después de 8 horas continuas de funcionamiento del tanque, el volumen final será de 90 litros.

## 2. MODELADO DE PROCESOS DE FLUJO

El software Arena provee una plantilla denominada "Flow Process", la cual utilizaremos para modelar sistemas continuos y combinados.

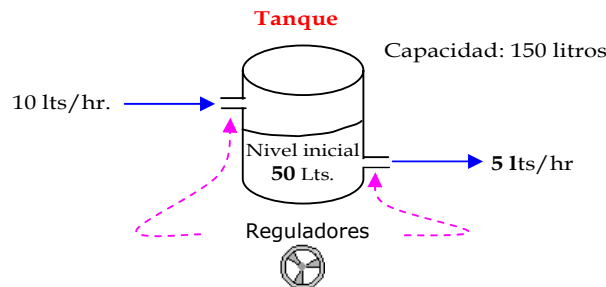


### 2.1 Módulo TANK

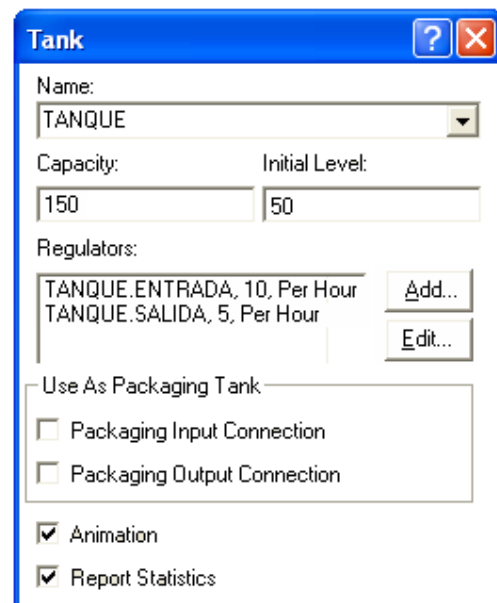
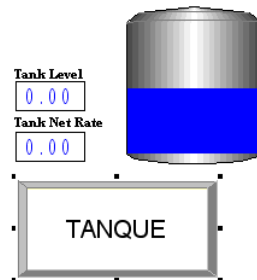


Define una ubicación donde el material es depositado o retenido.

*Ejemplo:*



Representación en Arena:



#### Reguladores

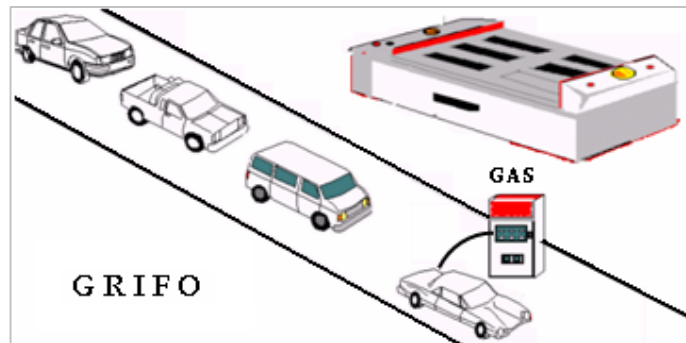
Son dispositivos o mecanismos que permiten el ingreso de flujo al tanque o la salida de flujo del tanque; así, toda operación de ingreso/salida de flujo debe realizarse a través de un regulador. Los reguladores de un tanque se declaran en el módulo TANK, con sus correspondientes tasas de flujo asociadas.

## 2.2 Módulos: SEIZE REGULATOR → FLOW → y RELEASE REGULATOR

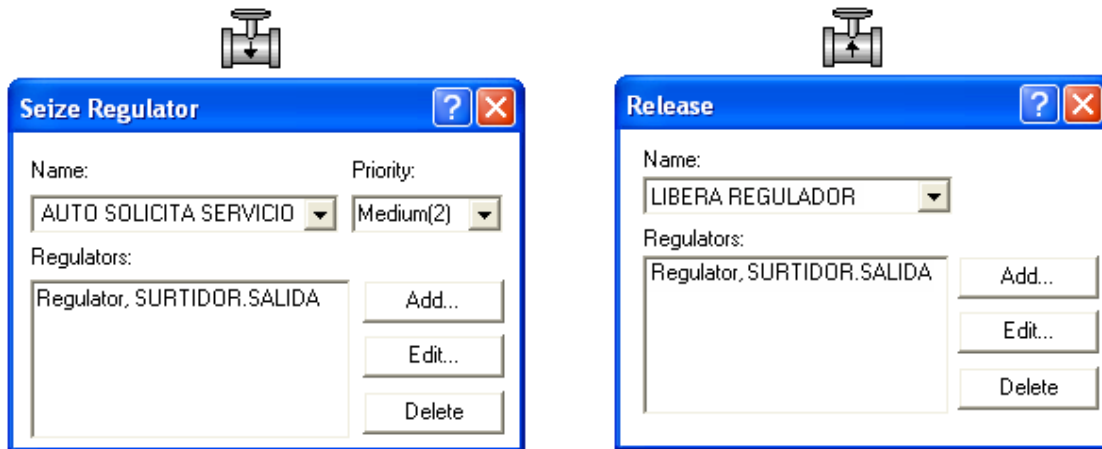
Cuando se crea un tanque, Arena crea un Recurso Regulador que permite definir una entrada o salida del tanque y puede ser usado por **solo una operación de flujo**, en un mismo tiempo. Al término de la operación, ingresar o extraer flujo, el recurso se libera.

*Ejemplo:*

En la figura, el Regulador está representado por la manguera del surtidor de combustible, que podrá ser utilizado por un auto a la vez.



Cada auto solicita la manguera (*Seize*), luego se realiza el llenado (*Flow*) y, al terminar, se libera el recurso regulador (*Release*).



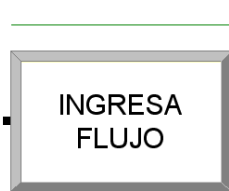
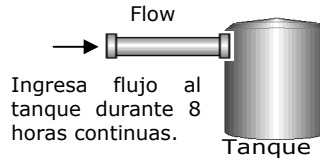
## 2.3 Módulo FLOW



Este módulo es usado junto con el módulo Tank, para ejecutar operaciones de flujo, ya sea ingresando flujo a un tanque (*Add*), extrayendo flujo de un tanque (*Remove*) o transfiriendo flujo de tanque a tanque (*Transfer*).



Ejemplo:



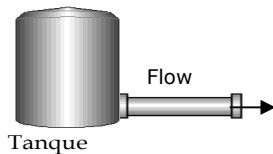
La entidad que ingresa al módulo Flow permanecerá en este hasta que se cumpla alguno de los siguientes indicadores:

- Cantidad especificada
- Tiempo especificado
- Señal especificada

Add / Remove / Transfer

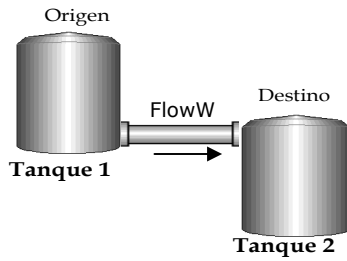
Regulador a utilizar asociado a la tasa de entrada del flujo (especificado en el módulo Tank).

Ejemplo:



Descargar un volumen igual a UNIF(20,24).

Ejemplo:



El tanque 2 recibirá un flujo del tanque 1 hasta que se produzca la señal 1. La transferencia de flujo termina cuando se detecta (mediante un sensor) que el Tanque 1 quedó vacío. Este sensor es el que envía la señal al módulo Flow.

## 2.4 Módulo SENSOR



Este módulo monitorea continuamente en el tiempo el nivel o volumen del elemento contenido en un tanque; por lo tanto, puede detectar el cruce de algún nivel o volumen especificado, ya sea en una dirección de ascenso (positivo) o de descenso (negativo).

Ejemplo:



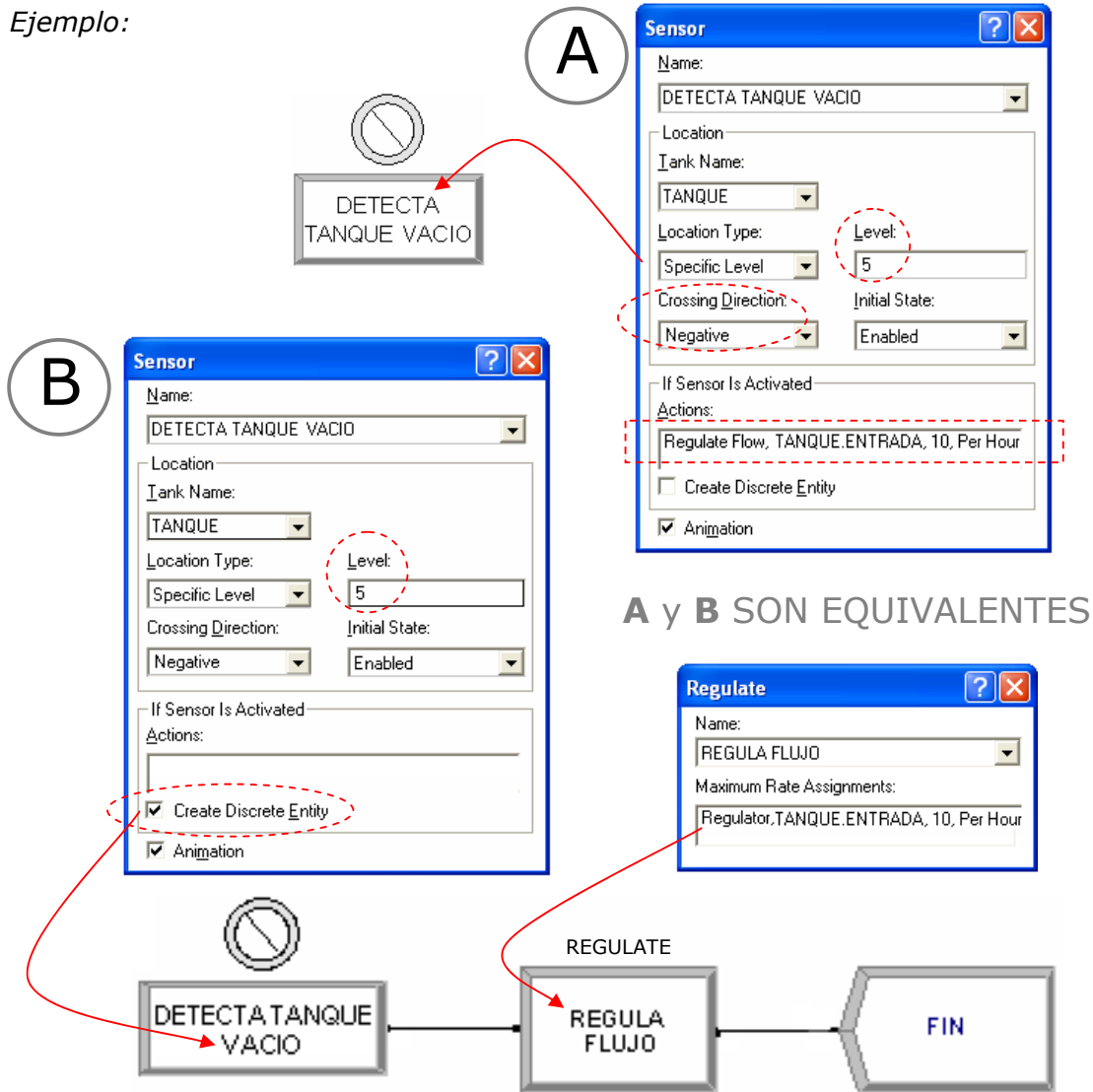
Dirección de cruce positivo. Detectará cuando el tanque alcance un volumen de 850 en subida.

Nivel del tanque que se desea detectar.

El sensor puede habilitarse o deshabilitarse aquí o durante la simulación (por asignación 1/0) mediante la variable: SENSORSTATE(sensorID)

Acción por realizar si se detecta la situación planteada. En el ejemplo, si detecta que el nivel subió a 850 (tanque lleno), entonces anula el flujo de ingreso al tanque.

Ejemplo:

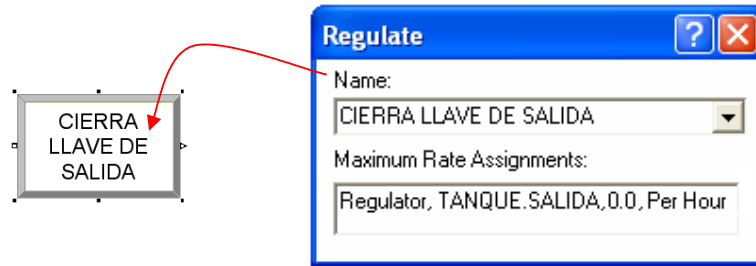


## 2.5 Módulo REGULATE

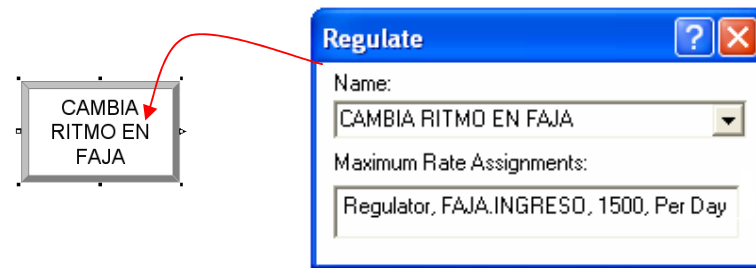
Este módulo puede ser usado para alterar la tasa de un regulador, también puede ser usado para simular una acción que permita abrir una válvula o cerrar una válvula. Provee un control discreto para asignar el máximo ratio o tasa del regulador o reguladores definidos en los tanques. Existen tres formas de asignar valores o cambiar las tasas de los reguladores:

- Mediante el módulo Tank, para asignarle un valor inicial a la tasa del regulador.
- Mediante el módulo Sensor, si se detecta determinado nivel, entonces se puede tomar como acción, modificar la tasa del regulador.
- Mediante el módulo Regulate se puede cambiar la tasa, en forma dinámica en el modelo, durante la simulación.

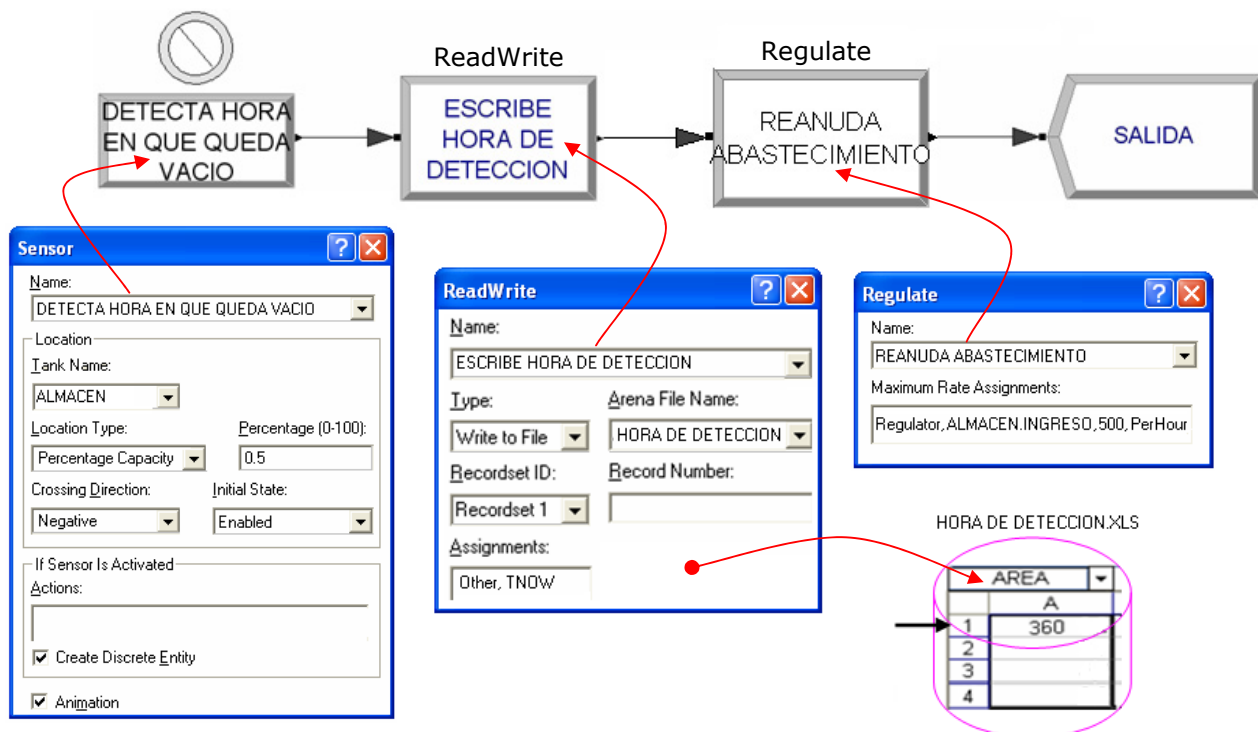
Ejemplo:



Ejemplo:



Ejemplo:



El sensor detecta el instante en que el almacén queda vacío (0.5%), entonces escribe la hora en un archivo externo "hora de detección", esto sucede a las 360 horas. Seguidamente, se reinicia el abastecimiento al almacén a razón de 500 kg/h.

1

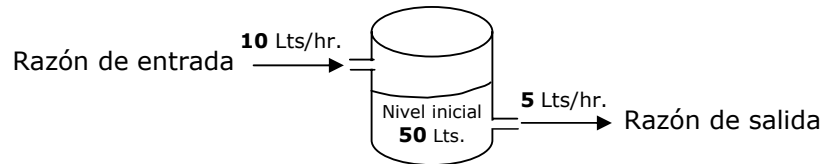
Caso de estudio

Simulación de la variación del nivel del tanque

Objetivos:

- Modelado de sistemas continuos.
- Aplicación práctica de la plantilla Flow process (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) en el software Arena.

Se tiene un tanque de 100 litros de capacidad que posee una entrada por la que ingresa un líquido en forma continua, a razón de 10 lts/hr.; posee, además, una salida por la que sale el líquido continuamente, a razón de 5 lts/hr.



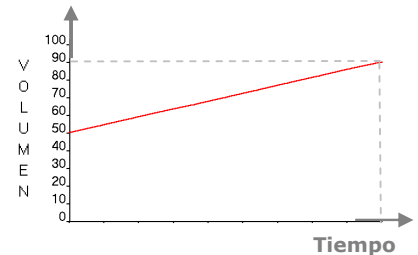
A las 8:00 horas, el nivel inicial del tanque es de 50 litros. Modele en Arena el sistema descrito, para determinar el volumen que tendrá el tanque a las 16:00 horas.

**Solución analítica**

Podemos monitorear, paso a paso, el cambio en el tiempo, el volumen del tanque, por ejemplo cada hora,  $\Delta t=1$ . Sin embargo, podemos estimar de manera analítica el volumen final:

$$\text{VOLUMEN FINAL} = \text{Volumen inicial} + (\Delta t) * \underbrace{(\text{Razón de Entrada} - \text{Razón de Salida})}_{\text{Razón de cambio}}$$

- 8:00 hrs: Volumen = 50 lts.
- 9:00 hrs: Volumen = 50 + (9hrs - 8hrs) \* (10 - 5) = 55 lts.
- 10:00 hrs: Volumen = 55 + (10hrs - 9hrs) \* (10 - 5) = 60 lts.
- ⋮
- ⋮
- 16:00 hrs: Volumen = 85 + (16hrs - 15hrs) \* (10 - 5) = 90 lts.



Respuesta: Después de 8 horas continuas, el volumen final del tanque será de 90 litros.

**Escenario 1**

Se desea simular el sistema durante 100 horas continuas y considerar lo siguiente: Si el tanque se llena, entonces cerrar el ingreso del líquido; si el tanque queda vacío, reanudar el ingreso del líquido. Se considera que el tanque está lleno cuando alcanza los 95 litros, y está vacío cuando desciende a 5 litros.


**Escenario 2**

Respecto al Escenario 1, se desea regular el flujo de salida de la siguiente manera: a las 12 horas se aumenta el ratio de 5 a 7.5 lts/hr. y permanece con este durante 12 horas, luego se restablece al flujo normal de salida (5 lts/hr.), finalmente el ciclo se repite. Simular durante 100 horas continuas.

## Solución

Tank Level  
0.00

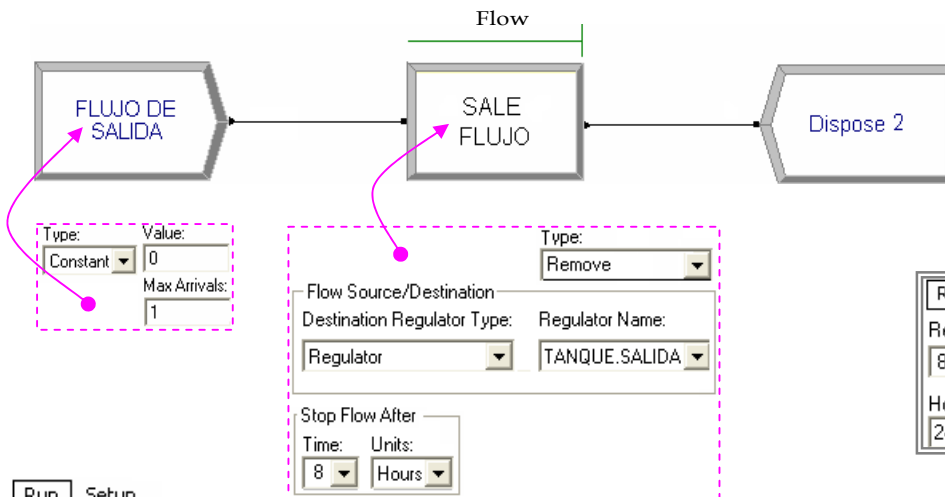
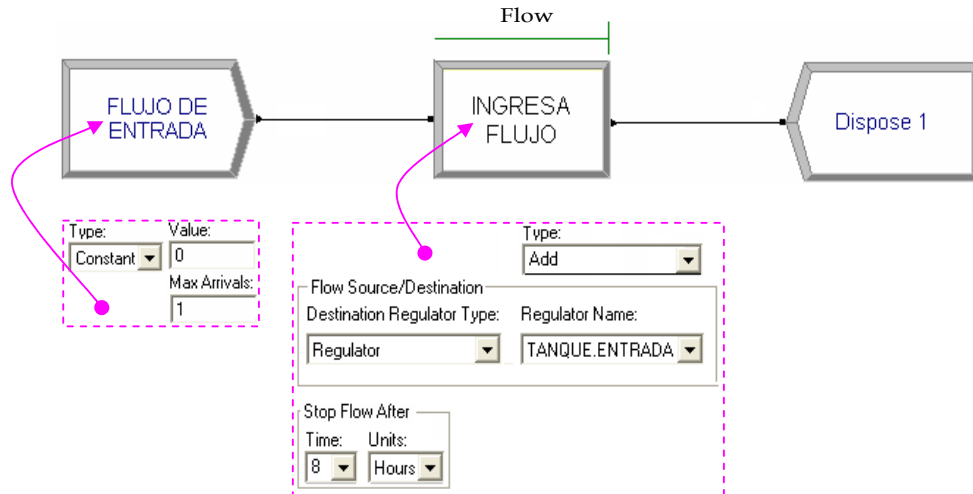
Tank Net Rate  
0.00



TANQUE

Capacity: 100 Initial Level: 50

Regulators:  
TANQUE.ENTRADA, 10, Per Hour  
TANQUE.SALIDA, 5, Per Hour



Run Setup...

Replication Length: 8 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Hours

Run Setup...

Project Parameters

Project Title: CASO 1

Analyst Name:

Project Description:

Statistics Collection

Costing  Queues  Transporters

Entities  Processes  Conveyors

Resources  Stations  Activity Areas

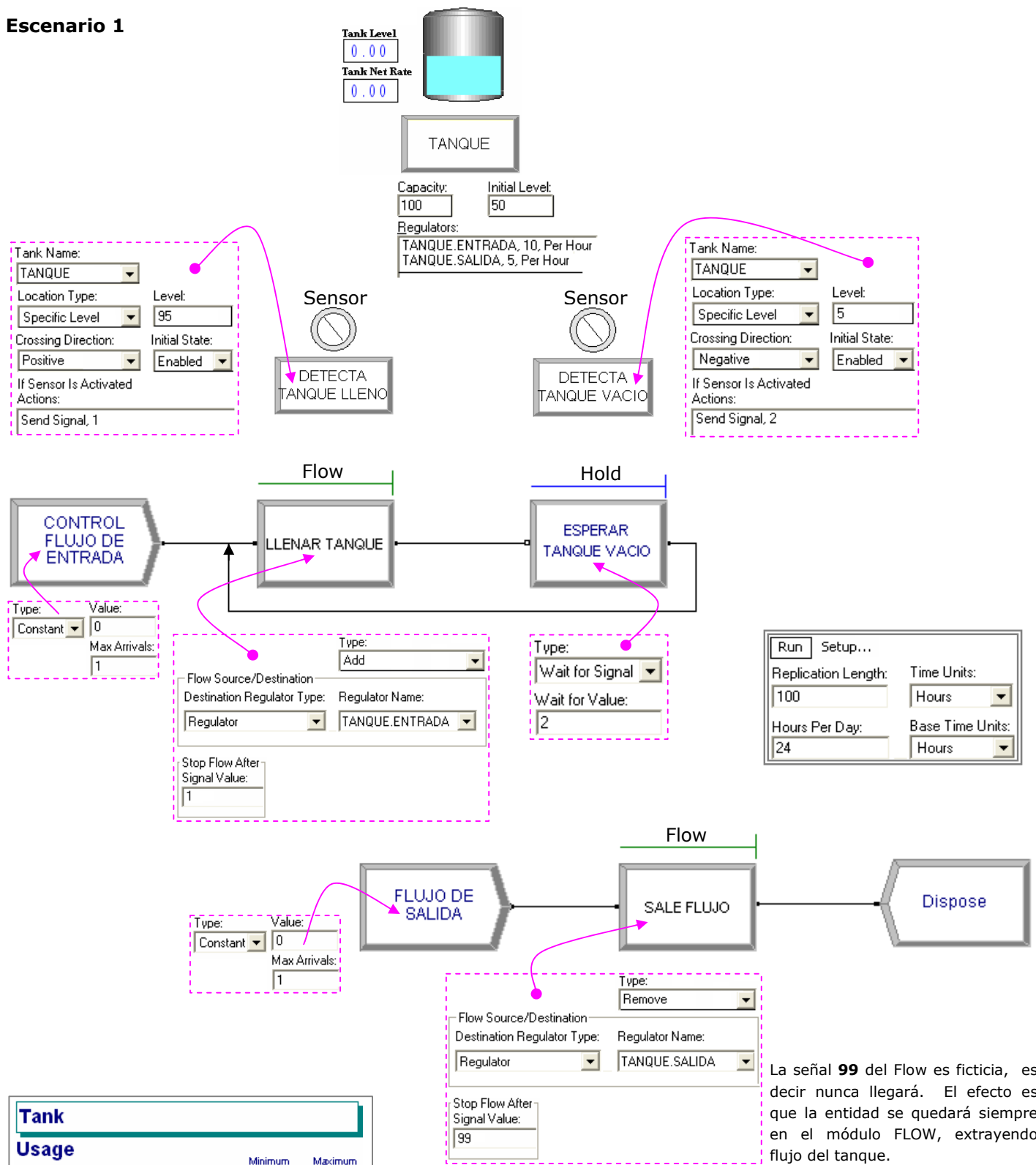
Tanks

### Interpretación del Reporte:

- Se cargaron **80 litros** durante la simulación.
- Se descargaron **40 litros** durante la simulación.
- Los niveles mínimo y máximo del tanque se mantuvieron entre **50 y 90 litros**
- El nivel promedio del tanque fue de **70 litros**.

Tank			
Usage			
Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
TANQUE	70.0000	50.0000	90.0000
Total Quantity Added		Value	
TANQUE	80.0000		
Total Quantity Removed		Value	
TANQUE	40.0000		

**Escenario 1**



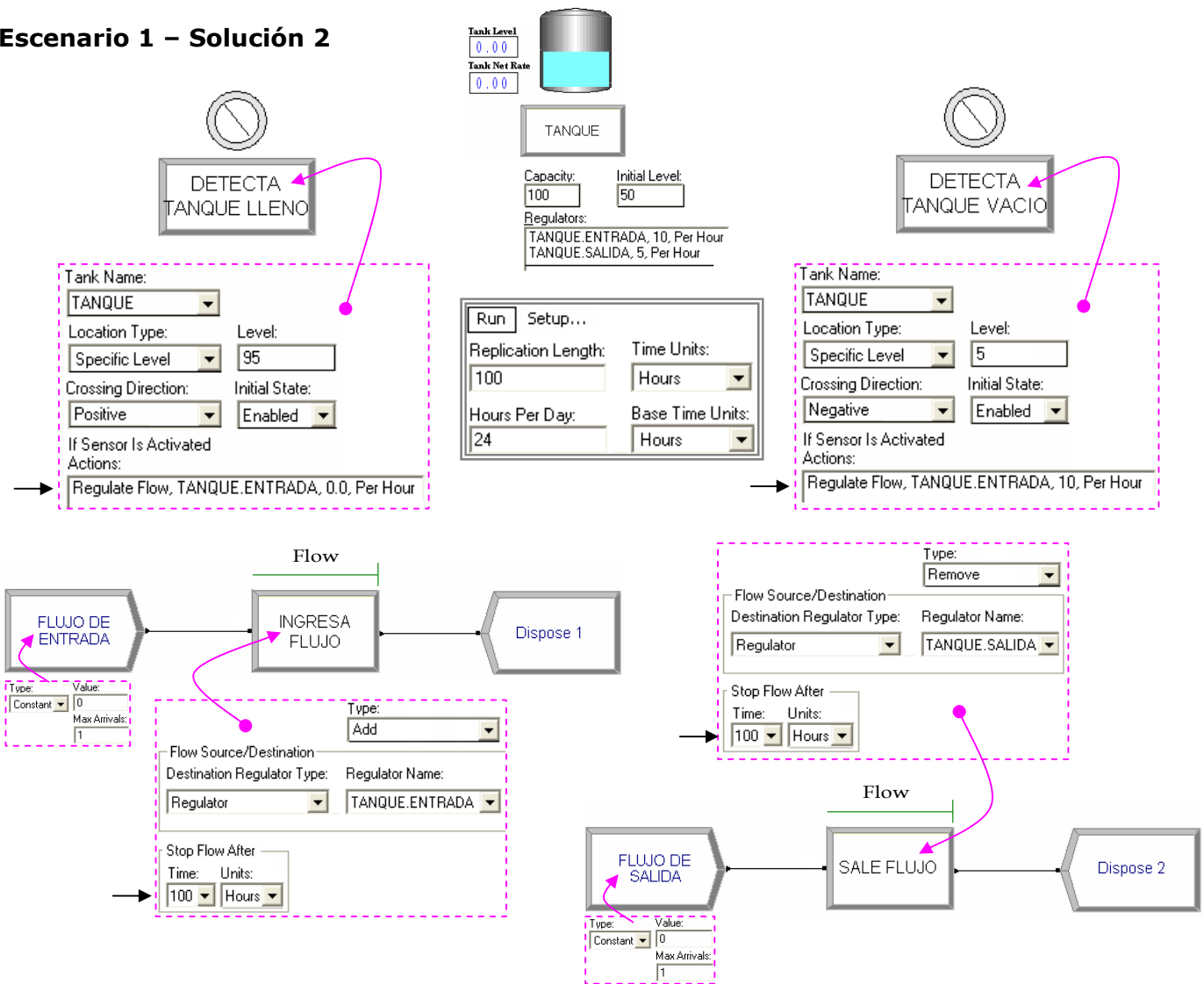
La señal **99** del Flow es ficticia, es decir nunca llegará. El efecto es que la entidad se quedará siempre en el módulo FLOW, extrayendo flujo del tanque.

**Interpretación del Reporte:**

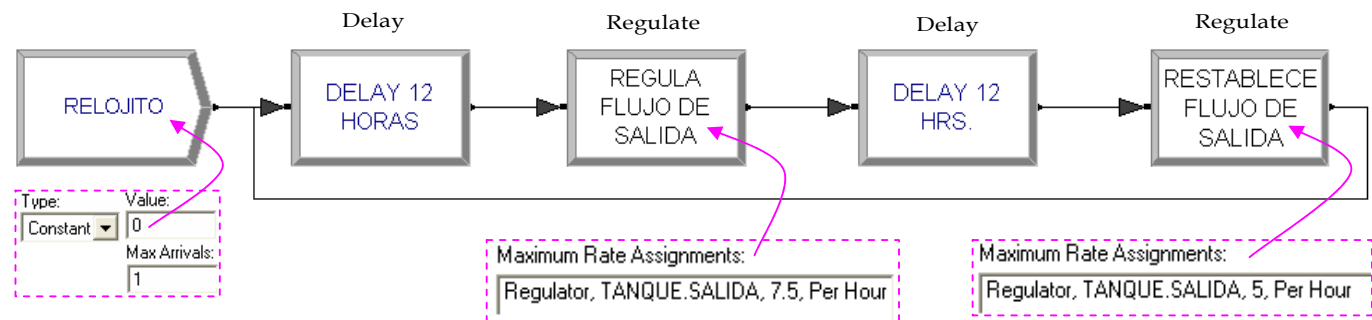
- Se cargaron **460 Lts.** durante la simulación.
- Se descargaron **500 Lts.** durante la Simulación.
- Los niveles mínimo y máximo del Tanque, se mantuvieron entre **5 y 95 Lts.**
- El nivel promedio del tanque fue **51.6 Lts.**
- La descarga fue mayor que la carga del tanque debido a que el flujo de entrada fue intermitente.

Tank Usage			
Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
TANQUE	51.6000	5.0000	95.0000
Total Quantity Added		Value	
TANQUE	460.00		
Total Quantity Removed		Value	
TANQUE	500.00		

### Escenario 1 – Solución 2



### Escenario 2



**Conclusiones:**

- En este escenario se afecta al Flujo de Salida, mientras que en el escenario anterior se afecta al Flujo de Entrada.
- Se cargaron 580 litros y se descargaron 620 litros durante la Simulación.
- La descarga fue mayor que la carga del tanque debido a que el flujo de entrada fue intermitente y el flujo de Salida aumentó en algunos intervalos, de 5 a 7.5 litros por hora.

Run Setup...

Replication Length: 100 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Hours

Tank Usage			
Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
TANQUE	51.6000	5.0000	95.0000
Total Quantity Added		Value	
TANQUE	580.00		
Total Quantity Removed		Value	
TANQUE	620.00		



## 2

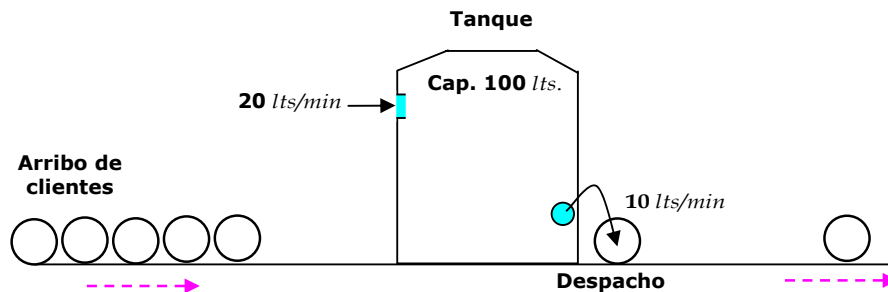
## Caso de estudio

**Venta de un líquido a granel**

## Objetivos:

- Forma de sistemas combinados. Convergencia de sistemas continuos con eventos discretos.
- Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) del software Arena.

Una empresa abastece de un líquido para limpieza de muebles a sus clientes. Para ello cuenta con un tanque para almacenar su producto, que tiene una capacidad de 100 litros y una tasa de salida de 10 litros por minuto. Los clientes llegan a la empresa de acuerdo a una distribución EXPO(5) minutos, para comprar una cantidad correspondiente a una TRIA(4, 6, 8) litros.

**Proceso de llenado del tanque**

Es un proceso intermitente. El tanque se reabastece cuando el nivel desciende a 8 litros o menos, entonces se abastece el tanque de líquido a una tasa de entrada de 20 litros por minuto; durante el proceso de llenado, cuando el nivel del tanque alcanza el 50% de su capacidad, entonces se disminuye la tasa de entrada a 15 litros por minuto. El abastecimiento se detiene cuando se llene el tanque.

**Condiciones iniciales**

Considere que al inicio el tanque está lleno, por lo tanto, el ratio de ingreso vigente es la tasa normal, que corresponde a 20 lts/min.

Se pide:

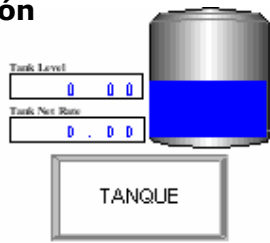
1. Formular un modelo para simular el sistema descrito. Simule el sistema descrito durante 120 horas continuas y obtenga estadísticas sobre los siguientes indicadores de desempeño:

- Tiempo promedio de permanencia de los clientes en el sistema.
- Volumen mínimo, promedio y máximo del tanque durante la simulación.
- Volumen total del líquido que ingresó durante la simulación.
- Volumen total del líquido que se vendió durante la simulación.
- ¿Cuántas veces se llenó el tanque?
- Consumo promedio por cliente.

2. Intente resolver el caso por un método alternativo al modelo original.

# Solución

1.



Name: TANQUE

Capacity: 100 Initial Level: 100

Regulators:  
TANQUE.FLUJO ENTRADA, 20, Per Minute  
TANQUE.FLUJO SALIDA, 10, Per Minute

REGULADORES

## Sensor



DETECTA TANQUE LLENO

Location: Tank Name: TANQUE

Location Type: Specific Level Level: 100

Crossing Direction: Positive Initial State: Enabled

If Sensor Is Activated  
Actions:  
Send Signal, 1  
Assign Variable, CUENTA, CUENTA + 1

Create Discrete Entity

## Sensor



DETECTA LIMITE MEDIO

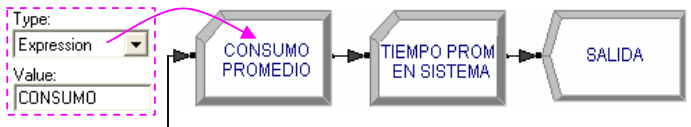
Location: Tank Name: TANQUE

Location Type: Percentage Capacity Percentage (0-100): 50

Crossing Direction: Positive Initial State: Enabled

If Sensor Is Activated  
Actions:  
Regulate Flow, TANQUE.FLUJO ENTRADA, 15, Per Minute

Create Discrete Entity



Assignments:  
Attribute, HORA ARRIBO, TNOW



Random(Expo)  
5 Minutes

Run Setup...

Replication Length: 120 Time Units: Hours

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes

Variable

Name	Report Statistics
1 CUENTA	<input checked="" type="checkbox"/>

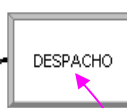
## Seize Regulator



Name: SOLICITA TURNO

Regulators: Regulator, TANQUE.FLUJO SALIDA

## Flow



Type: Remove

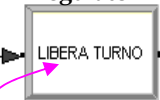
Regulator Name: TANQUE.FLUJO SALIDA

Stop Flow After Quantity: TRIA(4,6,8)

Quantity Save Attribute: CONSUMO

Proporciona la tasa de salida.

## Release Regulator



Name: LIBERA TURNO

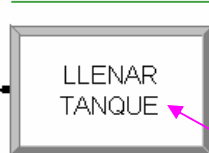
Regulators: Regulator, TANQUE.FLUJO SALIDA



Sensor

DETECTA TANQUE VACIO

## Flow



Location: Tank Name: TANQUE

Location Type: Specific Level Level: 8

Crossing Direction: Negative Initial State: Enabled

If Sensor Is Activated  
Actions:  
Regulate Flow, TANQUE.FLUJO ENTRADA, 20, Per Minute

Create Discrete Entity

Name: LLENAR TANQUE Type: Add

Flow Source/Destination: Destination Regulator Type: Regulator Name: Regulator, TANQUE.FLUJO ENTRADA

Stop Flow After Quantity: Time: Minutes

Signal Value: 1

Proporciona la tasa de entrada.

Tank			
Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
TANQUE	56.0988	8.0000	100.00
<b>Total Quantity Added</b>			
TANQUE	8736.09	Value	
<b>Total Quantity Removed</b>			
TANQUE	8754.43	Value	
User Specified			
Interval	Average		
TIEMPO PROM. EN SISTEMA	0.6313		
Expression	Average		
CONSUMO PROMEDIO	5.9635		
Variable	Maximum Value		
CUENTA	85.0000		

2. Realizar los siguientes cambios:

- Eliminar Sensor: "Detecta tanque lleno"
- Cambiar la señal 1: del Flow "Llenar tanque"

por: Stop Flow After Quantity: 100 - TANKLEVEL(TANQUE)



## Caso de estudio

**Funcionamiento de una moledora de maíz<sup>1</sup>****Objetivos:**

Modelado de sistemas continuos. Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Seizer Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) del software Arena.

Considere una moledora de maíz conformada por una tolva (donde se pone el maíz en grano), por una trituradora que muele el maíz y por una rampa que se usa para llenar los costales con el maíz molido.

La tolva tiene una capacidad de 1.200 kilos. Se considera vacía cuando el nivel disminuye a 12 kilos o menos. El maíz ingresa a la trituradora con una velocidad de 20 kilos/minuto. La velocidad de la trituradora es de 20 kilos/minuto y es la velocidad con que el maíz molido sale por la rampa.

El maíz molido es depositado en costales, que tienen una capacidad de 52 kilos/costal; se considera que el costal está lleno cuando alcanza o sobrepasa los 50 kilos. Una vez lleno el costal, se detiene la descarga de la tolva y se realiza el cambio de costales, esto demora un tiempo uniformemente distribuido entre 0.1 y 0.3 minutos.

Al inicio del proceso, la tolva está completamente llena y ya no se vuelve a recargar.

1. Formule un modelo adecuado a la situación descrita.
2. Simular el sistema hasta que la tolva quede vacía. Obtenga los siguientes indicadores de desempeño:
  - El instante en que la tolva queda vacía.
  - El número de costales completados.
  - Nivel final de la tolva.

**Escenario 1**

Se investiga la posibilidad de que durante el cambio de costal no se detenga la descarga de la tolva y el maíz molido caiga al suelo. Existe interés en saber si la cantidad de maíz molido que cae al piso es significativo y cómo afecta a la cantidad de costales completados. Realice los cambios necesarios al modelo original y dé sus conclusiones.

**Escenario 2**

Considere que la trituradora se traba en intervalos de tiempo uniformemente distribuidos entre 18 y 20 minutos, la operación para destrabarla tarda 15 minutos en promedio. Durante el tiempo que la trituradora está trabada, no le ingresan granos de maíz ni sale maíz molido. Simular hasta que la tolva quede vacía.

<sup>1</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2003-2".

### Solución

**Tank Configuration:**

- Name: LLENAR COSTAL
- Type: Remove
- Flow Source/Destination: Destination Regulator Type: Regulator, Regulator Name: TOLVA.SALIDA
- Stop Flow After Quantity: 50

**TOLVA Tank Properties:**

- Name: TOLVA
- Capacity: 1200
- Initial Level: 1200
- Regulators: TOLVA.SALIDA, 20, Per Minute

**Tank Statistics:**

Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
TOLVA	601.95	11.5422	1200.00

**User Specified Output:**

Output	Value
INSTANTE TOLVA VACIA	64.0837
COSTALES LLENOS	23.0000
NIVEL FINAL TOLVA	11.5422

**Statistic Table:**

Name	Type	Expression
1 INSTANTE TOLVA VACIA	Output	TNOW
2 COSTALES LLENOS	Output	EntitiesOut(COSTAL)
3 NIVEL FINAL TOLVA	Output	TANKLEVEL(TOLVA)

**Run Setup Dialog:**

- Replication Length: Infinite
- Time Units: Hours
- Hours Per Day: 24
- Base Time Units: Minutes
- Terminating Condition: TANKLEVEL(TOLVA) <= 12

### Método alternativo (2 tanques)

**TOLVA Tank Properties:**

- Capacity: 1200
- Initial Level: 1200
- Regulators: TOLVA.SALIDA, 20, Per Minute

**COSTAL Tank Properties:**

- Capacity: 52
- Initial Level: 0.0
- Regulators: COSTAL.ENTRADA, 20, Per Minute

**Flow Process Configuration:**

- DISPARA ENTIDAD: Type: Constant, Value: 0, Max Arrivals: 1
- LLENAR COSTAL: Type: Transfer
- CAMBIAR COSTAL: Delay: UNIF(0.1, 0.3) Minutes
- Assign: Other, Expression: TANKLEVEL(COSTAL), New Value: 0
- DUPLICA ENTIDAD: # of Duplicates: 1

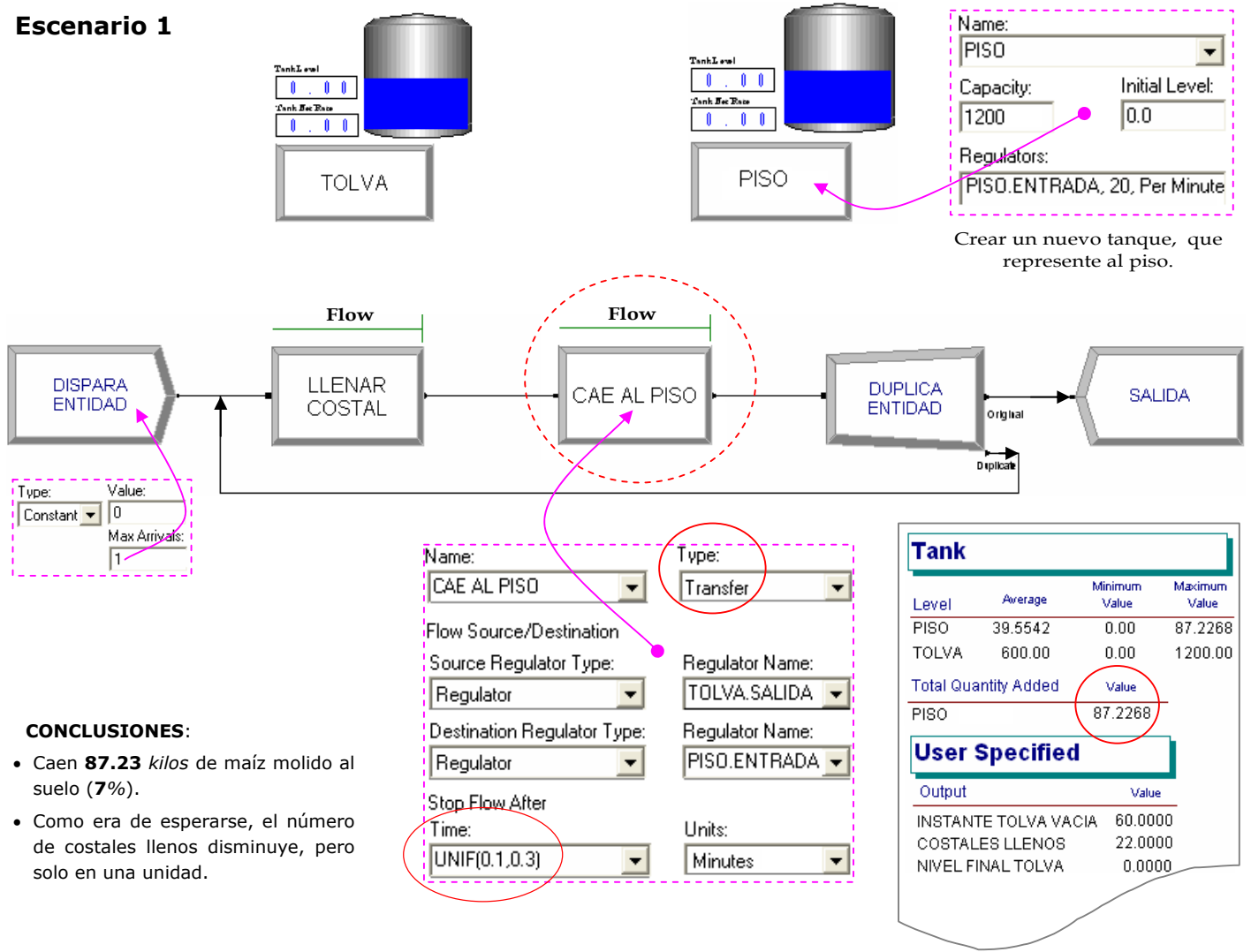
**Tank Statistics:**

Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
COSTAL	26.6451	0.00	50.0000
TOLVA	601.95	11.5422	1200.00

**Total Quantity Added/Removed:**

Output	Value
COSTAL	1188.46
TOLVA	0.00
COSTAL	1150.00
TOLVA	1188.46

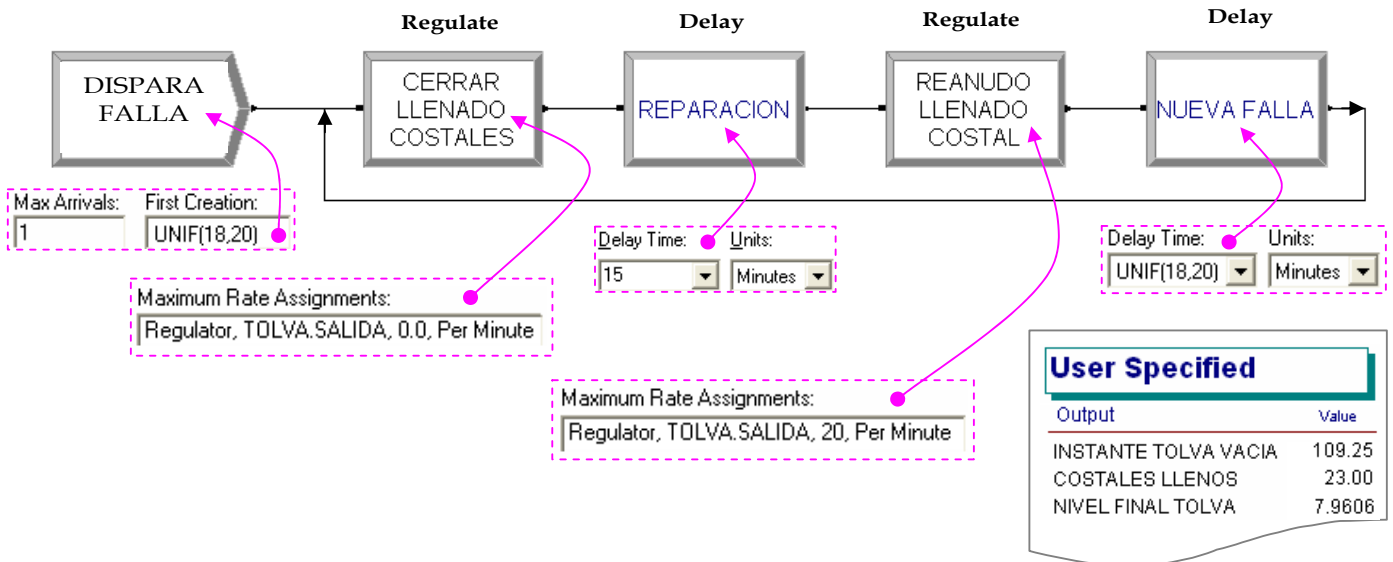
### Escenario 1



**CONCLUSIONES:**

- Caen **87.23 kilos** de maíz molido al suelo (**7%**).
- Como era de esperarse, el número de costales llenos disminuye, pero solo en una unidad.

### Escenario 2



## 4

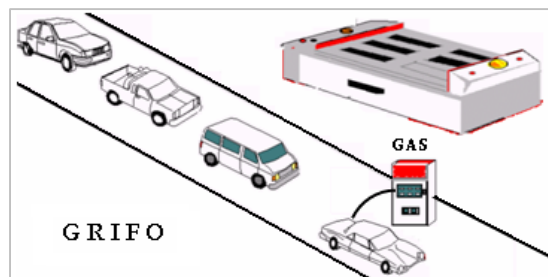
## Caso de estudio

**Venta de combustible en grifo<sup>2</sup>**

## Objetivos:

- Modelado de sistemas combinados.
- Aplicación práctica de los módulos Tank, Seiza Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor, Regulate, Módulo de datos Regulator Set.

Un grifo tiene un solo surtidor frente al cual esperan los vehículos para comprar combustible; los autos son atendidos según orden de llegada, uno a la vez. El arribo de los vehículos al grifo se produce en intervalos de tiempo de acuerdo a una distribución EXPO(10) minutos. Cada vehículo compra una cantidad variable de combustible, según una distribución UNIF(10,20) galones, a un precio de S/.10/galón. Abrir el tanque del auto toma un tiempo despreciable; cobrar y cerrar el tanque de combustible toma un tiempo UNIF(1,3) minutos. El surtidor tiene un sistema que permite la salida del combustible a una tasa de 5 galones/minuto.



El tanque del cual se abastece el surtidor tiene capacidad para 500 galones y al inicio el tanque tiene combustible hasta la mitad. Cuando el tanque llega a tener 50 galones o menos, se activa una señal que indica al encargado que debe detener la atención de los vehículos y accionar una válvula que permite el ingreso de combustible al tanque del surtidor, a razón de 25 galones/minuto, hasta completar su capacidad; se debe realizar este procedimiento todas las veces que resulte necesario. Si la señal se activa cuando un vehículo se encuentra recibiendo combustible, el abastecimiento al vehículo se detiene momentáneamente y se reanuda cuando el tanque del surtidor alcance el 25% de su capacidad, mientras tanto el vehículo espera y no se retira.

Se desea simular el sistema durante 7 días; considere que el grifo atiende las 24 horas continuamente. Determine los siguientes indicadores de desempeño:

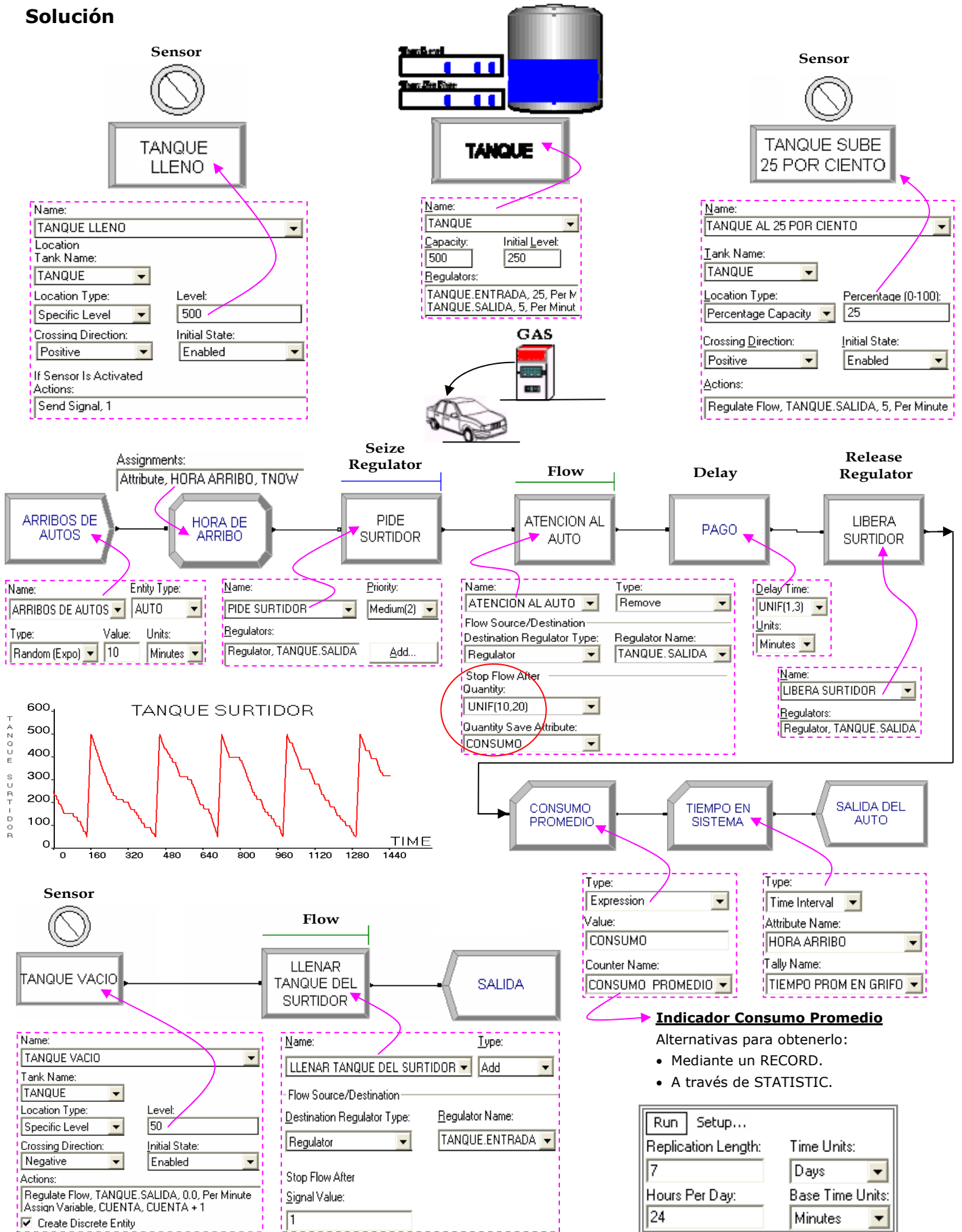
- Tiempo promedio de los vehículos en el grifo.
- Cantidad total de galones vendidos y facturación semanal.
- Consumo promedio por vehículo.
- Número de veces que el tanque del surtidor tuvo que ser llenado.
- Tiempo promedio de espera de los vehículos y tamaño promedio de cola.
- Volumen del tanque del surtidor, al final de la simulación.

**Escenario**

Suponga que se desea simular el comportamiento del sistema considerando que se pueden atender dos autos simultáneamente. Es decir, existen dos mangueras que se utilizan en forma alternada. Considere la misma tasa de salida para ambos surtidores.

<sup>2</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen final 2005-0".

**Solución**



Variable

	Name	Report Statistics
1	CUENTA	<input checked="" type="checkbox"/>
2	COSTO	<input type="checkbox"/>

Initial Values

10

Statistic

	Name	Type	Expression
1	CLIENTES ATENDIDOS	Output	EntitiesOut(AUTO)
2	VENTA TOTAL	Output	TankQtyRemoved(TANQUE)
3	FACTURACION SEMANAL	Output	TankQtyRemoved(TANQUE) * COSTO
4	CONSUMO PROM	Output	TankQtyRemoved(TANQUE) / EntitiesOut(AUTO)
5	VOLUMEN FINAL TANQUE	Output	TankLevel(TANQUE)

User Specified	
<b>Interval</b>	
TIEMPO PROM EN GRIFO	Average 8.9039
<b>Output</b>	
CLIENTES ATENDIDOS	Value 1022.00
VENTA TOTAL	15367.59
FACTURACION SEMANAL	153675.86
CONSUMO PROM	15.0368
VOLUMEN FINAL TANQUE	74.0517
<b>Expression</b>	
CONSUMO PROMEDIO	Average 15.0365
<b>Variable</b>	
CUENTA	Maximum Value 31.0000
<b>Queue</b>	
<b>Waiting Time</b>	
PIDE SURTIDOR.Queue	Average 3.8334
<b>Number Waiting</b>	
PIDE SURTIDOR.Queue	Average 0.3890

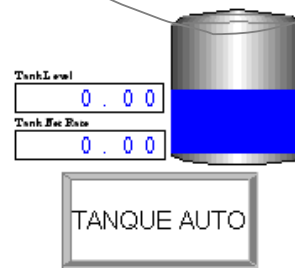
### Solución alternativa: 2 tanques



Name: TANQUE

Capacity: 500 Initial Level: 250

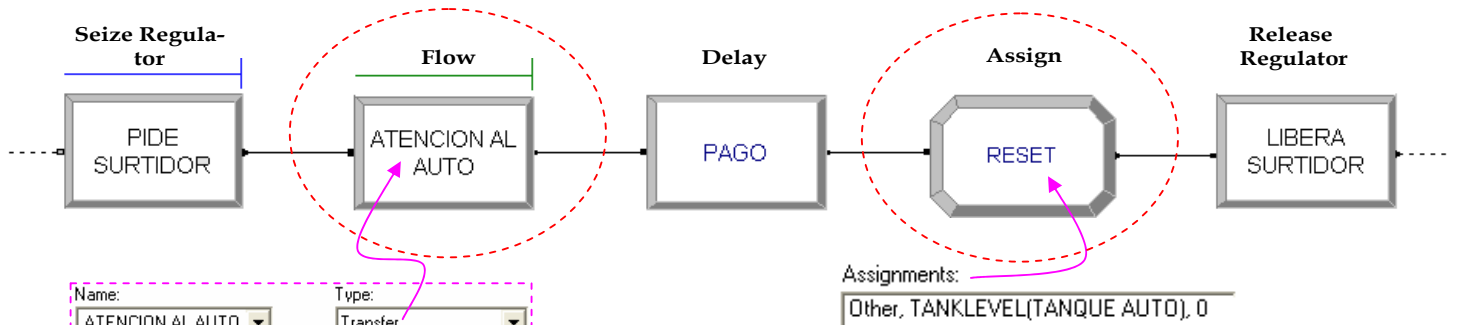
Regulators: TANQUE.ENTRADA, 25, Per Minute; TANQUE.SALIDA, 5, Per Minute



Name: TANQUE AUTO

Capacity: 20 Initial Level: 0.0

Regulators: TANQUE AUTO.ENTRADA, 5, Per Minute



Name: ATENCION AL AUTO Type: Transfer

Flow Source/Destination

Source Regulator Type: Regulator Name: Regulator TANQUE.SALIDA

Destination Regulator Type: Regulator Name: Regulator TANQUE AUTO.ENTRADA

Stop Flow After

Quantity: UNIF(10,20)

Quantity Save Attribute: CONSUMO

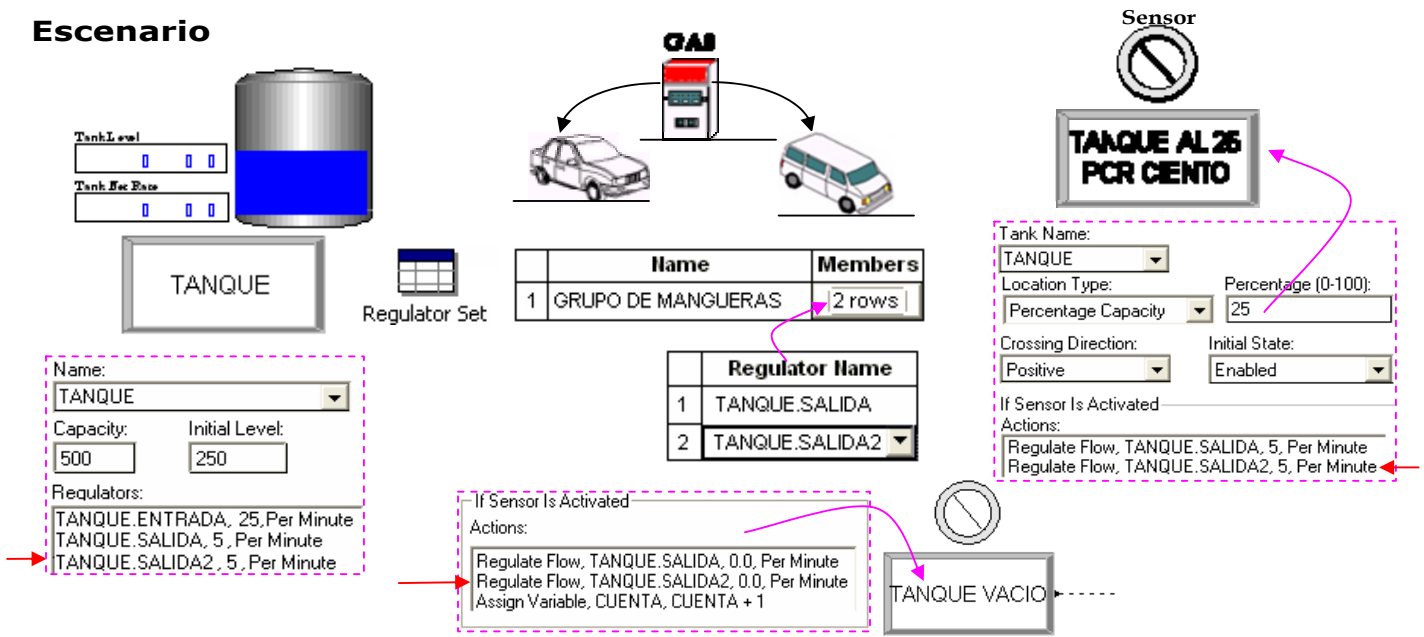
Statistic

	Name	Type	Expression
1	VENTA TOTAL	Output	TankQtyAdded(TANQUE AUTO)
2	FACTURACION SEMANAL	Output	TankQtyAdded(TANQUE AUTO) * COSTO
3	CONSUMO PROM	Output	TankQtyAdded(TANQUE AUTO) / EntitiesOut(AUTO)

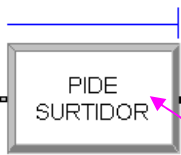
Total Quantity Added	
TANQUE	15191.64
TANQUE AUTO	15367.59
Total Quantity Removed	
TANQUE	15367.34
TANQUE AUTO	15367.59



**Escenario**



**Seize Regulator**



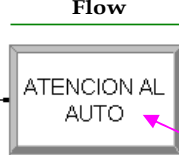
Regulator Type: Regulator Set

Regulator Set Name: GRUPO DE MANGUERAS

Selection Rule: Cyclical

Save Attribute: NUM

**Flow**



Name: ATENCION AL AUTO

Type: Remove

Flow Source/Destination:

Source Regulator Type: Regulator Set

Regulator Set Name: GRUPO DE MANGUERAS

Set Index: NUM

Stop Flow After:

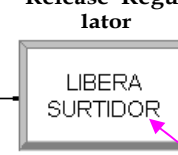
Quantity: UNIF(10,20)

Quantity Save Attribute: CONSUMO

**Delay**



**Release Regulator**



Regulator Type: Regulator Set

Regulator Set Name: GRUPO DE MANGUERAS

Release Rule: Specific Member

Set Index: NUM

User Specified	Antes	Ahora
Interval	Average	Average
TIEMPO PROM EN GRIFO	8.9039	5.3291
Output	Value	Value
CLIENTES ATENDIDOS	1022.00	1014.00
VENTA TOTAL	15367.59	15172.80
FACTURACION SEMANAL	153675.86	151727.98
CONSUMO PROM	15.0365	14.9633
VOLUMEN FINAL TANQUE	74.0517	263.34
Variable	Maximum Value	Maximum Value
CUENTA	31.0000	31.0000
<b>Queue</b>		
Waiting Time	Average	Average
PIDE SURTIDOR.Queue	3.8334	0.2432
Number Waiting	Average	Average
PIDE SURTIDOR.Queue	0.3890	0.02446147

**Conclusiones:**

- Hubo mejoras significativas, sobre todo en la gestión administrativa. Se mejoraron los indicadores relativos a la calidad de atención al cliente.
- El tiempo que permanecen los clientes en el grifo bajó en un 40%.
- Ahora el tiempo de espera en cola es 15 veces menor.

## 5

## Caso de estudio

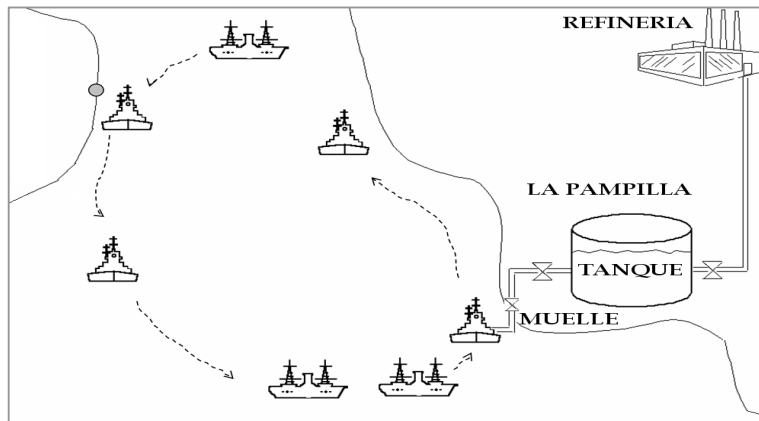
**Operación de un tanque alimentador de una refinería<sup>3</sup>**

## Objetivos:

- Simulación combinada. Convergencia de sistemas continuos con eventos discretos.
- Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) del software Arena.
- Llenado de un tanque como "Discreto", mediante la variable Tanklevel.

Una flota de 15 barcos petroleros transportan crudo desde un puerto venezolano hasta la refinería de La Pampilla. Dado el caso, los barcos podrían ser cargados simultáneamente en el puerto venezolano, si fuera necesario.

En La Pampilla existe solo un muelle de descarga, de tal forma que si coinciden en la llegada dos o más barcos, estos deben esperar hasta que les corresponda su turno. El barco que arribó al muelle debe descargar el crudo en un tanque de almacenamiento a una velocidad constante de 300 mil barriles por día (mb/día). El muelle de descarga está abierto desde las 6 a.m. hasta las 12 m. Consideraciones de seguridad exigen detener la descarga del crudo cuando el muelle está cerrado.



- Flota: 15 barcos
- Capacidad nominal del barco: 150 mb.
- Nivel mínimo del barco: 5 mb. (vacío)
- Operación de carga: UNIF(2.9, 3.1) días
- Viaje con carga: NORM(5, 1.5) días
- Viaje sin carga: NORM(4, 1) días

<sup>3</sup> Enunciado tomado de PRITSKER, A. y J. O'REILLY. *Simulation with visual SLAM and AweSim*, 1999.

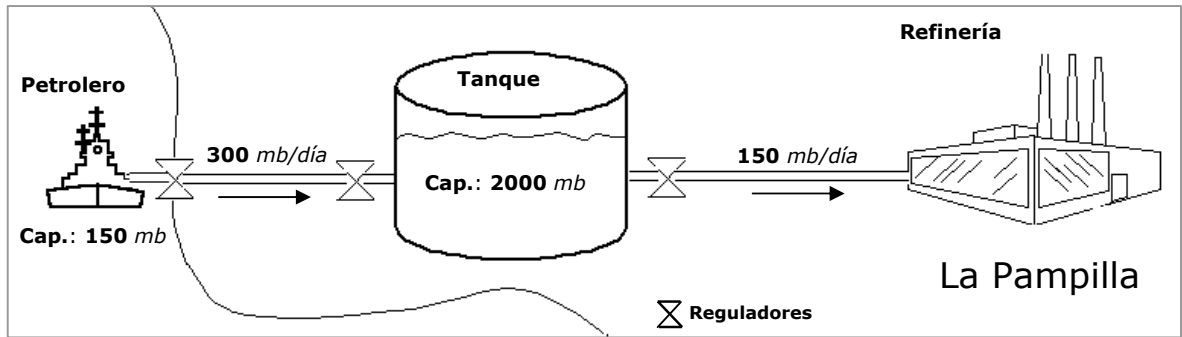
El tanque de almacenamiento suministra el crudo a la refinería continuamente a través de un oleoducto, a una tasa constante de 150 mb/día. El tanque de almacenamiento tiene una capacidad de 2.000 mb, cuando se llena, la descarga del barco se detiene hasta que la cantidad en el tanque disminuye al 80% de su capacidad. Cuando el tanque de almacenamiento está muy cerca de quedar vacío (menos de 5 mb), el suministro a la refinería se detiene hasta que se alcanza un nivel de 50 mb, con la finalidad de evitar paradas y arranques frecuentes de la refinería.

Condiciones iniciales: El tanque está lleno en un 50% de su capacidad. Los barcos arriban al puerto venezolano en intervalos de medio día, empezando a las 00:00 horas.

Simular el sistema descrito por 365 días y obtener los siguientes indicadores:

1. Duración promedio del viaje, ida y vuelta, de los petroleros (tiempo de ciclo).
2. Utilización de los muelles de carga y descarga.
3. Tiempo de espera de los petroleros, en el muelle, para realizar la descarga; cantidad de barcos esperando para descargar el crudo.
4. Duración promedio del proceso de carga.
5. Niveles medio, mínimo, máximo y final; flujo total que ingresó/salió en ambos tanques.
6. Número de veces que quedó vacío el tanque de La Pampilla.
7. Duración promedio de la interrupción del abastecimiento a la refinería.
8. Modele los cambios para medir el tiempo total que no se abasteció a la refinería.

SOLUCIÓN



Tank

Tank Level: 0.00  
Tank Flow Rate: 0.00

**PETROLERO**

Name: PETROLERO  
Capacity: 150 Initial Level: 5  
Regulators: PETROLERO.SALIDA, 300, Per Day

Tank

Tank Level: 0.00  
Tank Flow Rate: 0.00

**TANQUE**

Name: TANQUE  
Capacity: 2000 Initial Level: 1000  
Regulators: TANQUE.ENTRADA, 300, Per Day  
TANQUE.SALIDA, 150, Per Day

**PETROLERO VACIO**

Name: PETROLERO VACIO  
Location: PETROLERO  
Tank Name: PETROLERO  
Location Type: Specific Level Level: 5  
Crossing Direction: Negative Initial State: Enabled  
If Sensor Is Activated: Send Signal, 1

**TANQUE LLENO**

Name: TANQUE LLENO  
Location: TANQUE  
Tank Name: TANQUE  
Location Type: Specific Level Level: 2000  
Crossing Direction: Positive Initial State: Enabled  
If Sensor Is Activated: Regulate Flow, TANQUE.ENTRADA, 0.0, Per Day

**TANQUE BAJA A 1600**

Name: TANQUE BAJA A 1600  
Location: TANQUE  
Tank Name: TANQUE  
Location Type: Percentage Capacity Level: 80  
Crossing Direction: Negative Initial State: Enabled  
If Sensor Is Activated: Regulate Flow, TANQUE.ENTRADA, 300, Per Day

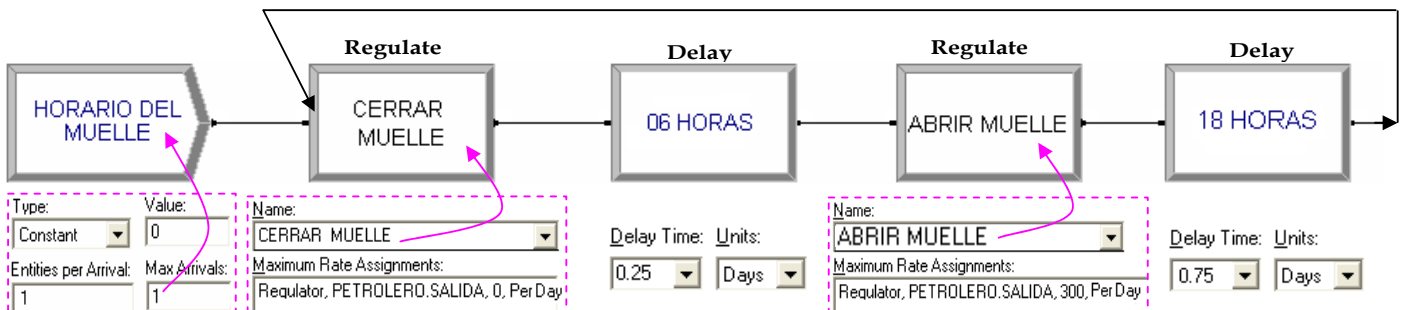
**TANQUE VACIO**

Name: TANQUE VACIO  
Location: TANQUE  
Tank Name: TANQUE  
Location Type: Specific Level Level: 5  
Crossing Direction: Negative Initial State: Enabled  
If Sensor Is Activated: Send Signal, 2

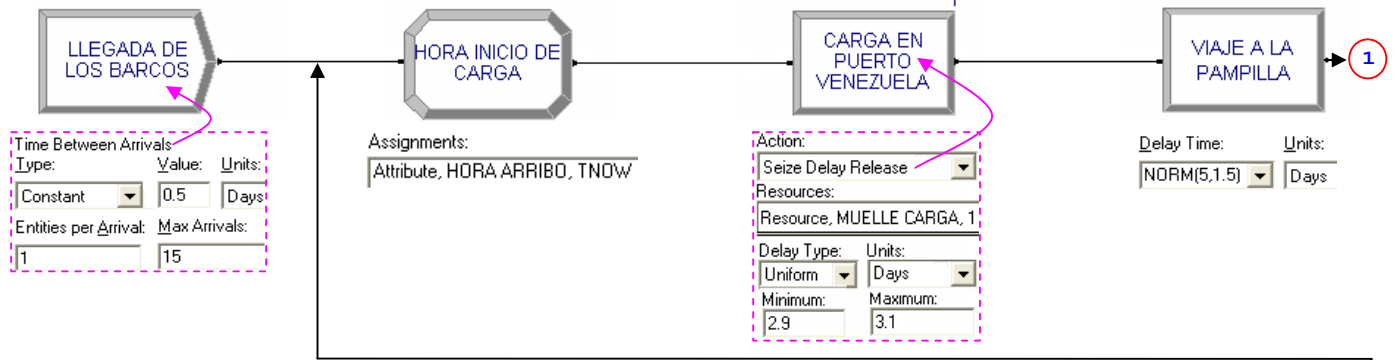
**TANQUE SUBE A 50 MB**

Name: TANQUE SUBE A 50 MB  
Location: TANQUE  
Tank Name: TANQUE  
Location Type: Specific Level Level: 50  
Crossing Direction: Positive Initial State: Enabled  
If Sensor Is Activated: Send Signal, 3

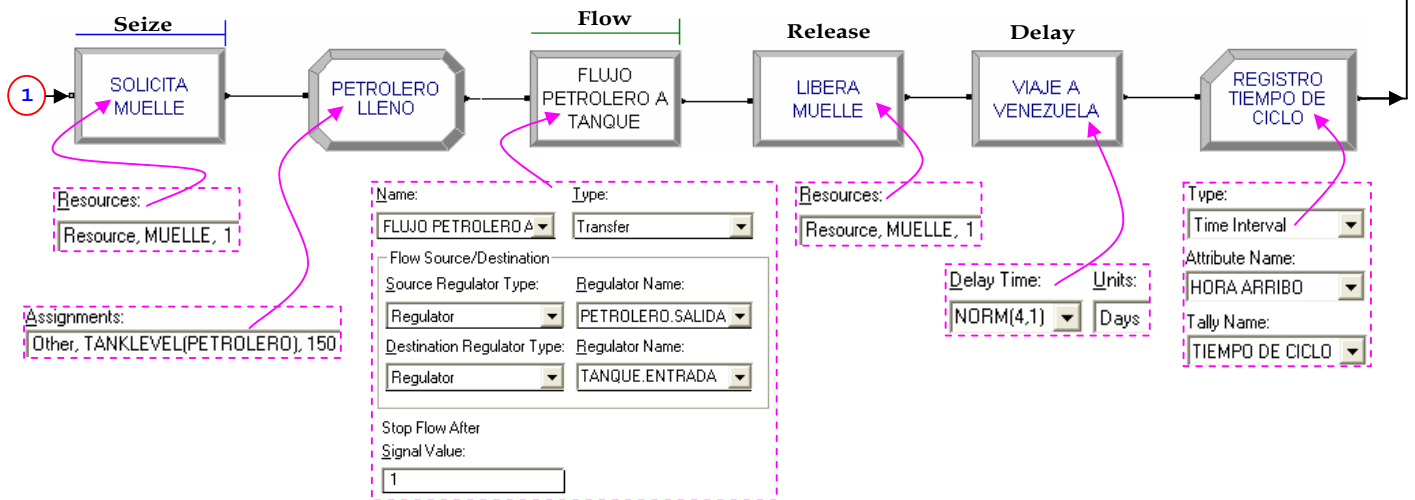
**Horario de trabajo: La Pampilla**



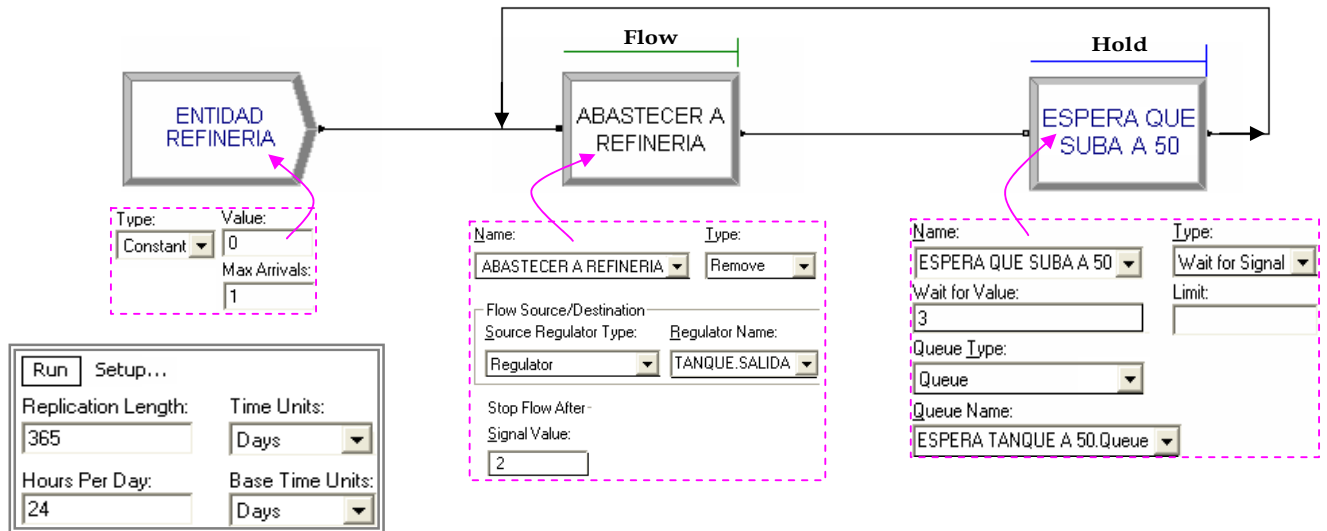
### Proceso de carga: Venezuela



### PROCESO DE DESCARGA: La Pampilla



### Alimentación a refinería:



### Módulos de datos:

		Name		
Resource	1	MUELLE	Fixed Capacity	1
	2	MUELLE CARGA	Fixed Capacity	Infinite
Queue	1	CARGA EN PUERTO VENEZUELA.Queue		
	2	SOLICITA MUELLE.Queue		
	3	ESPERA QUE SUBA A 50.Queue		

## Indicadores de desempeño:

1. Tiempo promedio por viaje, ida y vuelta de los barcos:

User Specified	
Interval	Average
TIEMPO DE CICLO	14.1187

2. Utilización de los muelles:

Resource	
Instantaneous Utilization	Average
MUELLE	0.8740
Number Busy	
Average	
MUELLE CARGA	3.2023

*barcos*

3. Tiempo de espera de los petroleros: **1.33 días**

Tamaño de cola para descargar crudo: **1.39 barcos.**

4. Duración promedio del proceso de carga: **3 días.**

Process			
VA Time Per Entity	Average	Minimum Value	Maximum Value
CARGA EN PUERTO VENEZUELA	2.9960	2.9006	3.0996

Queue			
Waiting Time	Average	Minimum Value	Maximum Value
SOLICITA MUELLE.Queue	1.3331	0.00	5.6456
Number Waiting			
Average	Minimum Value	Maximum Value	
SOLICITA MUELLE.Queue	1.3952	0.00	6.0000

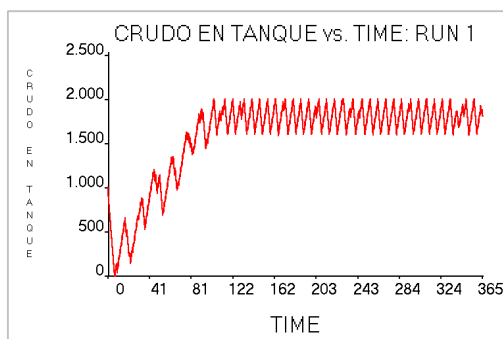
5. Niveles de crudo en el tanque de almacenamiento:

CONTINUOUS-CHANGE STATISTICS				
Identifier	Average	Minimum	Maximum	Final Value
PETROLERO.Level	68.001	5.0000	150.00	35.260
TANQUE.Level	1525.5	5.0000	2000.0	1935.7

Run Setup... Reports

Default Report:

SIMAN Summary Report(.out file)



Tank	
Total Quantity Added	Value
PETROLERO	55390.00
TANQUE	55359.74
Total Quantity Removed	
Value	
PETROLERO	55359.74
TANQUE	54424.00

6. Veces que quedó vacío el tanque:



If Sensor Is Activated

Actions:

Send Signal, 2

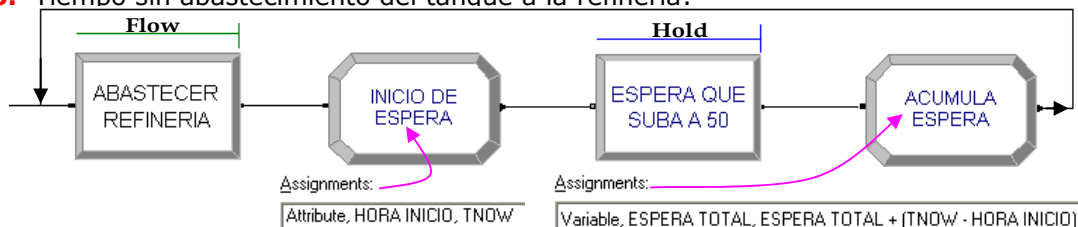
Assign Variable, CUENTA, CUENTA + 1

Time Persistent	
Variable	Maximum Value
CUENTA	2.0000

7. Duración promedio de la interrupción del flujo a la refinería:

Queue	
Waiting Time	Average
ESPERA QUE SUBA A 50.Queue	1.0867

8. Tiempo sin abastecimiento del tanque a la refinería:



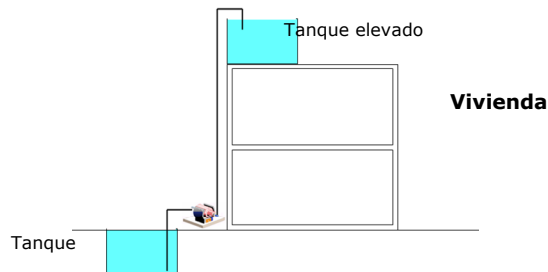
## 6

## Caso de estudio

**Plan de aguas para vivienda<sup>4</sup>****Objetivos:**

Modelado de sistemas continuos. Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) del software Arena.

El sistema de agua de una vivienda consiste en una cisterna ubicada debajo del nivel del suelo de la edificación, y un tanque elevado que alimenta a diferentes pisos. La cisterna tiene una capacidad de 1.500 litros y el tanque elevado tiene una capacidad de 1.000 litros. Inicialmente la cisterna tiene 1.000 litros y el tanque elevado 500 litros.



El ingreso de agua a la cisterna se realiza mediante un flujo de 80 litros por hora y ocurre cuando la cantidad de agua contenida en la cisterna disminuye a 80% de su capacidad; cuando la cisterna se llena, el ingreso de agua cesa.

Una bomba hidroneumática se activa en el primer piso, enviando agua desde la cisterna hacia el tanque elevado, a razón de 100 litros por hora cuando el tanque elevado disminuye a un 50% de su capacidad; cuando el tanque elevado se llena este acceso es cerrado.

El consumo de agua dentro de la vivienda ocurre en intervalos de tiempo distribuidos uniformemente entre 1.5 y 2 horas. Cada consumo dura un tiempo que está distribuido normalmente con media y desviación 0.2 y 0.01 horas, respectivamente. El flujo del consumo es de 60 litros por hora.

Formule un modelo para observar el comportamiento de este diseño. Ejecute el modelo para 30 días, iniciando la simulación un día lunes a las cero horas y determine:

- La cantidad de agua usada durante el período estudiado
- El número de veces que se activó la bomba hidroneumática.

**Escenario**

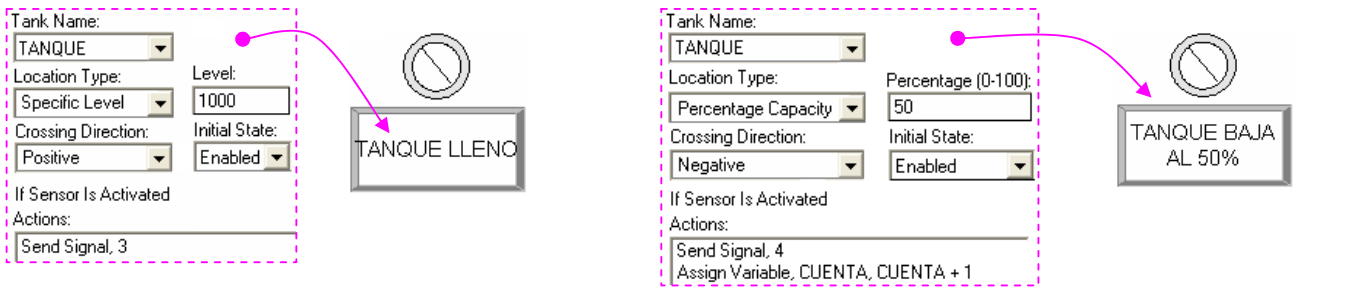
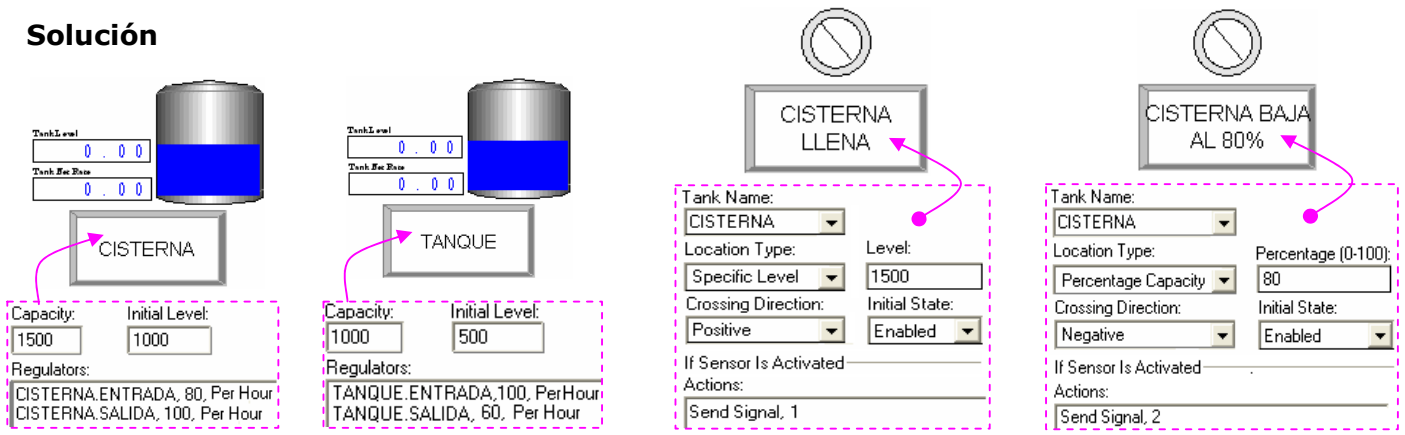
Por razones de seguridad, se debe evitar que la cisterna bombee agua al tanque elevado si su contenido baja al 10% de su capacidad; el bombeo se restituirá cuando el nivel retome el 40% de su capacidad.

Considere que Sedapal, por razones de racionamiento, ha programado cortes de agua para el próximo mes. La programación es: 2 días con agua y 4 días sin agua. La programación empieza el lunes a las cero horas con agua. Realice los cambios al modelo original y determine:

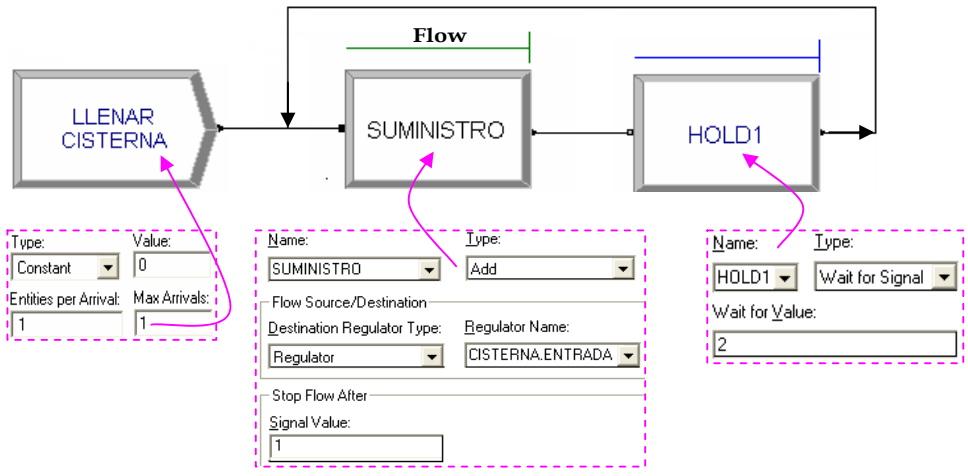
- Las capacidades mínimas de la cisterna y del tanque elevado para que el sistema no sea interrumpido por los cortes de agua.

<sup>4</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica Integrada 2006-2".

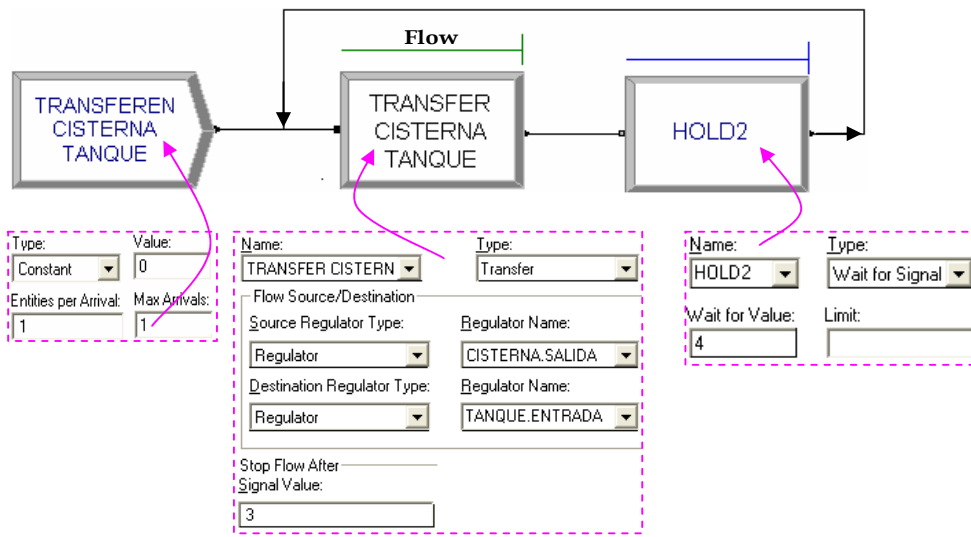
### Solución



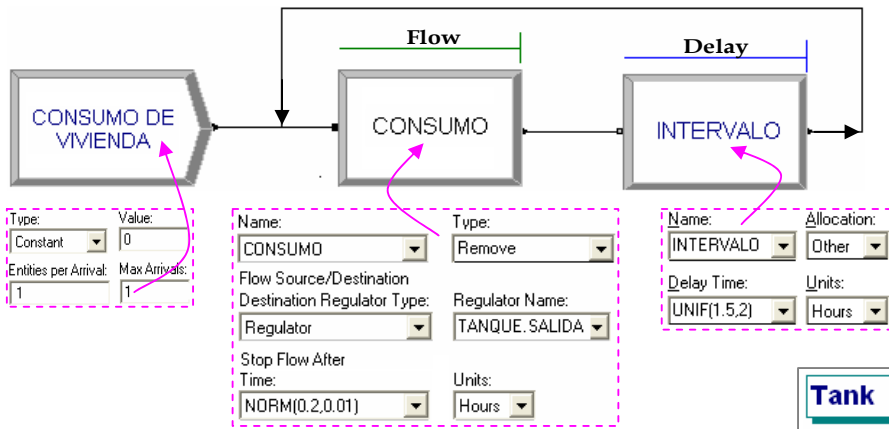
### Llenar cisterna



### Abastecimiento de cisterna a tanque







Consumo de vivienda

**Run Setup**

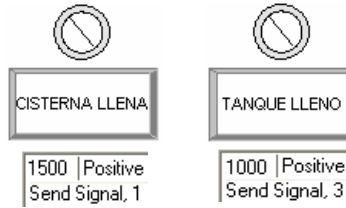
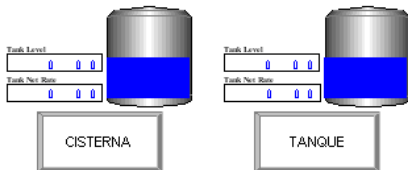
Replication Length: 30, Time Units: Days  
 Hours Per Day: 24, Base Time Units: Hours

Tank			
Level	Average	Minimum Value	Maximum Value
CISTERNA	1471.11	893.03	1500.00
TANQUE	753.26	500.00	1000.00
Total Quantity Added		Value	
CISTERNA	5276.59		
TANQUE	4776.59		
Total Quantity Removed		Value	
CISTERNA	4776.59		
TANQUE	4456.40		

**User Specified**

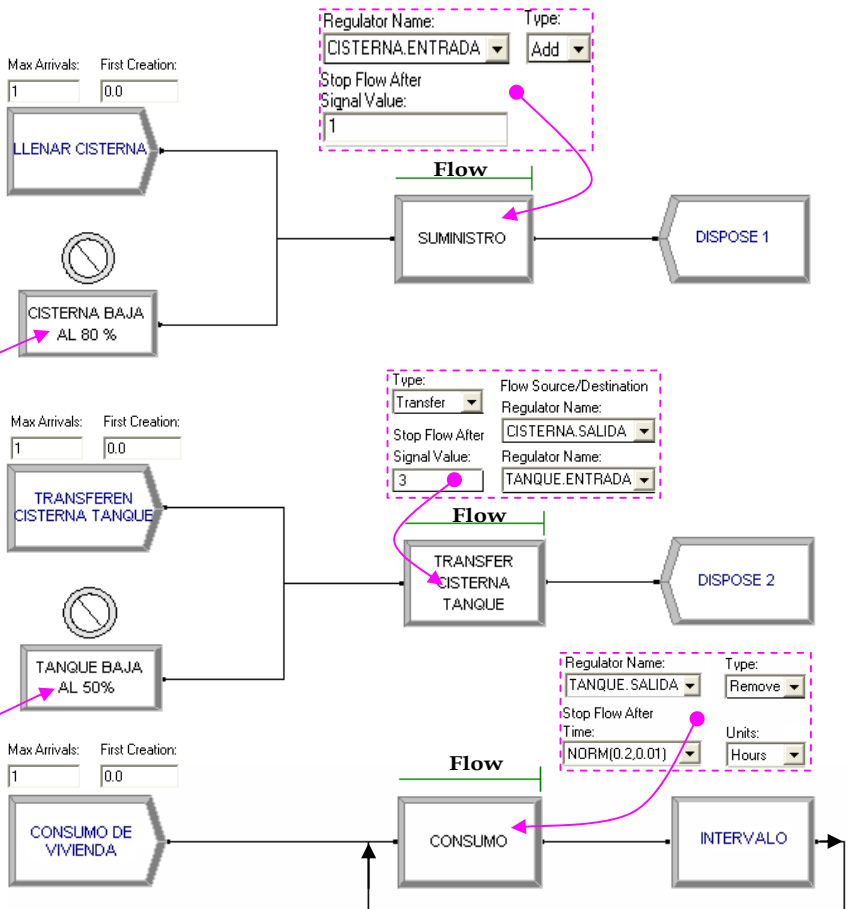
Variable	Maximum Value
CUENTA	8.0000

**Solución alternativa:**



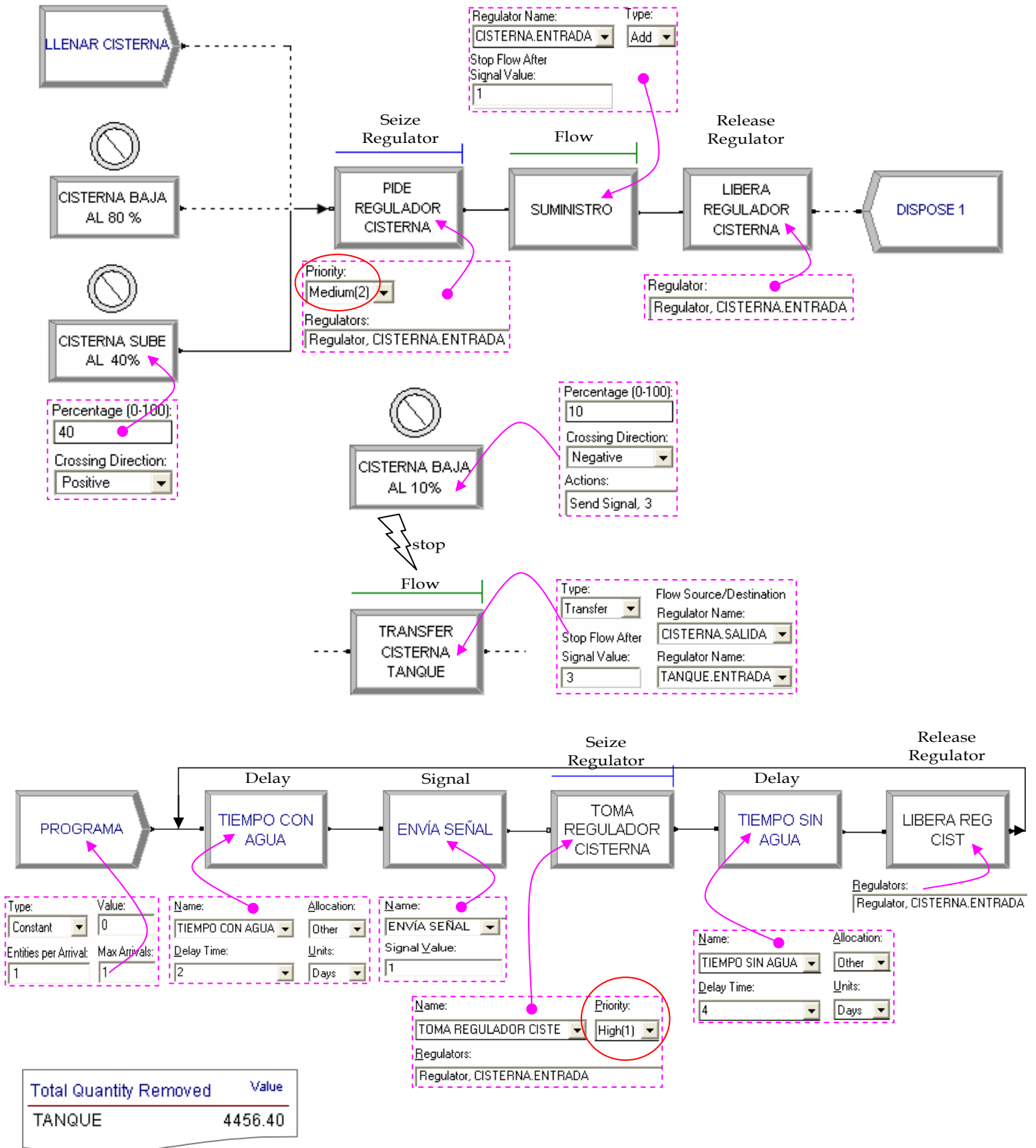
**CISTERNA** configuration:  
 Tank Name: CISTERNA  
 Location Type: Percentage Capacity, Percentage (0-100): 80  
 Crossing Direction: Negative, Initial State: Enabled  
 If Sensor Is Activated Actions:

**TANQUE** configuration:  
 Tank Name: TANQUE  
 Location Type: Percentage Capacity, Percentage (0-100): 50  
 Crossing Direction: Negative, Initial State: Enabled  
 If Sensor Is Activated Actions:



**Escenario:**

Respecto a la solución alternativa anterior, efectuar los siguientes cambios:



Capacidad Mínima de la Cisterna y del Tanque:  $4456.40 / 30 * 4 = \mathbf{594 \text{ litros}}$ .

## 7

## Caso de estudio

**Llenado de una piscina<sup>5</sup>**

## Objetivos:

- Simulación continua. Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Flow, Sensor y Regulate).
- Uso de la variable Tanklevel.
- Determinación de indicadores mediante el módulo Statistic.

El llenado de una pequeña piscina temperada en un condominio cerrado se realiza de la manera siguiente. Existen una llave de alimentación de agua corriente y una llave de alimentación de agua temperada proveniente de un sistema de tanque de calentamiento que utiliza carbón como combustible. La entrada de agua al tanque de calentamiento se produce a razón de 25 l/min y la salida hacia la piscina a razón de 30 l/min.

Mientras el tanque mantenga su contenido entre los 100 y 50 litros es seguro que la temperatura del agua caliente que proporciona a la piscina es de 50 grados centígrados. La salida del tanque de calentamiento se cierra cuando el nivel desciende a 50 litros, en ese momento se abre la entrada de agua a este tanque, hasta completar los 100 litros. Cuando el tanque se llena, se cierra la llave de entrada y se abre nuevamente la de salida, y así sucesivamente. Se debe considerar que este tanque se inicia lleno.

El agua corriente ingresa a razón de 10 l/min a la temperatura de 20 grados centígrados, sin detenerse, hasta que el volumen del agua de la piscina alcance su capacidad, correspondiente a 25.000 litros en total (tomando en cuenta tanto el agua fría como el agua caliente). Es posible estimar la temperatura final calculándola como la temperatura promedio del agua ingresada.

Se pide:

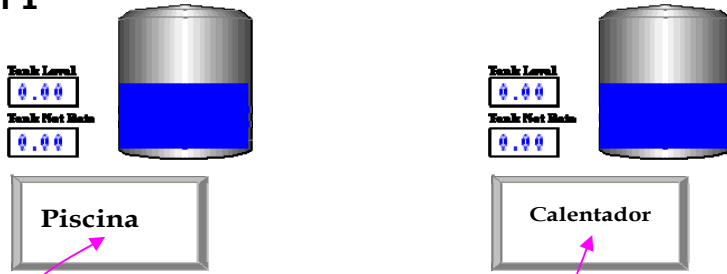
- Formular un modelo adecuado a la situación descrita.
- Determinar los siguientes indicadores. Justifique su respuesta.
  1. Tiempo para el llenado de la piscina.
  2. Temperatura final de la piscina.
  3. Litros que ingresan por la línea de agua caliente desde el calentador a la piscina.
  4. Veces que se interrumpió la salida de agua del calentador hacia la piscina

**Escenario**

El carbón alimentado produce calor suficiente durante una hora 30 minutos, luego de lo cual debe detenerse la entrada y la salida del agua del calentador durante un tiempo que se ajusta a una distribución uniforme entre 5 y 7 minutos, para recargar el carbón. Inmediatamente después se reanuda el proceso. Presente los cambios necesarios a realizar en el modelo original. Presente el valor de los mismos indicadores de la pregunta 2.

<sup>5</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica integrada 2007-1".

### Solución 1



Capacity: 25000 Initial Level: 0.0  
 Regulators:  
 PISCINA.ENTRAFRIA, 10, Per Minute  
 PISCINA.ENTRACALIENTE, 30, Per Minute

Capacity: 100 Initial Level: 100  
 Regulators:  
 CALENTADOR.ENTRADA, 25, Per Minute  
 CALENTADOR.SALIDA, 30, Per Minute



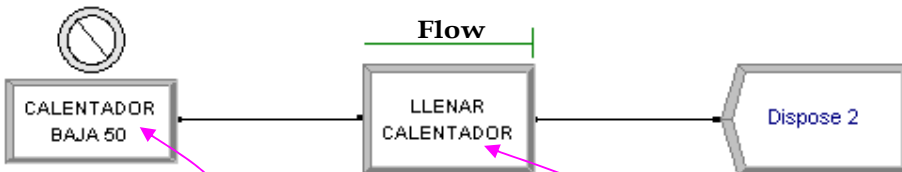
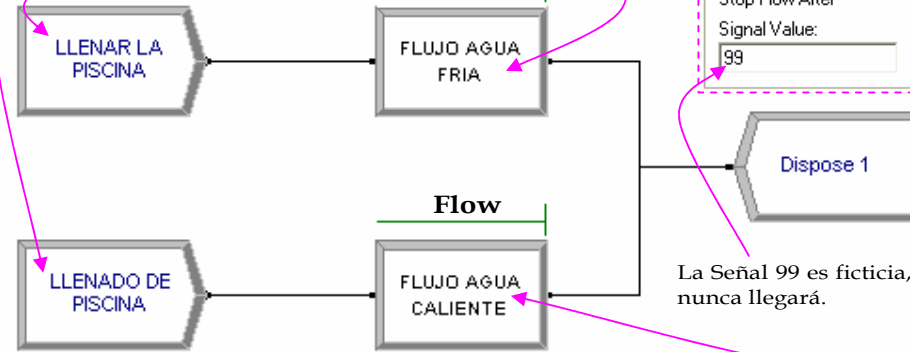
Location  
 Tank Name: CALENTADOR  
 Location Type: Specific Level Level: 100  
 Crossing Direction: Positive Initial State: Enabled  
 -If Sensor Is Activated-  
 Actions:  
 Send Signal, 1  
 Regulate Flow, CALENTADOR.SALIDA, 30, Per Min  
 Regulate Flow, PISCINA.ENTRACALIENTE, 30, Per  
 Create Discrete Entity

Type: Constant Value: 0  
 Max Arrivals: 1

Type: Add  
 Regulator Name: PISCINA.ENTRAFRIA  
 Stop Flow After  
 Signal Value: 99

Type: Transfer  
 Flow Source/Destination  
 Source Regulator Type: Regulator Name: CALENTADOR.SALIDA  
 Destination Regulator Type: Regulator Name: PISCINA.ENTRACALIENTE  
 Stop Flow After  
 Signal Value: 99

La Señal 99 es ficticia, nunca llegará.



Run Setup...  
 Replication Length: Infinite Time Units: Minutes  
 Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes  
 Terminating Condition:  
 TANKLEVEL(PISCINA) == 25000

Location  
 Tank Name: CALENTADOR  
 Location Type: Specific Level Level: 50  
 Crossing Direction: Negative Initial State: Enabled  
 -If Sensor Is Activated-  
 Actions:  
 Regulate Flow, CALENTADOR.SALIDA, 0.0, Per Mir  
 Regulate Flow, PISCINA.ENTRACALIENTE, 0.0, Pe  
 Assign Variable, CUENTA, CUENTA + 1  
 Create Discrete Entity

Type: Add  
 Regulator Name: CALENTADOR.ENTRADA  
 Stop Flow After  
 Signal Value: 1

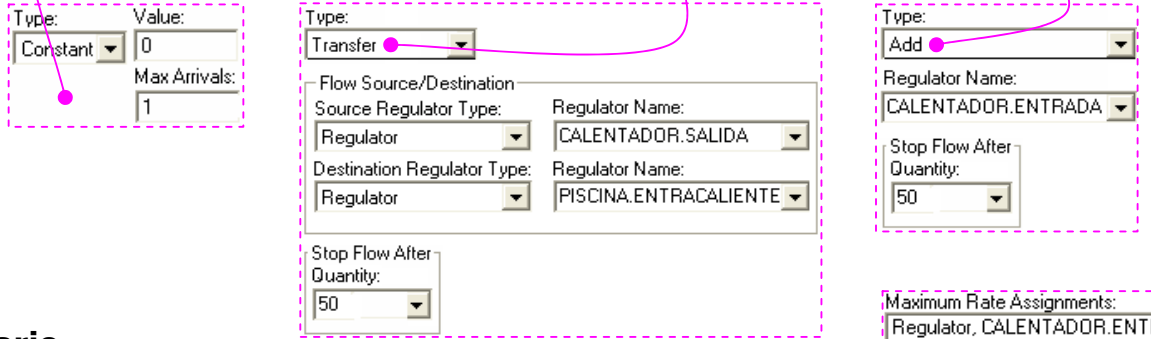
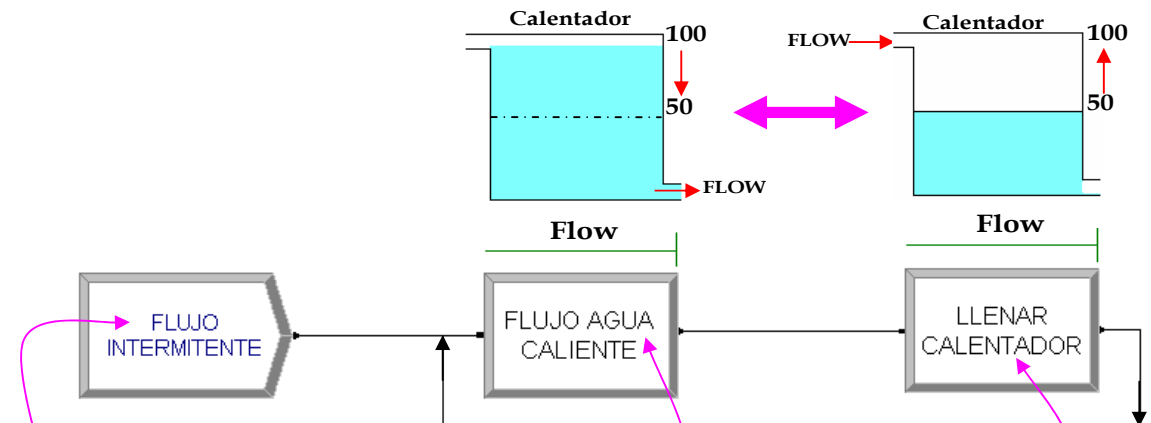
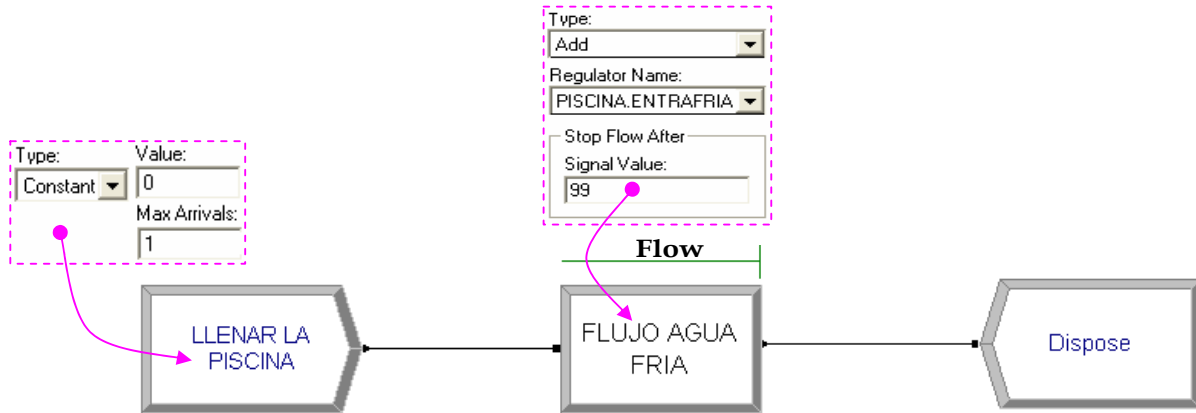
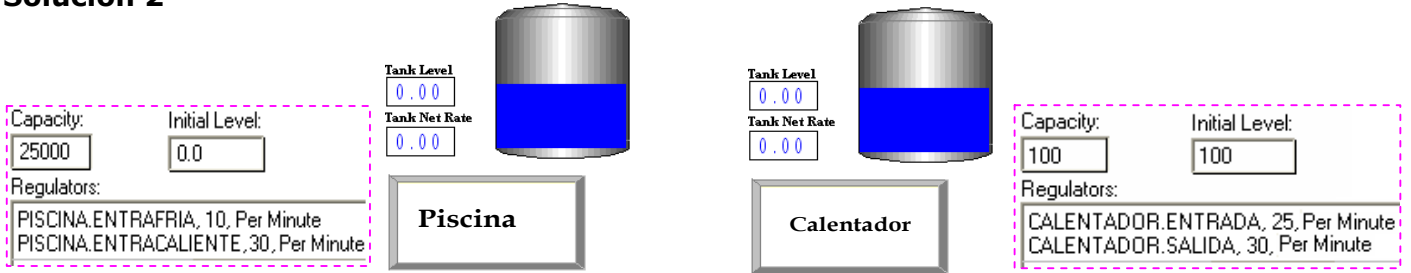
### User Specified

Output	Value
TIEMPO PARA LLENAR PISCINA	1057.00
TEMPERATURA FINAL PISCINA	37.3160
DESCARGA TOT CALENTADOR	14430.00
NUMERO DE INTERRUPCIONES	288.00



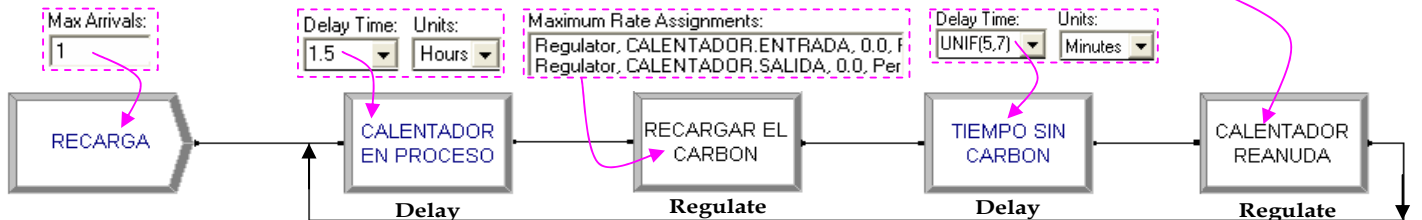
	Name	Type	Expression
1	TIEMPO PARA LLENAR PISCINA	Output	TNOW
2	TEMPERATURA FINAL PISCINA	Output	(20*(25000-TankQtyRemoved(CALENTADOR)) + 50* TankQtyRemoved(CALENTADOR))/25000
3	DESCARGA TOT CALENTADOR	Output	TankQtyRemoved(CALENTADOR)
4	NUMERO DE INTERRUPCIONES	Output	CUENTA

## Solución 2



Maximum Rate Assignments:  
 Regulator, CALENTADOR.ENTRADA, 25, Per Minute  
 Regulator, CALENTADOR.SALIDA, 30, Per Minute

## Escenario



## 8

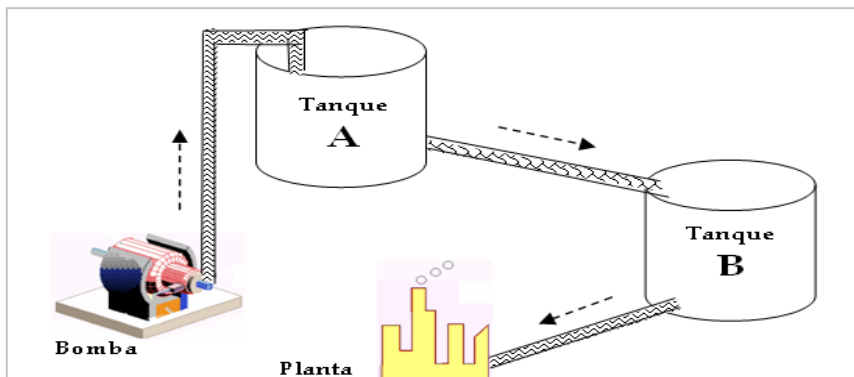
## Caso de estudio

**Sistema de abastecimiento a planta industrial<sup>6</sup>**

Objetivos:

Modelado de sistemas continuos. Aplicación práctica de la plantilla Flow Process (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate) del software Arena.

Dos tanques están puestos de tal manera que aseguran el abastecimiento de un líquido a una planta, véase figura:



El tanque A, cuya capacidad es de 6.000 galones, está más elevado y se abastece de un líquido por una bomba, a razón de 1.000 gal/h. La bomba empieza a funcionar solo si es necesario, es decir, si el tanque A tiene menos de 300 galones. Cuando el tanque A se llena la bomba deja de funcionar.

El tanque B tiene una capacidad de 5.000 galones y se abastece del tanque A solo por gravedad, a razón de 500 gal/h. Cuando se llena el tanque B se detiene el ingreso del líquido y se reanuda al bajar a 3.500 galones, o menos, de su capacidad. Si el tanque B llega al nivel mínimo de 250 galones, o menos, se deja de abastecer a la planta. Se reanuda el abastecimiento cuando el tanque B está totalmente lleno.

La planta recibe continuamente desde el inicio, el líquido del tanque B, a razón de 550 gal/hr, salvo que esté vacío. Al inicio, ambos tanques tienen 4.000 galones. Se pide:

- Simular el sistema descrito durante 3.000 horas.
- ¿Cuál fue el volumen promedio y final de los tanques? ¿Cuál fue la cantidad total que ingresó y salió de cada tanque?
- Determine el tiempo promedio que se requiere para llenar el tanque A.

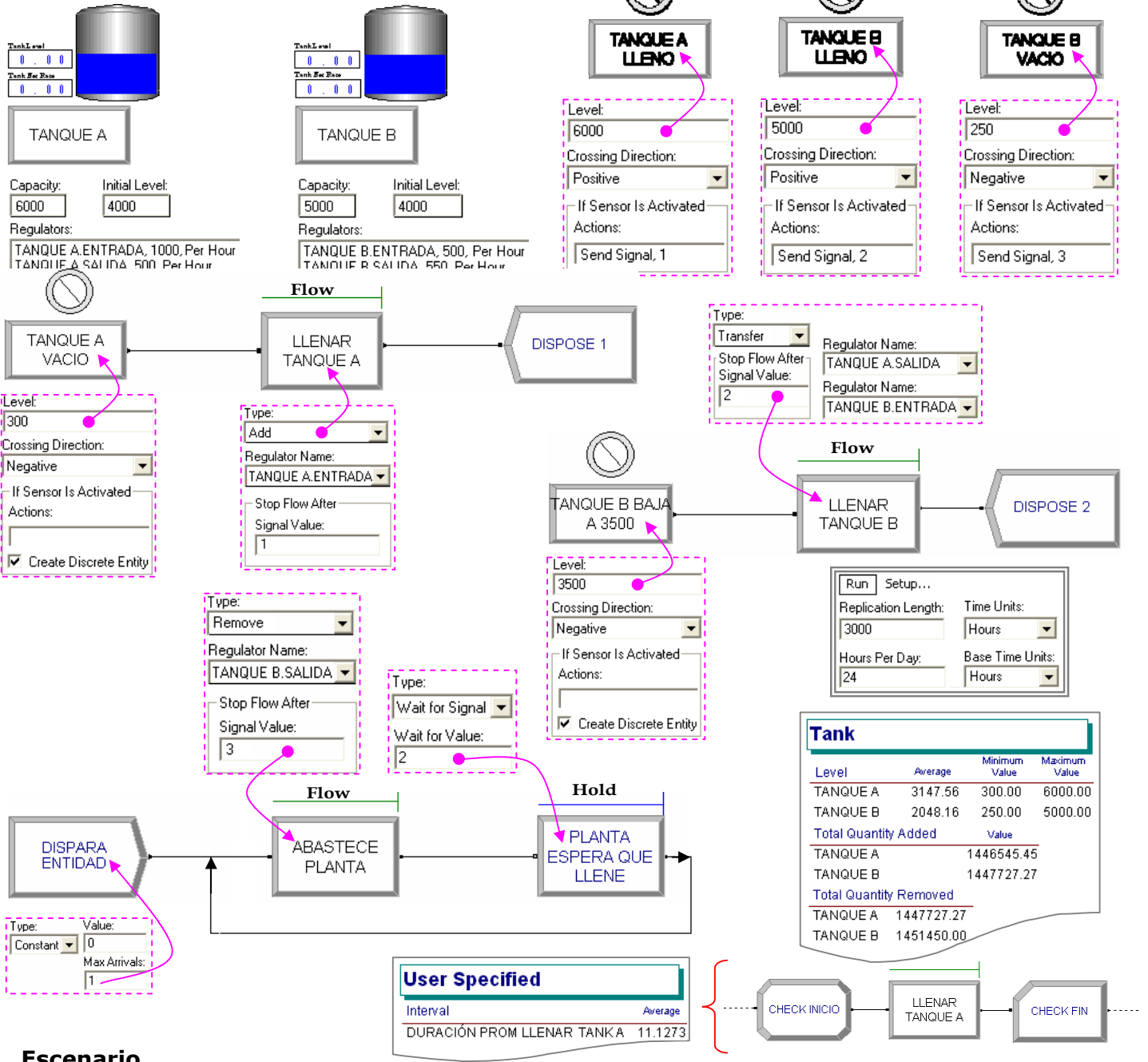
### Escenario

Suponga que el tanque B también recibe un líquido 2, desde el inicio, por medio de una bomba, a razón de 800 gal/h de una fuente de abastecimiento infinita. Se debe controlar que el tanque B no esté lleno para que la bomba pueda abastecerlo del líquido 2. Cuando este se llena, se debe esperar hasta que baje a 3.500 galones y recién reanudar el bombeo del líquido 2.

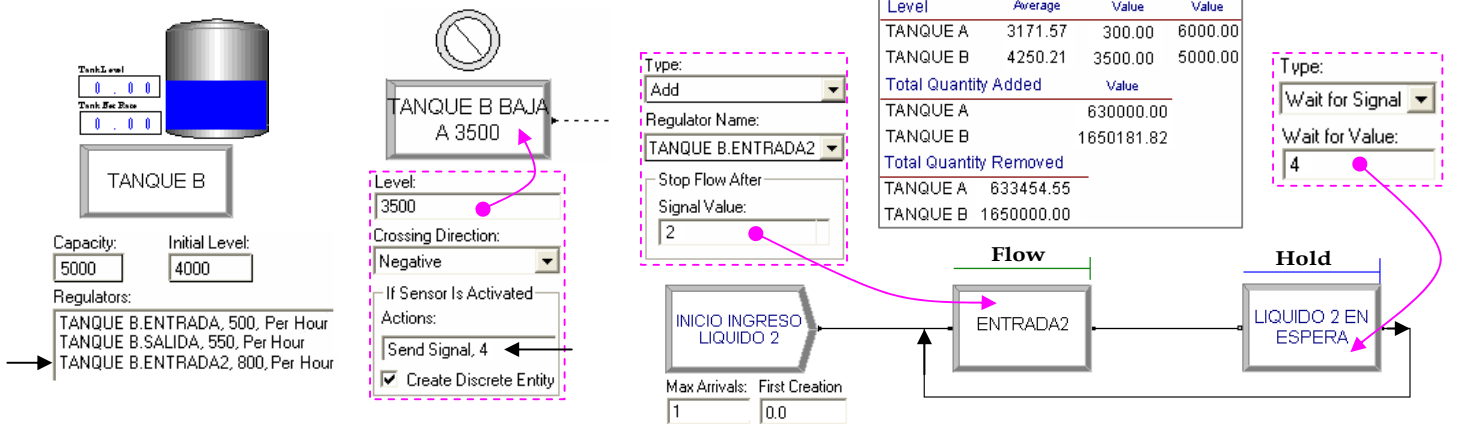
Realice los cambios necesarios al modelo original y determine los mismos indicadores del escenario original.

<sup>6</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen Final 2003-2".

### Solución



### Escenario



## 9

## Caso de estudio

**Campaña de Navidad<sup>7</sup>**

## Objetivos:

- o Modelado de sistemas combinados, convergencia de sistemas continuos con eventos discretos.
- o Aplicación las herramientas Flow Process del software Arena (Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator, Sensor y Regulate).
- o Llenado de un tanque en forma discreta, mediante la variable Tank Level.

Una empresa produce artículos de perfumería; diariamente se empaacan 580 docenas de un producto. El proceso se inicia con la llegada de "kits", cada uno con los componentes de un producto, que serán empacados en un estuche. Los estuches se transportan en una faja hacia la zona de embalaje, donde son colocados en un contenedor.

Cada minuto, los kits llegan a la zona de empaque en grupos de 12. Para lograr un estuche un operario tarda un tiempo que se ajusta a una UNIF(0.75, 1) minutos; se dispone de 12 operarios. Luego, el estuche se envía a la zona de embalaje, mediante una faja transportadora cuya capacidad es de 200 estuches. Cuando la faja se llena el operario queda inactivo y debe esperar hasta que exista espacio.

En el otro extremo de la faja se realiza la operación de embalaje. Un operario recibe cada estuche y lo coloca en un contenedor. Se dispone de dos operarios, que trabajan uno a la vez en forma alternada, el primero trabaja durante una hora a razón de 12 estuches/minuto, luego lo reemplaza el otro operario que realiza el trabajo a razón de 13 estuches/minuto, durante una hora, luego el ciclo se repite; el tiempo de cambio de operario se estima en 2 minutos.

El proceso de embalaje empieza a los 10 minutos de iniciada la producción. Despreciar el tiempo que la faja tarda en llevar un estuche, desde empaque hasta embalaje. La producción concluye cuando se haya terminado con la cantidad fija establecida para el día.

Se pide:

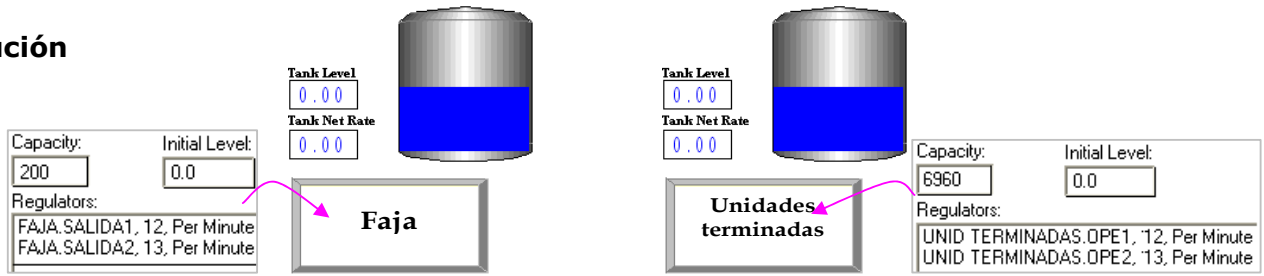
Formular un modelo de simulación y obtener los siguientes indicadores de desempeño:

1. El tiempo que duró la jornada para cumplir con el lote de producción.
2. El número promedio de estuches en proceso durante el día simulado.
3. El número de veces que los operarios tuvieron que esperar porque la faja saturó su capacidad.
4. Los niveles mínimo, máximo y promedio de estuches que contiene la faja durante el día simulado.
5. Sobre la base de los resultados obtenidos sugiera qué capacidad debe tener la faja. Justifique su respuesta.

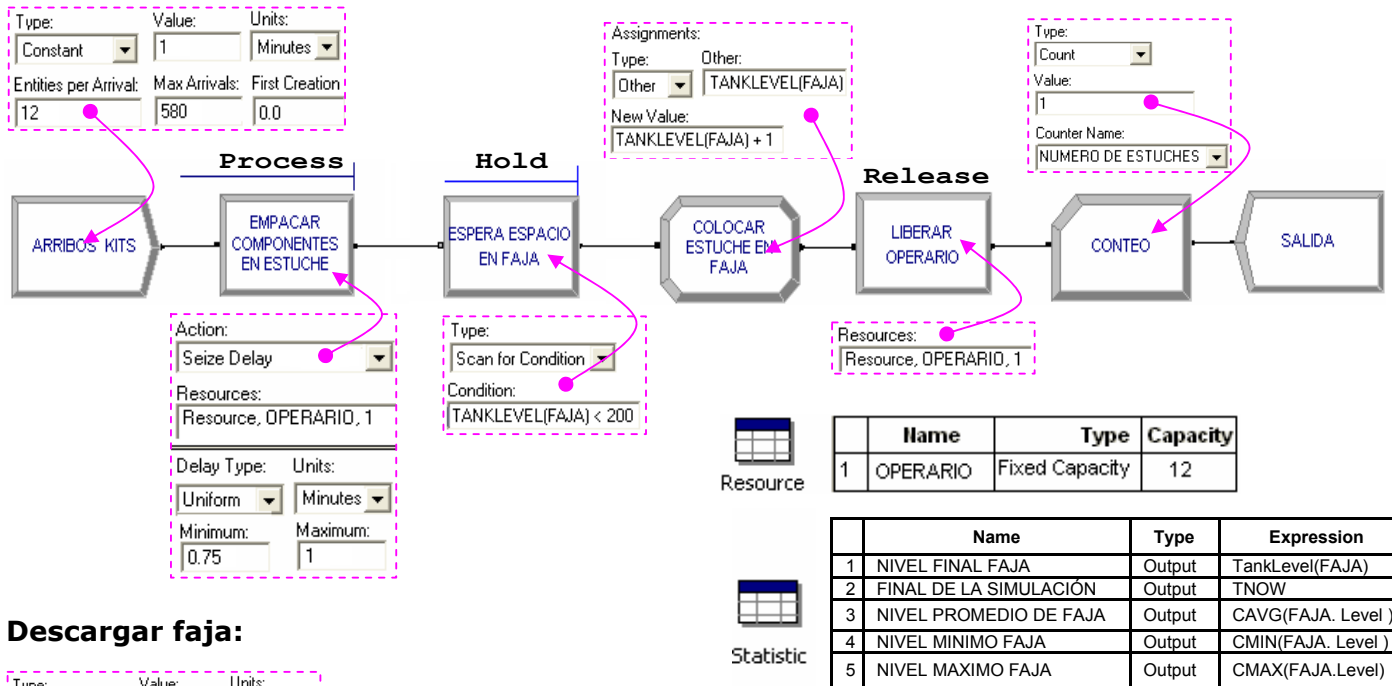
<sup>7</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen final 2006-2".



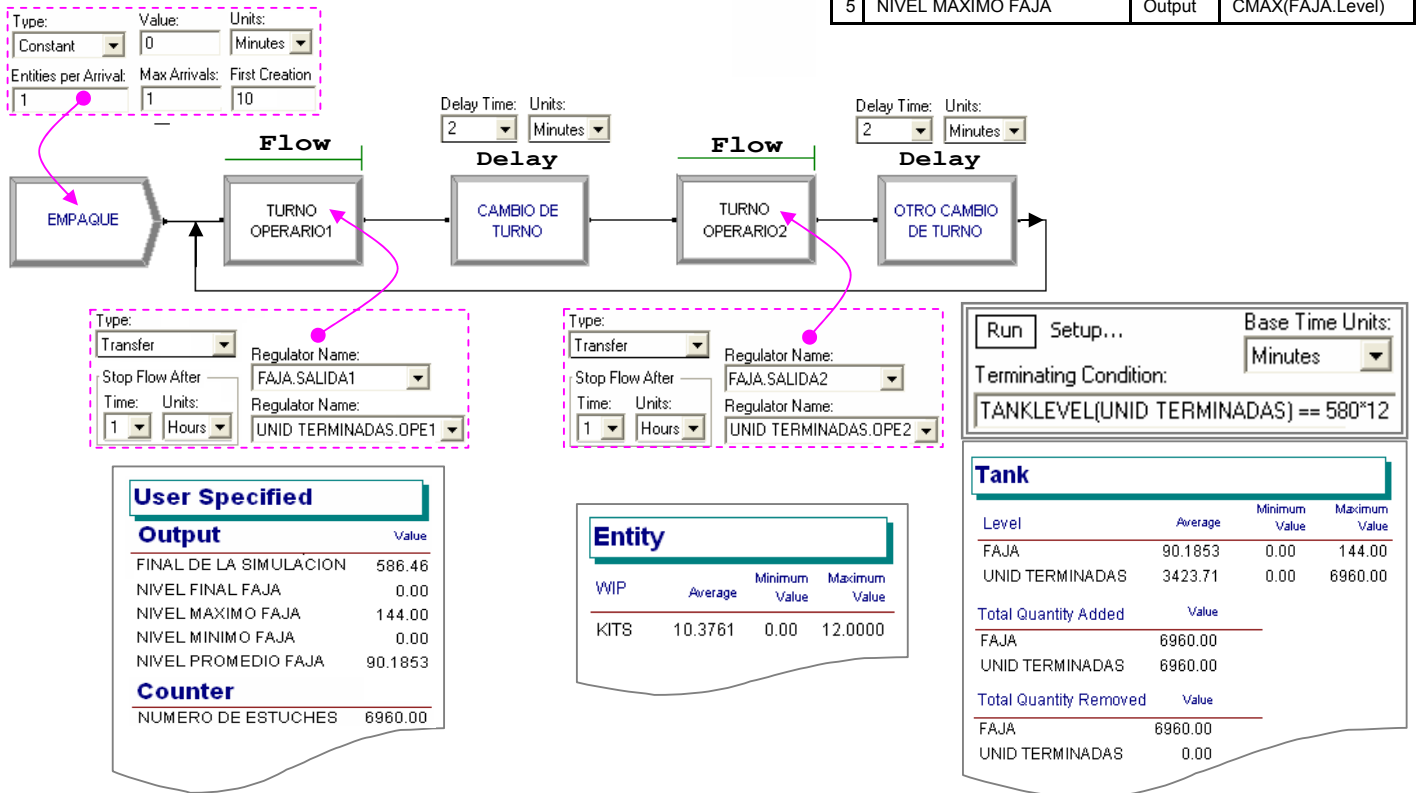
### Solución



### Cargar faja:



### Descargar faja:



10

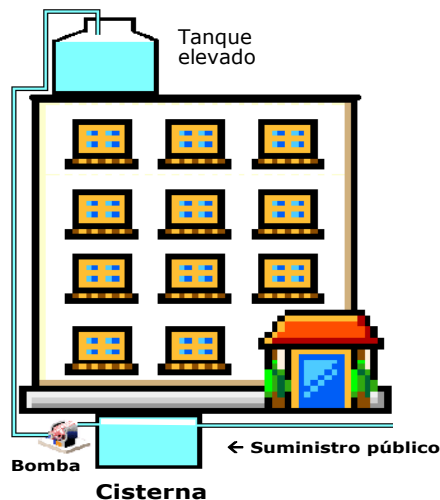
Caso de estudio

**Sistema de suministro de agua en edificio<sup>8</sup>**

Objetivos:

- Modelado de sistemas combinados, convergencia de sistemas continuos con eventos discretos. Modelado de sistemas combinados, convergencia de sistemas continuos con eventos discretos.
- Conjunto de reguladores: Regulator set.
- Llenado de un tanque en forma discreta, mediante la variable Tanklevel.

El tanque elevado de un edificio para vivienda multifamiliar distribuye agua para todos los departamentos, desde un tanque ubicado en el último piso. El tanque elevado de 2.500 litros recibe agua de una cisterna subterránea de 5.000 litros, que recibe el suministro de agua de la red pública. El edificio tiene 4 pisos y en cada uno habita una familia. Los consumos de agua ocurren en intervalos de tiempo distribuidos exponencialmente con media de 15 minutos.

**Flujos de consumo de agua**

Piso	Flujo litros/minuto
1	15
2	12
3	8
4	5

Cada consumo proviene en forma aleatoria de cualquiera de los cuatro pisos y pueden coincidir consumos simultáneos.

El tiempo estimado de cada consumo se distribuye en forma normal con una media de 10 y una desviación de 2 minutos. El agua de la red pública ingresa a la cisterna con un flujo de 15 litros/minuto. La cisterna tiene una bomba que alimenta al tanque de agua con un flujo de 30 l/min. La bomba se activa cuando el nivel de tanque de agua disminuye al 40% de su capacidad; se desactiva cuando el tanque elevado queda lleno. El ingreso de agua a la cisterna se activa cuando el nivel de la cisterna disminuye al 50% de su capacidad; se desactiva cuando la cisterna se llena. Considerar arbitrariamente que el nivel inicial de la cisterna es de 1.000 litros y el del tanque de 1.500 litros.

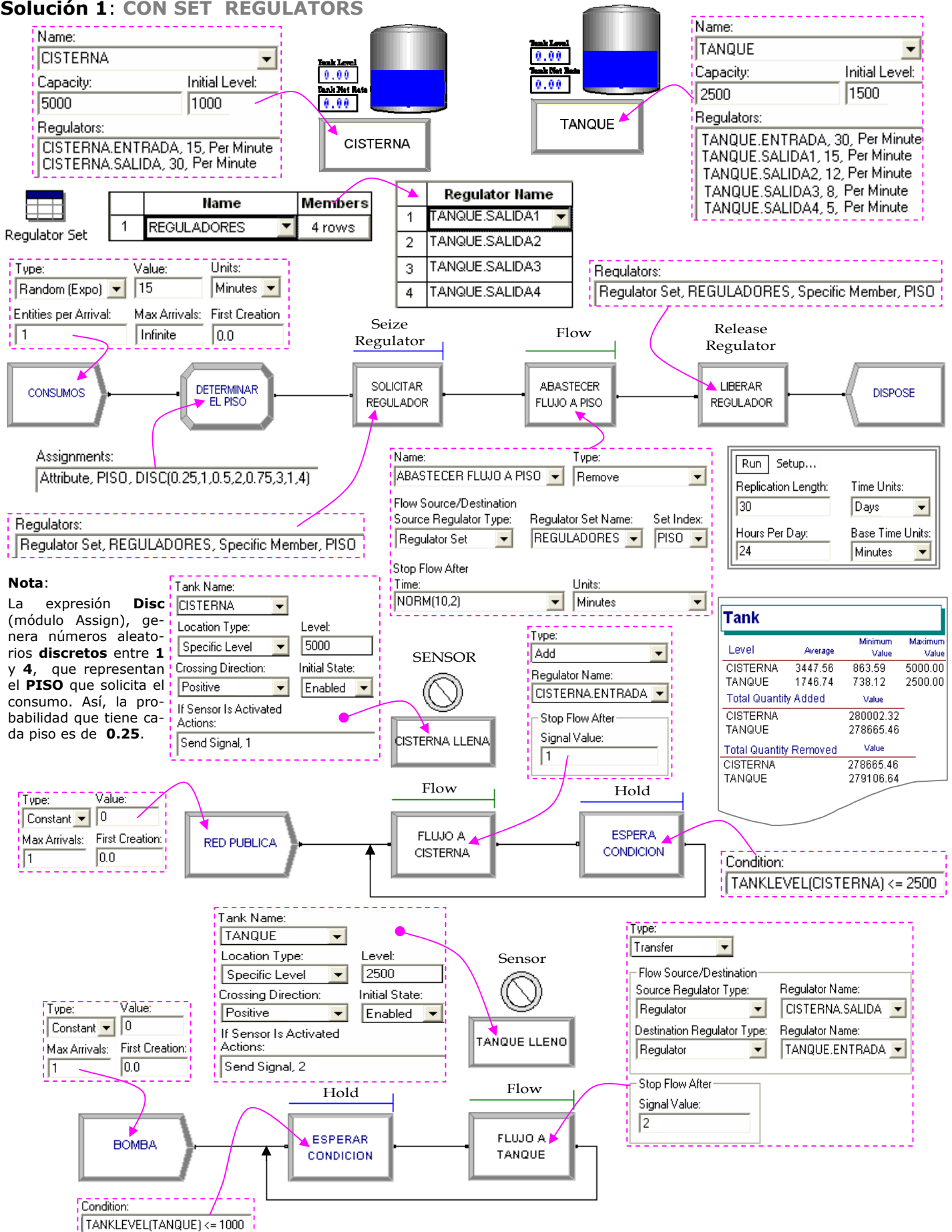
Se pide:

Formular un modelo y simular el funcionamiento del sistema descrito por 30 días. Obtener los siguientes indicadores de desempeño:

1. Determine la cantidad de solicitudes de agua por piso.
2. Determine el consumo promedio de agua por piso.

<sup>8</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen final 2007-2".

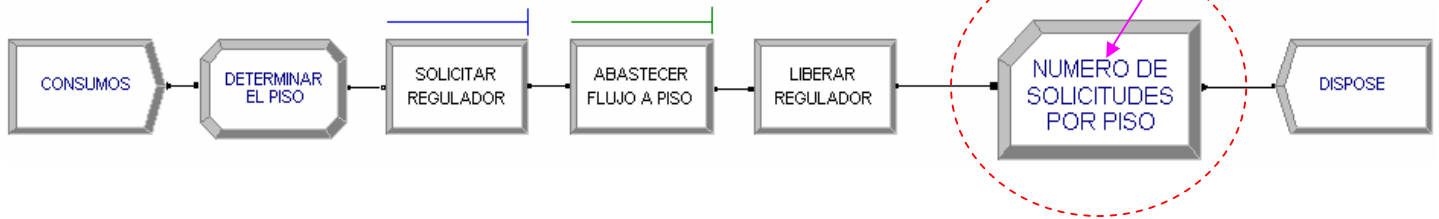
### Solución 1: CON SET REGULATORS



**Estadísticas:**

**1. Número de solicitudes por piso:**

Name: NUMERO DE SOLICITUDES POR PISO Type: Count  
 Value: 1  Record into Set  
 Counter Set Name: SOLICITUDES POR PISO Set Index: PISO



**Members**

	Counter Name
1	SOLICITUDES POR PISO 1
2	SOLICITUDES POR PISO 2
3	SOLICITUDES POR PISO 3
4	SOLICITUDES POR PISO 4

**User Specified**

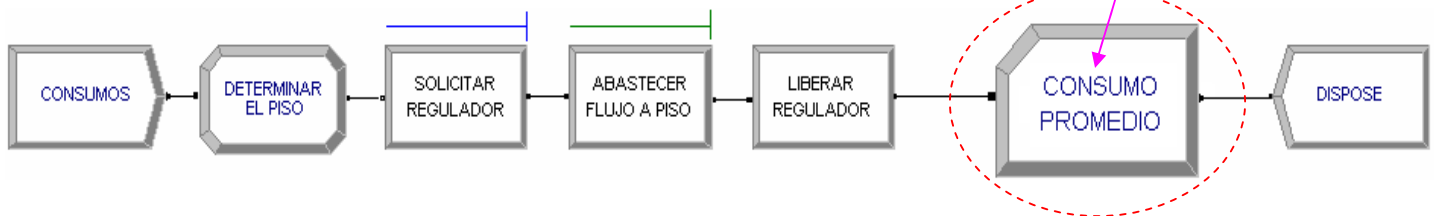
Count	Value
SOLICITUDES POR PISO 1	691.00
SOLICITUDES POR PISO 2	700.00
SOLICITUDES POR PISO 3	733.00
SOLICITUDES POR PISO 4	683.00

Set

	Name	Type	Members
1	SOLICITUDES POR PISO	Counter	4 rows

**2. Consumo promedio por piso:**

Name: CONSUMO PROMEDIO Type: Expression  
 Value: CONSUMO  Record into Set  
 Tally Set Name: CONSUMO POR PISO Set Index: PISO



**Members**

	Tally Name
1	CONSUMO POR PISO 1
2	CONSUMO POR PISO 2
3	CONSUMO POR PISO 3
4	CONSUMO POR PISO 4

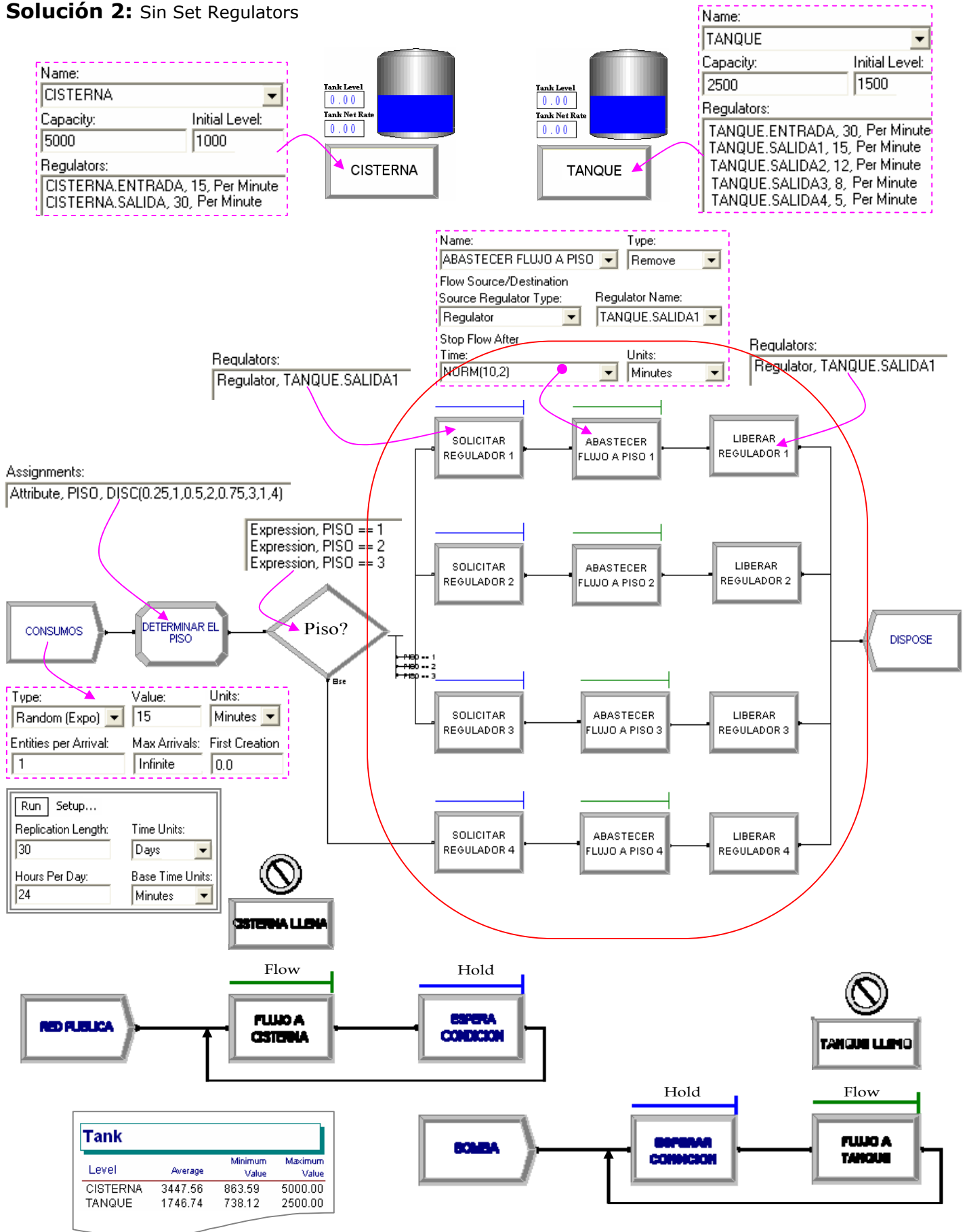
**User Specified**

None	Average
CONSUMO POR PISO 1	150.01
CONSUMO POR PISO 2	118.48
CONSUMO POR PISO 3	79.1040
CONSUMO POR PISO 4	50.3995

Set

	Name	Type	Members
2	CONSUMO POR PISO	Tally	4 rows

## Solución 2: Sin Set Regulators



11

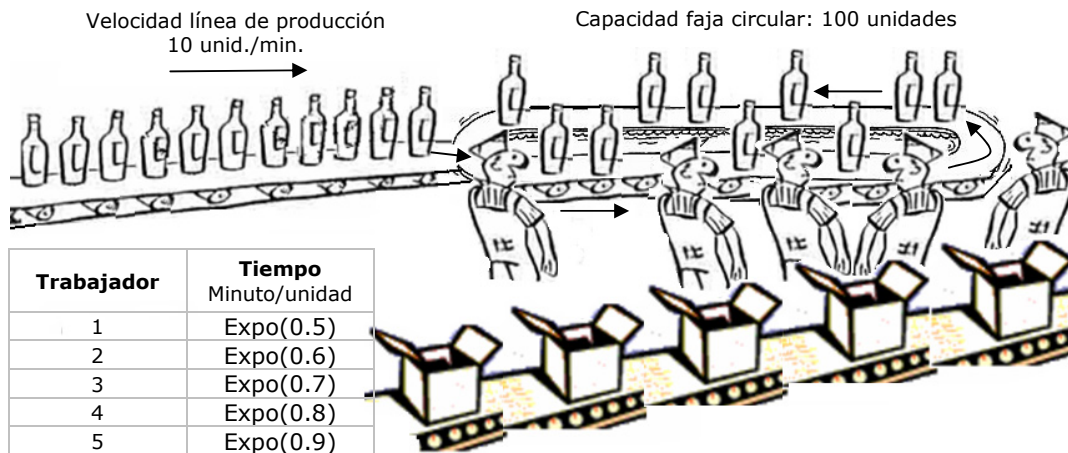
Caso de estudio

**Control de calidad en línea de producción<sup>9</sup>**

Objetivos:

- Modelado de sistemas continuos.
- Disminución del nivel de un Tanque en forma Discreta, mediante la variable Tanklevel.
- Aplicación práctica del módulo de datos (avanzado) Expression.

Una línea de producción coloca su producto terminado a una velocidad de 10 unid./min., en una faja circular. En la banda derecha de la faja circular están ubicados 5 operarios para realizar el control de calidad de cada producto terminado. El contenido de la faja circular permite siempre que cada operario pueda retirar una unidad y hacerle el control de calidad, para luego ubicarla en una zona de empaque (véase gráfico). El tiempo de este control dependerá de la experiencia de la persona, tal como lo muestra la siguiente tabla.



La velocidad de la faja circular permite desprestigiar el tiempo que tarda una unidad de producto terminado para llegar a la ubicación del trabajador. Si la unidad no es tomada por ninguno de los 5 trabajadores, seguirá circulando en la faja.

La capacidad de la faja circular es para 100 unidades; si la faja circular se llena, se debe parar la línea de producción. Cuando baje al 70% de su capacidad, la producción de la línea se reanuda. Inicialmente la faja circular está llena.

Se pide:

Simular el sistema descrito durante 1.200 minutos y determinar los siguientes indicadores de desempeño:

- Cuántas unidades han pasado el control de calidad.
- Nivel mínimo, promedio y máximo de unidades en la faja circular.
- Número de veces que paró la línea de producción y cuántos minutos en promedio tuvo que esperar para reanudar su producción.

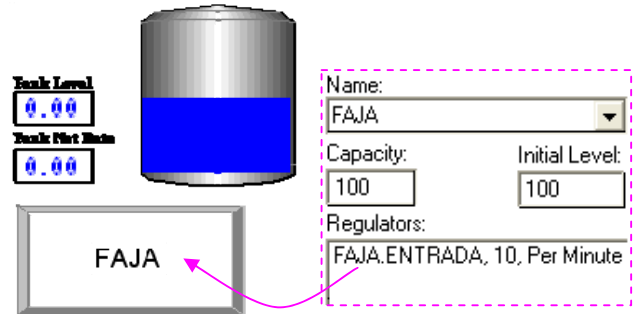
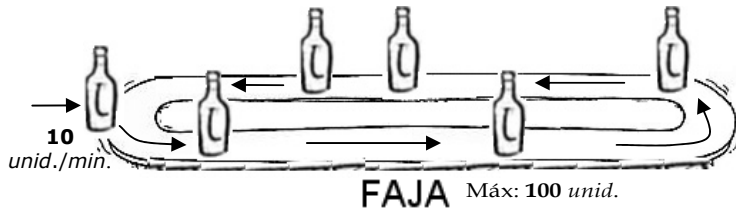
**Escenario**

Por mantenimiento de la línea de producción esta tiene que parar cada 400 minutos de operación por un tiempo que oscila uniformemente entre 12 y 16 minutos. La consideración de que la faja nunca se queda vacía ya no es más válida. Simular por 1.200 minutos.

<sup>9</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima. Escuela de Ingeniería. "Práctica integrada 2007-2".

### Solución

**Nota:** En la solución siguiente, se modela la faja circular (FAJA) como un tanque, cuyo contenido siempre estará disponible para cualquiera de los trabajadores.



Variable

Name	Initial Values
1 INDICE	0 rows

Expression

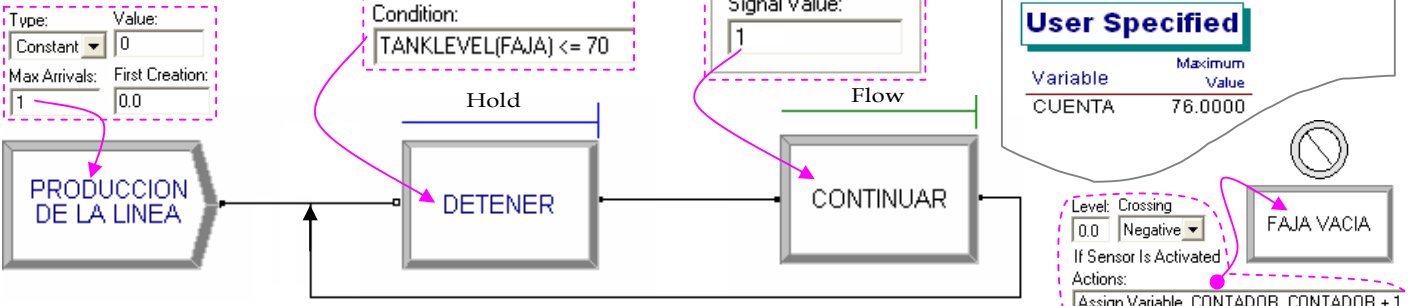
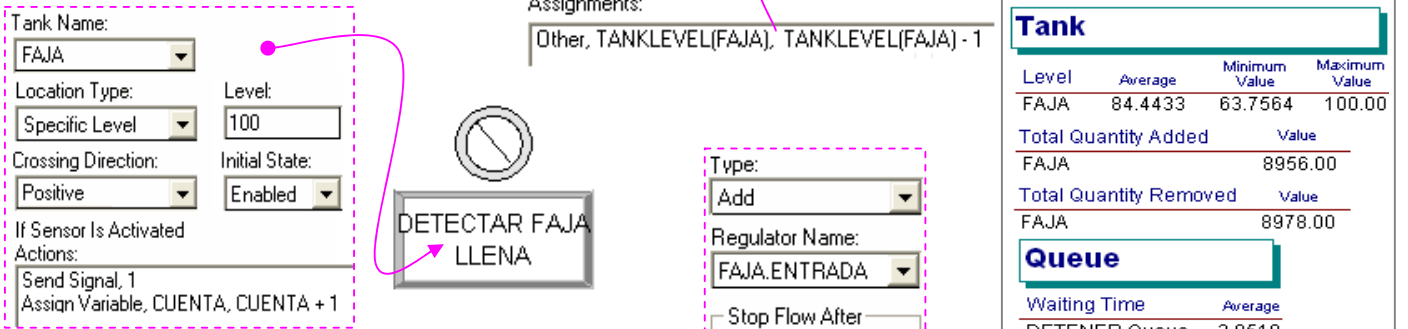
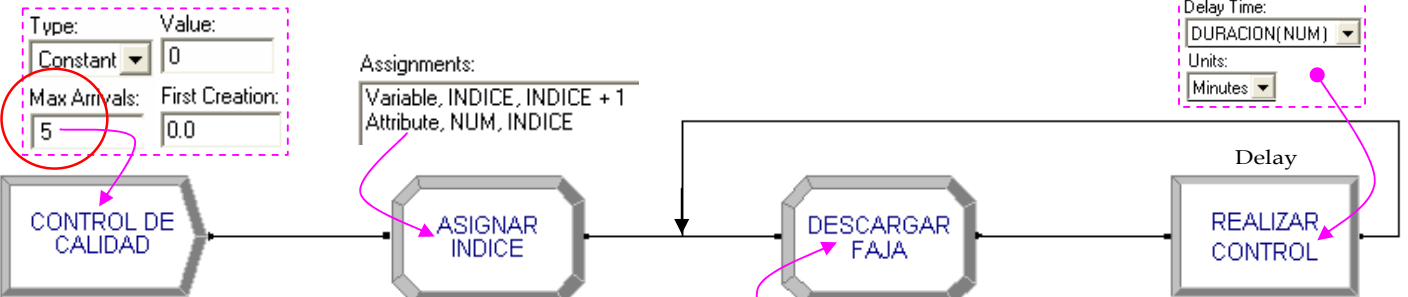
Name	Rows	Columns	Expression Values
1 DURACION	5		5 rows

1	EXPO(0.5)
2	EXPO(0.6)
3	EXPO(0.7)
4	EXPO(0.8)
5	EXPO(0.9)

Run Setup...

Replication Length: 1200 Time Units: Minutes

Hours Per Day: 24 Base Time Units: Minutes



### Escenario:



Durante los **1200 minutos** simulados hubo **dos paradas** de la Línea de Producción por mantenimiento (cada 400 minutos). La cantidad de productos inspeccionados bajó a **8959 unid.**, no bajó mucho porque si bien paró la línea, los operarios continuaron inspeccionando mientras hubo unidades en faja. En este escenario, al colocar un sensor (**FAJA VACÍA**) se supo que solo una vez quedó la faja vacía.

12

Caso de estudio

**Empresa envasadora de GLP<sup>10</sup>**

Objetivos:

- Modelado de sistemas continuos. Alterar nivel de un tanque en forma discreta mediante la variable Tanklevel.
- Aplicación del módulo de datos avanzado Expression.
- Módulo de datos avanzado Statistic.

Una empresa envasadora de balones de gas doméstico desea analizar el manejo de sus inventarios y el nivel de servicio que ofrece. La empresa tiene un tanque de almacenamiento de 5.000 galones de GLP. La demanda de balones de gas para distribuidores minoristas, al inicio del día, varía con un comportamiento distribuido uniformemente entre 50 y 70 balones domésticos de 10 galones cada uno.

En la planta trabajan tres operarios dedicados exclusivamente a cumplir una tarea específica. El primero inspecciona balones, el segundo los llena y ubica en una zona de espera y el tercero los acomoda en un camión distribuidor. El primer operario toma un tiempo distribuido triangularmente con valores 0,2, 0,5 y 1 minuto por cada balón de gas. El balón pasa posteriormente a una línea de llenado que trabaja con el segundo operario utilizando una válvula que alimenta al balón vacío con un ratio de 20 gal/min. Cambiar un balón lleno por uno vacío y colocarlo en la zona de espera demora un tiempo distribuido en forma uniforme entre 10 y 15 segundos. Cuando el pedido está completo, el tercer operario coloca en el camión distribuidor los balones, demorándose un tiempo distribuido en forma triangular con valores 20, 25 y 30 minutos para colocar todo el pedido en el camión distribuidor. El camión puede trasladar hasta 80 balones domésticos. Un camión distribuye los balones llenos una vez que el camión esté cargado. El tiempo de recorrido es proporcional a la cantidad de balones que se van a distribuir, tomando como referencia que distribuir un camión totalmente cargado de balones (80 balones) demora un tiempo distribuido en forma uniforme entre 6 y 8 horas. La distribución se inicia cuando el pedido se completa y hay un camión disponible. Considere que el tanque de almacenamiento está inicialmente lleno.

1. Dado que no existe restricción en la disponibilidad de envases, modele el trabajo de la envasadora de gas hasta completar seis días continuos de trabajo.
2. ¿Cuántos balones de gas se llenaron durante los seis días de trabajo?
3. Presente el volumen promedio de descarga diaria del tanque de almacenamiento.
4. Presente el tiempo promedio de trabajo para un pedido diario.
5. Determine en cuántos días se descargaría el tanque en la empresa.

**Escenario**

Considere que un camión cisterna que transporta GLP, con capacidad uniforme entre 2.800 y 3.200 galones, reabastece al tanque de almacenamiento. La política es efectuar una solicitud de reabastecimiento cuando el nivel del tanque está a la mitad de contenido. Cada reabastecimiento se completa cuando el volumen del tanque se llena o cuando el camión se descargue totalmente, lo que ocurra primero. El tiempo para atender una solicitud de reabastecimiento es entre 1 y 2 días con distribución uniforme. El ratio de llenado del tanque de almacenamiento es de 40 gal/min. La empresa mantiene su política de reparto con un solo camión de 80 balones. Simule este escenario para 30 días de trabajo.

<sup>10</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Práctica integrada 2008-1".



### Solución

**Expression**

Name	Rows	Columns	Expression Values
1 TIEMPO DE OPERACION	4		4rows

**Resource**

Name	Type	Capacity
1 OPERARIO1	Fixed Capacity	1
2 OPERARIO2	Fixed Capacity	1
3 OPERARIO3	Fixed Capacity	1

**Expression Values**

1	TRIA(0,2,0.5,1)
2	UNIF(10,15)
3	TRIA(20,25,30)
4	(DEMANDA/80)*UNIF(6,8)

### Generar demanda

**Separate**

Type: Duplicate Original  
 # of Duplicates: DEMANDA - 1

**Transfer**

Type: Transfer  
 Flow Source/Destination Regulator Name: TANQUE.SALIDA  
 Regulator Name: BALON.ENTRADA

**Time Between Arrivals**

Type: Constant Value: 1 Units: Days  
 Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: 6 First Creation: 0.0

**Assignments:**

Attribute, DEMANDA, AINT(UNIF(50,71))  
 Attribute, HORA INICIO, TNOW

### Inspección y llenado

**Process**

Seize Delay Release  
 Resources: Resource, OPERARIO1, 1  
 Delay Type: Expression Units: Minutes  
 Expression: TIEMPO DE OPERACION(1)

**Seize**

Resources: Resource, OPERARIO2, 1

**Flow**

Stop Flow After Quantity: 10

**Count**

Type: Count Value: 1

**Assignments:**

Other, TANKLEVEL(BALON), 0

### Cambio de balón

**Delay**

Delay Time: TIEMPO DE OPERACION(2) Units: Seconds

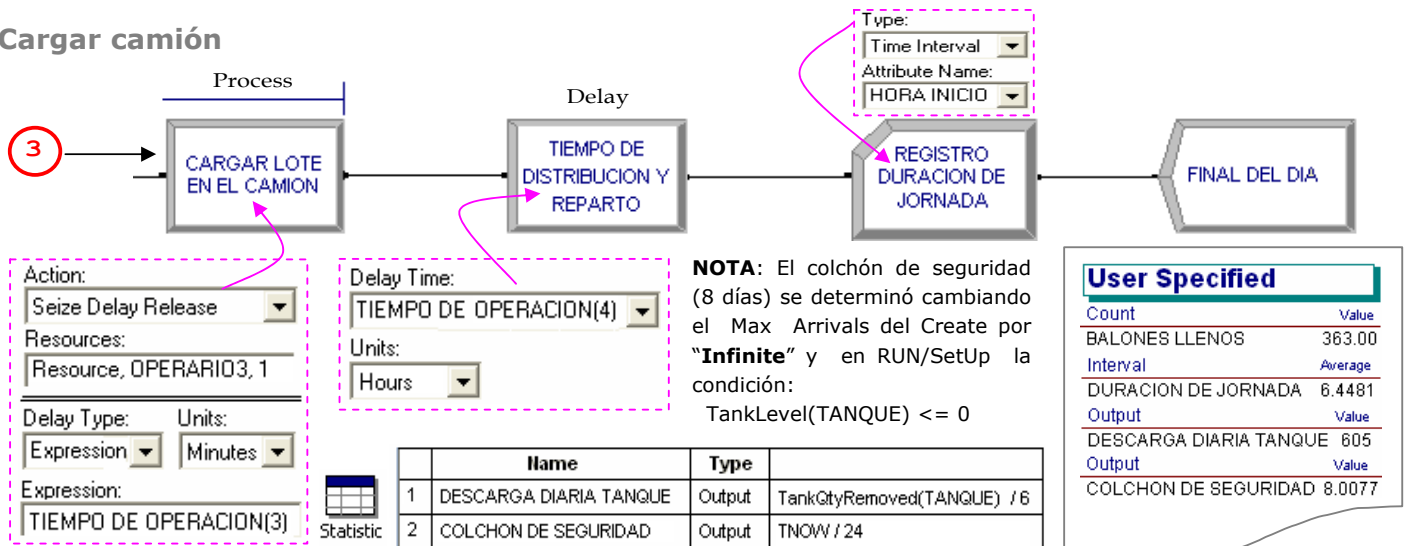
**Release**

Resources: Resource, OPERARIO2, 1

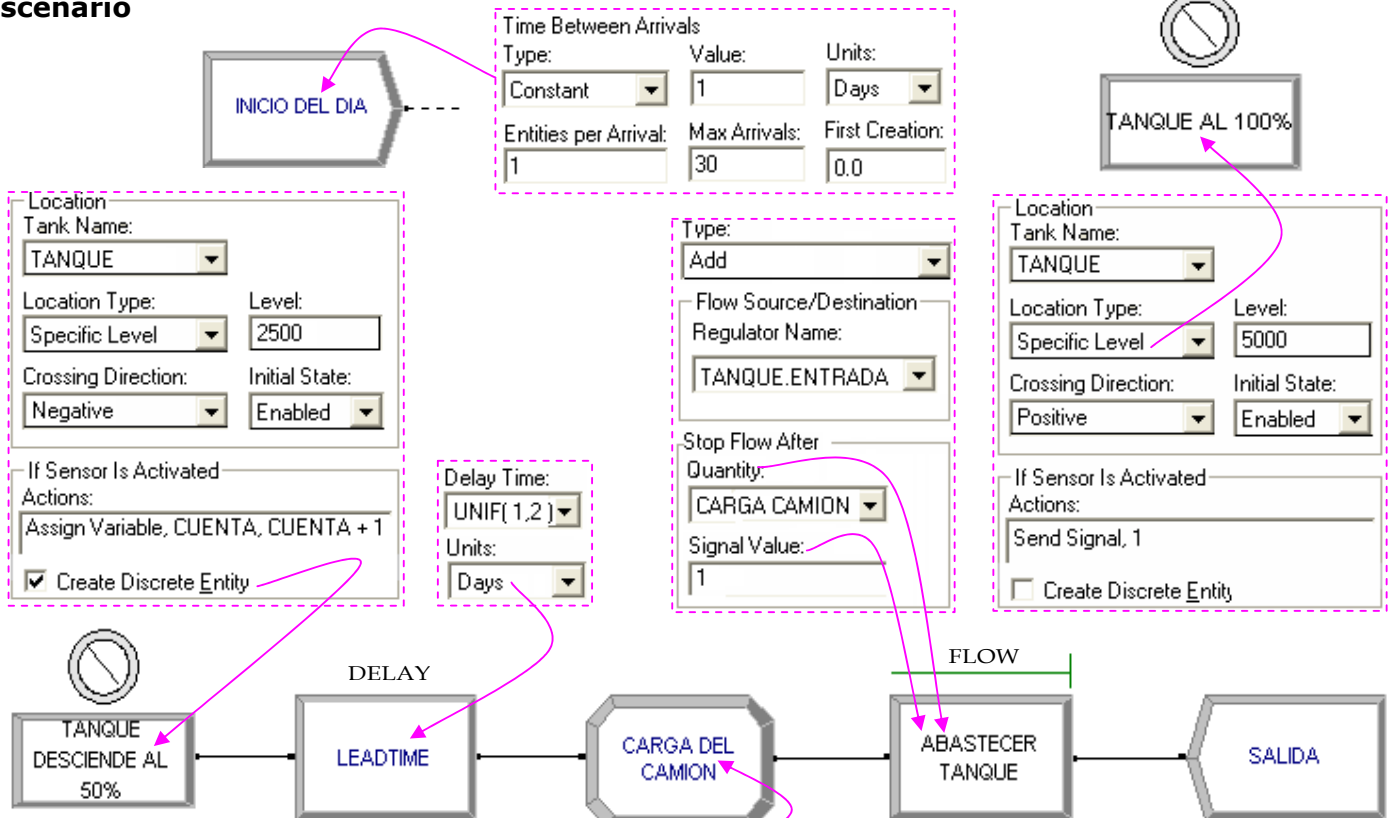
**Batch**

Name: JUNTAR LOTE DEL DIA Type: Permanent  
 Batch Size: DEMANDA Save Criterion: Last  
 Rule: Any Entity

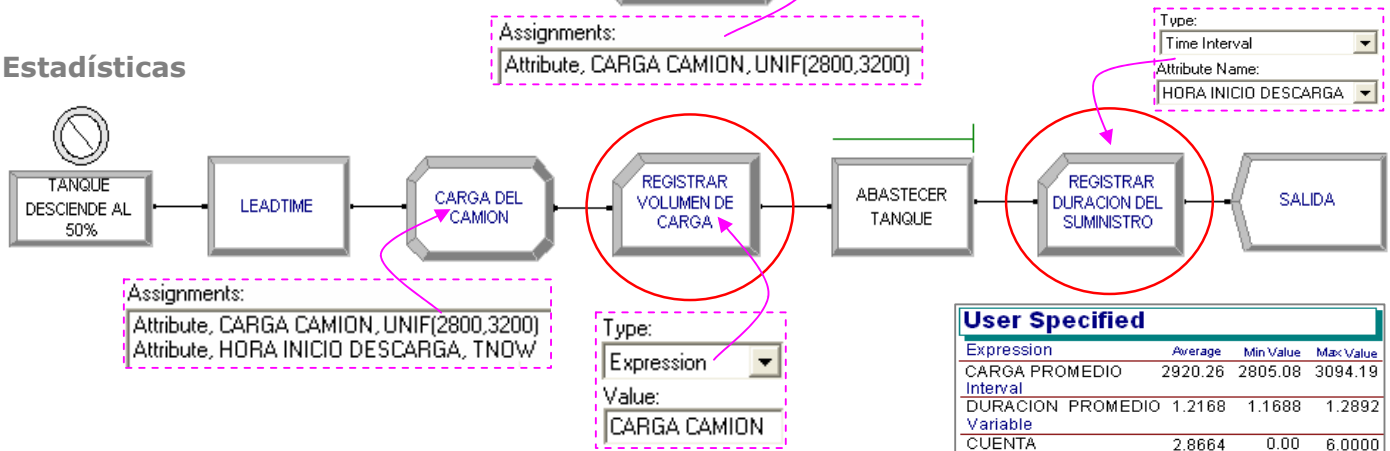
### Cargar camión



### Escenario



### Estadísticas



## 13

## Caso de estudio

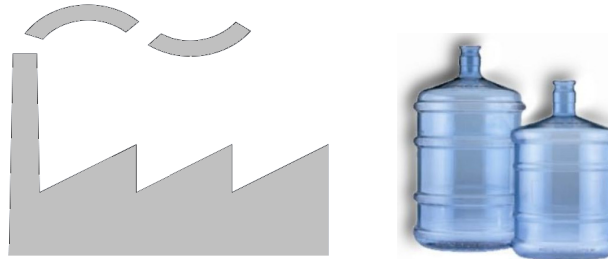
**Estación de llenado de bidones de agua<sup>11</sup>**

## Objetivos:

- Modelado de sistemas combinados.
- Aplicación práctica de los módulos: Tank, Seize Regulator, Flow, Release Regulator y Regulate del software Arena.
- Determinación de indicadores con el módulo Statistic.

Una empresa embotelladora tiene una línea de agua de mesa con una presentación de bidones de 25 litros. El responsable de producción desea analizar el trabajo en la estación de llenado. Los bidones vacíos vienen de un proceso previo de etiquetado con un tiempo entre arribos distribuido exponencialmente con media 0.75 minutos.

Los bidones llegan uno detrás de otro a una máquina automática que llena el bidón entre 24 y 25 litros (uniforme) con una válvula que hace ingresar el agua a 40 litros por minuto. Luego de ser llenado, el bidón se envía a un almacén.



Se pide:

Modelar el trabajo de la estación de llenado considerando que todos los bidones que ingresan a la estación, dentro del tiempo de un turno de 7.5 horas efectivas, deben salir de la estación llenos. Simular solo un turno de trabajo.

1. Presente el volumen promedio por bidón.
2. Presente la cantidad de bidones llenados.
3. Presente el cálculo de la cantidad de minutos adicionales al término del turno que trabajó la estación.

**Escenario**

Respecto al escenario original, suponga que la máquina de llenado de bidones requiere el ajuste de una pieza luego de haber llenado una cantidad de bidones distribuida uniformemente entre 30 y 40 bidones. El tiempo de ajuste de la pieza en la máquina demora un tiempo distribuido triangularmente con valores 1, 2 y 3 minutos. Luego de ese tiempo de ajuste, la estación de llenado reanuda su labor.

4. Realice los cambios al modelo original y presente la cantidad de veces que se realiza el ajuste de la máquina y la cantidad de minutos adicionales al término del turno que trabajó la estación.

<sup>11</sup> Enunciado tomado de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen final 2008-1".

### Solución 1

**Entity Type Configuration:**

- Name: ARRIBOS
- Entity Type: BIDON
- Time Between Arrivals Type: Random (Expo), Value: 0.75, Units: Minutes
- Entities per Arrival: 1, Max Arrivals: (7.5\*60-TNOW)\*99999, First Creation: 0.0

**Regulator Configuration:**

- Name: RECIPIENTE
- Capacity: 25, Initial Level: 0
- Regulators: RECIPIENTE.ENTRADA, 40, Per Minute

**Process Flow:** ARRIBOS → PIDE REGULADOR → LLENAR BIDON → RESET → VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON → LIBERA REGULADOR → ALMACEN

**Regulator Settings:**

- Regulator: Regulator, RECIPIENTE.ENTRADA
- Regulator: Regulator, RECIPIENTE.ENTRADA

**Flow Configuration:**

- Type: Add
- Flow Source/Destination: Regulator Name: RECIPIENTE.ENTRADA
- Stop Flow After Quantity: UNIF(24,25)
- Quantity Save Attribute: VOLUMEN

**Assignments:** Other, TANKLEVEL(RECIPIENTE), 0

**Statistic Table:**

	Name	Type	Expression
1	BIDONES LLENADOS	Output	ALMACEN.NumberOut
2	MINUTOS ADICIONALES	Output	TNOW - 7.5*60

**User Specified Results:**

Expression	Average
VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON	24.4915
Output	Value
BIDONES LLENADOS	598.00
MINUTOS ADICIONALES	1.5123

**Simulation Setup:**

- Number of Replications: 1
- Warm-up Period: 0.0, Time Units: Hours
- Replication Length: Infinite, Time Units: Hours
- Hours Per Day: 24, Base Time Units: Minutes

**Nota:** No es recomendable modelar el tanque de la máquina automática como un TANQUE con capacidad infinita, ya que se tendrá problemas debido a la cantidad de entidades en sistema, que soporta la versión estudiantil.

### Solución 2: Sin utilizar tanques

**Process Flow:** ARRIBOS → VOLUMEN A LLENAR → LLENAR BIDON → VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON → ALMACEN

**Process Configuration:**

- Action: Seize Delay Release
- Resources: Resource, MAQUINA, 1
- Delay Type: Expression, Units: Minutes
- Expression: (VOLUMEN) / 40

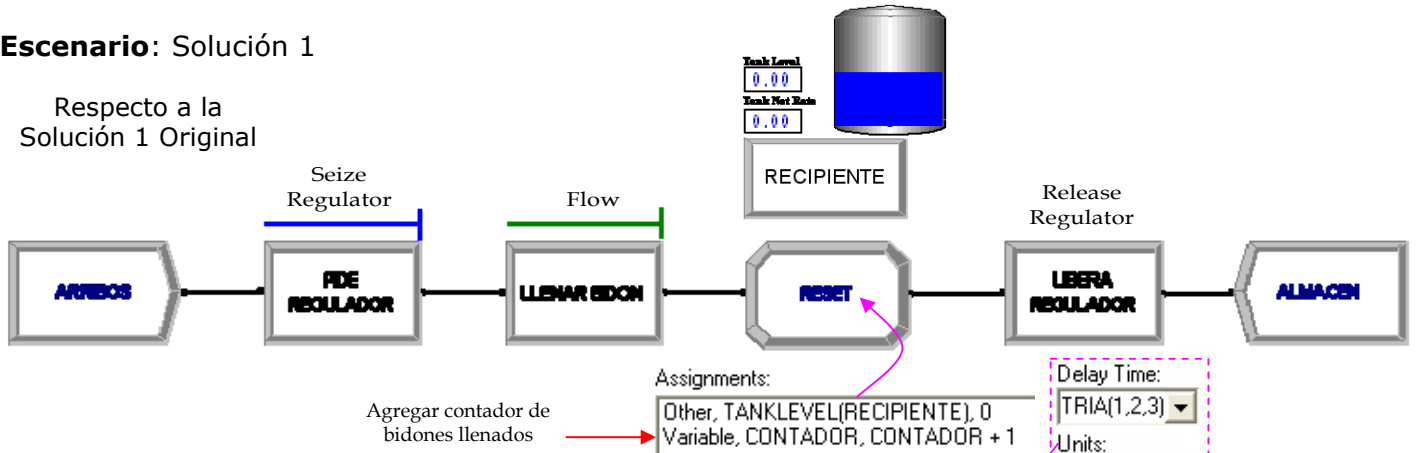
**Assignments:** Attribute, VOLUMEN, UNIF(24,25)

**User Specified Results:**

Expression	Average
VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON	24.4857
Output	Value
BIDONES LLENADOS	606.00
MINUTOS ADICIONALES	2.7322

**Escenario: Solución 1**

Respecto a la Solución 1 Original

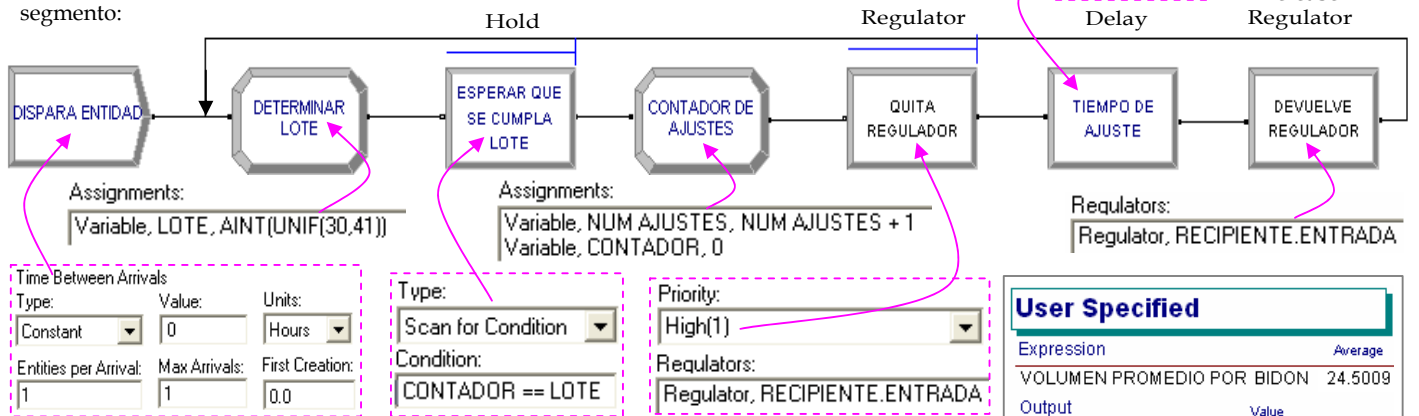


Agregar contador de bidones llenados

Assignments:  
Other, TANKLEVEL(RECIPIENTE), 0  
Variable, CONTADOR, CONTADOR + 1

Delay Time:  
TRIA(1,2,3)  
Units:  
Minutes

Agregar el siguiente segmento:



Assignments:  
Variable, LOTE, AINT(UNIF(30,41))

Assignments:  
Variable, NUM AJUSTES, NUM AJUSTES + 1  
Variable, CONTADOR, 0

Regulators:  
Regulator, RECIPIENTE.ENTRADA

Time Between Arrivals  
Type: Constant  
Value: 0  
Units: Hours  
Entities per Arrival: 1  
Max Arrivals: 1  
First Creation: 0.0

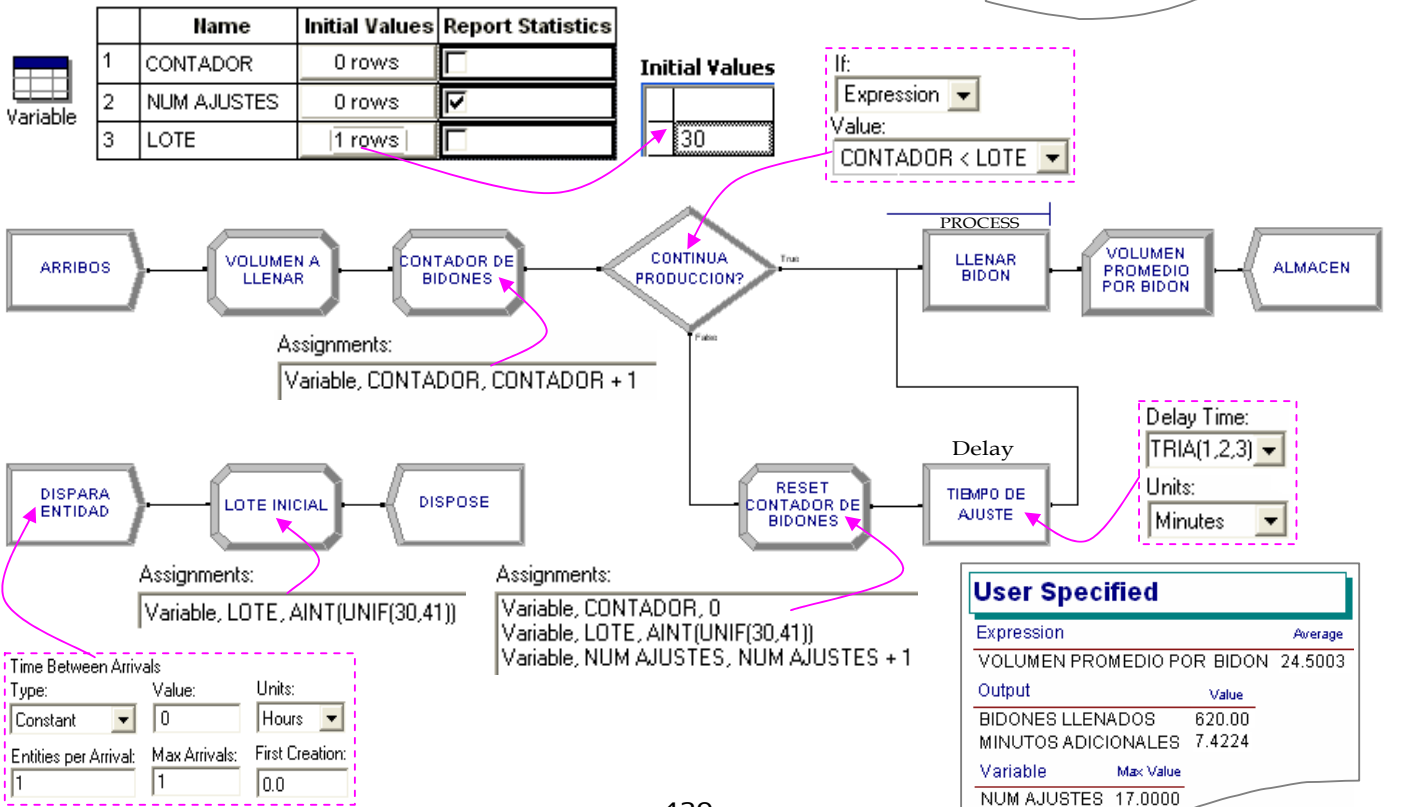
Type: Scan for Condition  
Condition: CONTADOR == LOTE

Priority: High(1)  
Regulators: Regulator, RECIPIENTE.ENTRADA

User Specified	
Expression	Average
VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON	24.5009
<b>Output</b>	
BIDONES LLENADOS	610.00
MINUTOS ADICIONALES	5.5658
<b>Variable</b>	
NUM AJUSTES	17.0000

**Escenario: Solución 2**

Respecto a la Solución 2 original



Assignments:  
Variable, CONTADOR, CONTADOR + 1

Assignments:  
Variable, LOTE, AINT(UNIF(30,41))

Assignments:  
Variable, CONTADOR, 0  
Variable, LOTE, AINT(UNIF(30,41))  
Variable, NUM AJUSTES, NUM AJUSTES + 1

Delay Time:  
TRIA(1,2,3)  
Units:  
Minutes

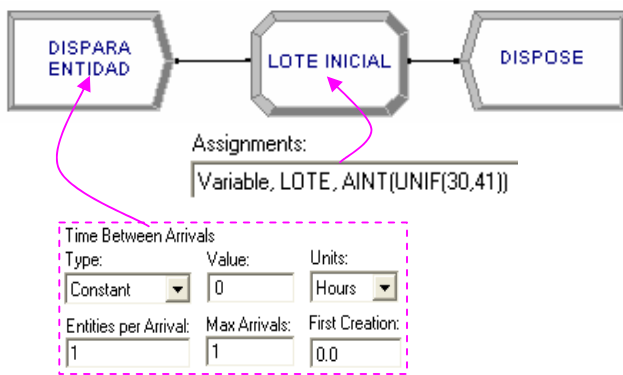
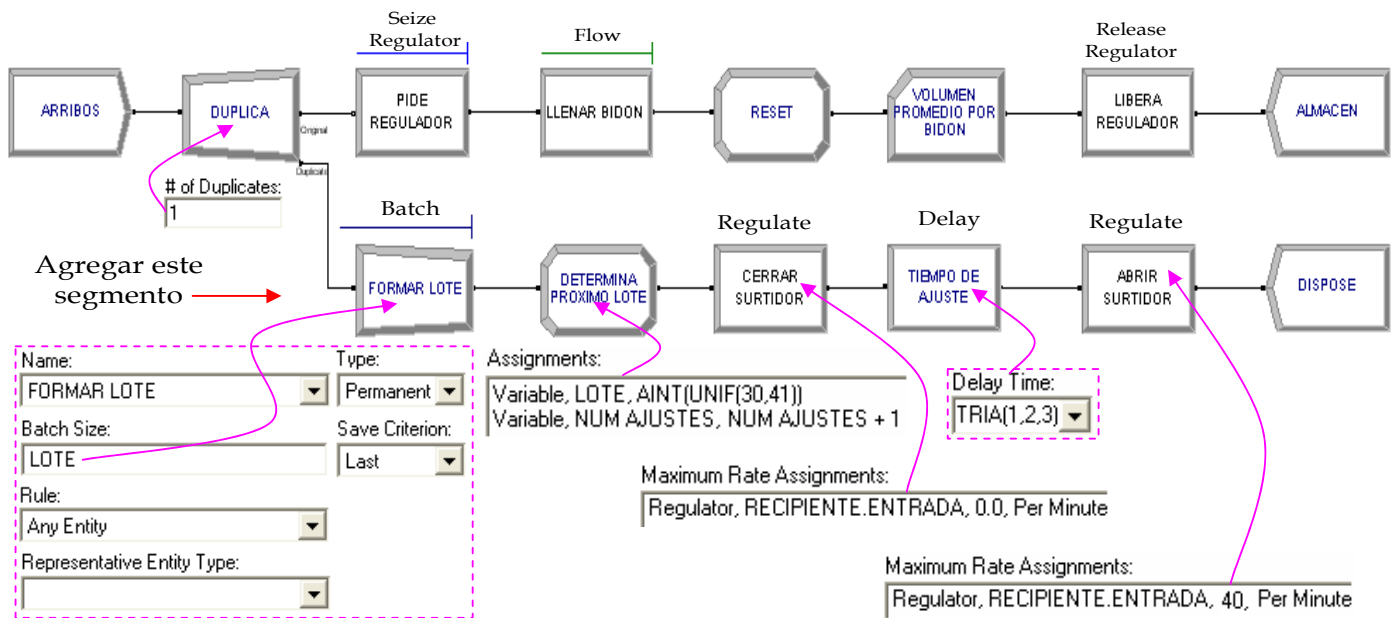
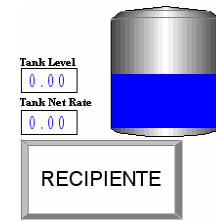
Time Between Arrivals  
Type: Constant  
Value: 0  
Units: Hours  
Entities per Arrival: 1  
Max Arrivals: 1  
First Creation: 0.0

User Specified	
Expression	Average
VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON	24.5003
<b>Output</b>	
BIDONES LLENADOS	620.00
MINUTOS ADICIONALES	7.4224
<b>Variable</b>	
NUM AJUSTES	17.0000

### Escenario: Solución 3

Respecto a la Solución 1 Original

Variable	Name	Initial Values	Report Statistics	Initial Values
	1 NUM AJUSTES	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>	
	2 LOTE	1 rows	<input type="checkbox"/>	30



User Specified	
Expression	Average
VOLUMEN PROMEDIO POR BIDON	24.4918
Output	Value
BIDONES LLENADOS	606.00
MINUTOS ADICIONALES	8.8251
Variable	Max Value
NUM AJUSTES	17.0000



Final de capítulo

**Casos propuestos****Caso 1: La bebida del sabor**

Una pequeña empresa embotelladora produce y embotella una bebida de gran demanda en la zona sur. En su planta de producción posee un tanque de 1.000 litros de capacidad.

La empresa emplea dos saborizantes: X e Y, que en diferentes cantidades se diluyen en agua tratada, generando un ritmo constante de ingreso al tanque de 300 litros por hora. Este ingreso es constante durante 2 horas, luego se hace una pausa de 30 minutos para preparar la mezcla, después el flujo se reanuda y el ciclo se repite.

El tanque alimenta a la embotelladora a un ritmo de 350 litros por hora. Por cuestiones técnicas se deben controlar los niveles máximo (1.000 litros) y mínimo (0 litros). Considere que se reanuda el proceso de alimentación al embotellado, cuando el nivel sube a 250 litros y se reanuda el ingreso de los saborizantes cuando el nivel baja a 750 litros.

La capacidad de cada botella es de 3.5 litros, estas se embotellan y se tapan una por una. El tiempo para cambio de botella es una distribución normal con una media de 0.01 horas y una desviación estándar de 0.001 horas, después la botella se pone en una caja con capacidad para 6 botellas y luego se almacena. Despreciar el tiempo de colocar una botella en la caja y llevarla al almacén.

Condiciones iniciales:

El volumen actual del tanque es de 500 litros y existe una cantidad suficiente de botellas para soportar todo el proceso.

Se pide:

Simular el sistema descrito durante 24 horas continuas.

## Caso 2: Producción de vidrio plano<sup>12</sup>

La compañía VPP produce vidrio plano y transparente en hojas rectangulares; el uso principal es para ventanas de viviendas. La fábrica trabaja a tres turnos diarios, de lunes a domingo.

La materia prima principal del vidrio es la sílice (o arena cuarzosa); sin embargo, la mezcla que ingresa al horno para fundirse tiene otros componentes que entran en menores proporciones. La planta de producción posee un horno de fusión, el cual funciona en forma continua durante todo el año y por cinco años consecutivos. Al cabo de dicho tiempo, el horno se apaga por un mínimo de dos meses, para cambiar refractarios y realizar mantenimiento. Luego de este corto período, el horno se prende nuevamente y permanecerá así por cinco años más.

### Recepción de materias primas

Las materias primas provienen de diversos lugares, por ejemplo, de Llocllapampa en Junín, otras, como el carbonato de sodio y el sulfato sódico, son importadas, aunque la mayoría son nacionales.

En la recepción se controla sobre todo el peso de la materia prima. Por ejemplo, en el caso de la arena, se pesa primero el camión con carga y luego sin carga; lo que se registra es la diferencia. Las materias primas se reciben en los almacenes externos, y en el caso de la arena esta es apilada en un terreno, a la intemperie.

### Materias primas

El balance de materia nos indica la relación entre las materias primas que ingresan al horno y el vidrio que se produce. En este sentido, para producir 100 kilos de vidrio, los pesos y porcentajes de las materias primas son los siguientes:

	<b>Componentes</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>(%)</b>	<b>Aporte</b>
1	Arena cuarzosa	68.08	55.3	Vitrificante, contiene la sílice: SiO <sub>2</sub>
2	Carbonato de sodio	22.57	18.3	Fundente: Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
3	Feldespato	7.22	5.9	Estabilizador, contiene la alúmina: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
4	Carbonato de calcio	2.43	1.9	Estabilizador, contiene la caliza: CO <sub>3</sub> Ca
5	Dolomita	19.40	15.8	Estabilizador, CO <sub>3</sub> Ca y CO <sub>3</sub> Mg
6	Sulfato sódico	3.40	2.8	Afinante Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Total	123.10	100	

A esta mezcla pura o batch se debe incluir un 30% de cullet (vidrio reciclado y chancado), cuya fusión no tiene pérdida de materia. Así, cada batch que ingresa al horno de fusión contiene 175.86 kilos de mezcla, de los cuales, 52.76 kilos corresponden al cullet.

<sup>12</sup> TORRES VEGA, P. J. "Estudio de factibilidad del mercado e ingeniería del proyecto para la implementación de una fábrica de vidrios planos Sistema Pitsburg". Tesis para optar el título de ingeniero industrial. Universidad de Lima, 1983.



Componentes		Frecuencia de entregas (horas)	Inventarios iniciales (ton)
1	Arena cuarzosa	UNFRM(2,3)	1000
2	Carbonato de sodio	UNFRM(4,5)	2910
3	Feldespatos	UNFRM(11,13)	400
4	Carbonato de calcio	UNFRM(22,26)	102
5	Dolomita	UNFRM(4,5)	800
6	Sulfato sódico	UNFRM(22,26)	600
7	Cullet	Cuando baja a 96 t se repone a 168	168

Cada camión que llega a la planta descarga en promedio de acuerdo a una UNIF(3.5, 4.5) toneladas para cualquier materia prima.

### Acondicionado de las materias primas

Todas las materias primas deben ser acondicionadas antes de enviarse a sus silos de almacenamiento. La arena, por lo general, llega con una humedad promedio de 7% y debe pasar por una secadora en la que se logra una humedad máxima del 3%, que es lo permisible. Considere que la arena es transportada por una faja en su trayecto hacia el silo de almacenamiento y que es en un tramo de este en que se realiza la operación de secado. Luego ingresa al silo 1 a razón de 3 ton/hora.

En el caso del cullet, este debe ser triturado antes de ser almacenado en el silo correspondiente. En un turno de 8 horas se pueden triturar hasta 72 toneladas de cullet. Luego mediante una faja ingresa al silo 7 a razón de 4 ton/hora.

Al igual que en los casos de la arena y el cullet el resto de materias primas también se acondicionan durante el trayecto hacia los silos (2...6), a los cuales ingresarán a razón de 1 ton/hora.

### Almacenaje de las materias primas

Una vez acondicionadas las materias primas estas se trasladan a los silos de almacenamiento. Cada una de las siete materias primas, incluyendo el cullet, posee un silo exclusivo, cuya capacidad es de 23 toneladas. Dado que la producción de vidrio es continua, se debe asegurar la alimentación al horno de fusión; no debe existir la posibilidad de que en algún instante queden vacíos. Considere un *stock* mínimo en cada silo de m.p., correspondiente a 18 toneladas.

Efectuar todas las mediciones, con una tolerancia de 100 kilos. Cuando un silo de materia prima completa su capacidad, se debe detener el abastecimiento a este, es decir que todo el proceso anterior se detiene.

### Pesado de las materias primas

Para formar la mezcla o el batch los silos llenan recipientes de volúmenes variables. El volumen de cada recipiente ha sido diseñado tomando como base el porcentaje en peso con que entra en el batch. Llenos estos recipientes, se ingresan a la mezcladora. Para llenar los recipientes, se abren los 7 silos simultáneamente y dado que son de di-

ferente tamaño, se llenan en diferentes tiempos, pero al cabo de un minuto todos están llenos y listos. Inmediatamente se depositan en la mezcladora, donde se juntan y mezclan durante 2 minutos.

Terminado este proceso, el batch es depositado en el elevador de cangilones para su almacenaje en la tolva de alimentación del horno de fusión; el elevador descarga la mezcla en la tolva, a razón de 5 ton/hr.

### **Tolva de alimentación al horno de fusión**

Esta tolva está ubicada justo en la entrada del horno y tiene una capacidad de 23 toneladas. Por razones técnicas, nunca baja a menos de 18 toneladas; en todo caso, si quedase vacía, se reanuda el abastecimiento al horno al alcanzar una tonelada. La tolva descarga la mezcla al horno a razón de 4 ton/hr.

### **Horno de fusión**

Trabaja con una serie de quemadores ubicados en los pórticos en los costados del horno, que se prenden en forma alternada. El horno tiene una capacidad de 40 toneladas y nunca debe bajar a menos de 36 toneladas.

La mezcla se funde en el horno a 1.800°F; la lámina de vidrio es estirada verticalmente y guiada por un labio refractario (sumergido 15 cm); este determina su espesor.

### **Jalado de la hoja de vidrio**

El ascenso de la lámina lo soportan 32 pares de rodillos en un recorrido de 15 metros en el que atraviesan diversas estaciones, donde se regulan las temperaturas de templado. En el último piso, la hoja es cortada y apilada en soportes móviles, que luego se bajan por ascensor hacia el almacén. La producción de vidrio es a razón de 3.3 ton/hr.

Condiciones iniciales:

- El sistema ya está produciendo vidrio y se encuentra estable.
- Los camiones comienzan a llegar con las materias primas desde el primer instante, excepto el cullet.
- Todos los silos de materia prima contienen 12 toneladas cada uno, incluso el cullet.
- Se inicia la descarga de los silos de materia prima a los recipientes.
- Se inicia el mezclado de un batch.
- El elevador que alimenta a la tolva contiene media tonelada.
- La tolva que alimenta el horno de fusión contiene 20 toneladas.
- El horno de fusión contiene 38 toneladas.

Se pide:

1. Simular el sistema descrito durante 7 días; se desea llevar a cabo un experimento de simulación para evaluar el riesgo operativo generado por:
  - Incumplimiento en el abastecimiento de materias primas.
  - Falla de la mezcladora o del elevador.
2. Determine los siguientes indicadores:
  - La cantidad de veces que la mezcladora detiene su producción.
  - ¿Cuántas horas estuvo detenida la mezcladora durante la semana simulada?

### Escenario 1<sup>13</sup>

Se desea incorporar al modelo la verdadera forma como el proceso productivo genera el cullet. En el momento de cortar las planchas de vidrio producidas, se genera un 5% de chatarra de vidrio o desperdicios, esto se denomina cullet. Esta chatarra se va acumulando para abastecer a la chancadora en el momento en que tiene que preparar un lote de 72 toneladas de cullet. Si no alcanzara la cantidad de chatarra acumulada, la diferencia tiene que abastecerse del producto terminado, es decir, se procede a romper cierta cantidad de hojas de vidrio, hasta completar el requerimiento.

- Modele los cambios a su modelo original.
- Determine la cantidad de veces que se tuvo que recurrir al producto terminado, para completar el abastecimiento de chatarra.
- Determine el inventario promedio y el inventario máximo de chatarra, durante la semana simulada.

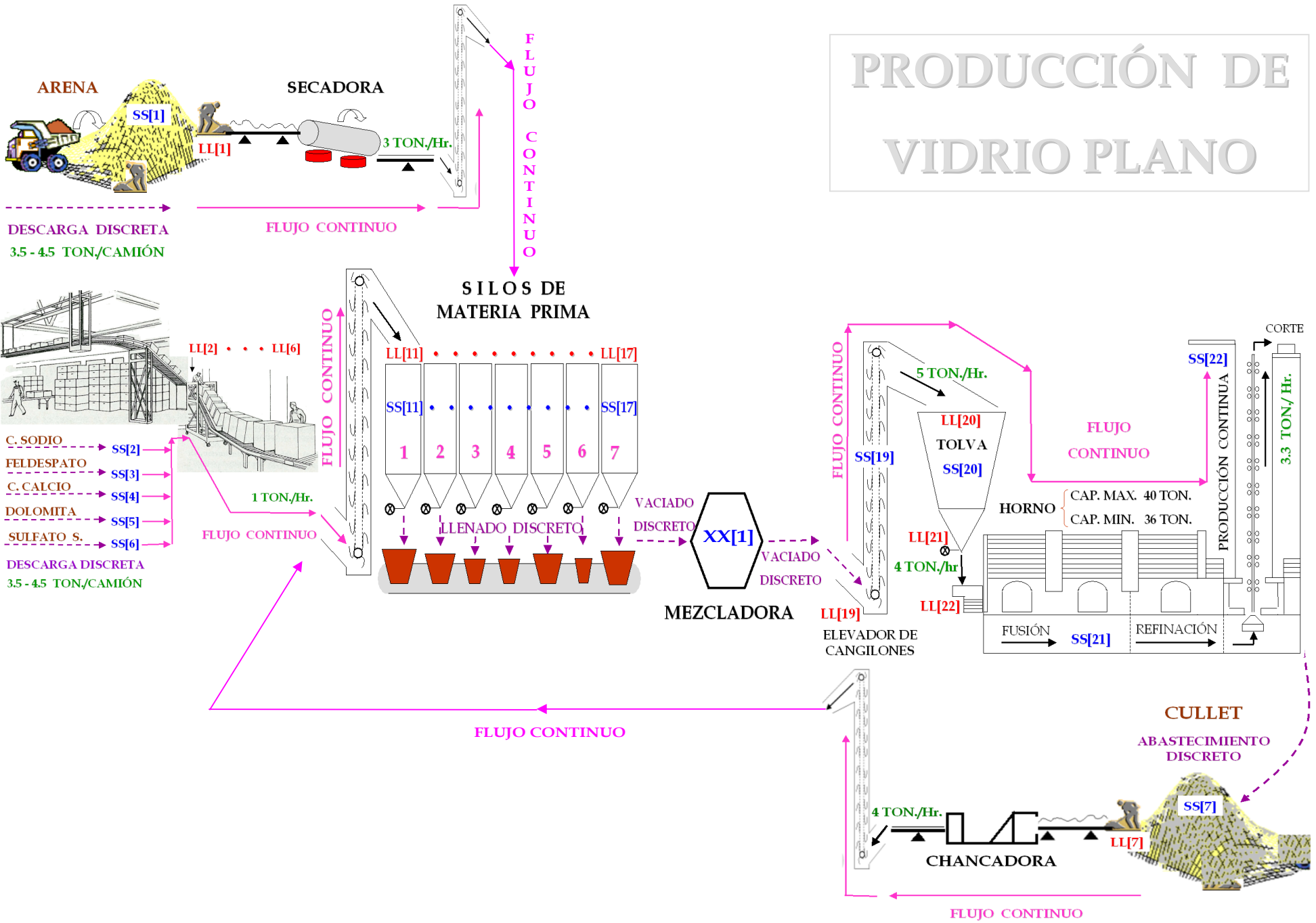
### Escenario 2

Se recibe un aviso sobre la existencia de un problema grave en el abastecimiento de carbonato de calcio. La gerencia ordena usar el modelo para determinar cuanto tiempo pasaría produciendo el vidrio, sin recibir este componente. El proceso de producción se tiene que detener obligatoriamente si el contenido del horno baja a 24 toneladas. Este límite se usa en caso de emergencias como la actual. El proceso normal del horno sigue siendo entre 36 y 40 toneladas. La idea de consumir todo lo existente de este componente, detener la mezcladora cuando se quede vacío el silo correspondiente, dejar de llenar la tolva cuando el elevador se quede vacío y determinar en qué momento el horno baja su contenido a 24 toneladas, deteniendo la producción de vidrio.

- Incorpore a su modelo original las modificaciones que requiere su modelo para efectuar la medición solicitada
- Efectuar una corrida al modelo y contestar las siguientes preguntas:
  1. ¿Cuántas horas transcurrirían hasta que tenga que detenerse la producción?
  2. Observando el resultado obtenido, los inventarios iniciales de los seis componentes y los consumos respectivos, ¿cree usted que el proceso productivo está protegido equilibradamente entre los seis componentes, en cuanto al riesgo operacional por abastecimiento?

<sup>13</sup> Los escenarios 1 y 2 han sido tomados de Universidad de Lima, Escuela de Ingeniería. "Examen final 2005-2".

# PRODUCCIÓN DE VIDRIO PLANO



**Caso 3: Simulación del tráfico, enfoque macroscópico.**

En el cruce de dos avenidas existe un semáforo para controlar el tráfico; se desea simular como un flujo, la dinámica de los vehículos que van en la dirección A y los que van en la dirección B. El semáforo se inicia con luz verde para los vehículos de la dirección A y con luz roja para los de la dirección B; luego de tres minutos cambia a luz roja para los de A y ahora la luz verde la tienen los de B, luego el ciclo se repite en forma alternada. Los tiempos entre arribos de los vehículos se ajusta a una distribución EXPO(15) segundos y una EXPO(10) segundos para los vehículos de A y B, respectivamente.

Suponga que al inicio hay 20 vehículos en la dirección A, mientras que en B no hay ninguno. Se ha determinado que durante la luz verde el tráfico en la dirección A fluye a razón de 600 vehículos por hora, mientras que en B la tasa es de 800 vehículos por hora.

1. Formule un modelo para simular la situación descrita y ejecútelo durante 24 horas.
2. Determine la cantidad máxima de vehículos en A y en B, que se encuentran frente al semáforo en un determinado instante.
3. ¿Cuántos vehículos circularon por cada dirección durante la simulación?
4. Determine el tiempo promedio de espera de los vehículos, en cada dirección.

**Escenario**

Suponga que durante la luz roja para los vehículos de la dirección B, una cantidad de entre 1 y 5 vehículos, uniformemente distribuidos, optan por interrumpir la espera y se desvían por una calle alterna.

5. Determine si esta situación afecta al número promedio de vehículos en espera.



## **Anexos**

- 1. Modelo teórico de colas**
- 2. Funciones y variables en Arena**
- 3. Tablas estadísticas**
- 4. Redes de Petri**

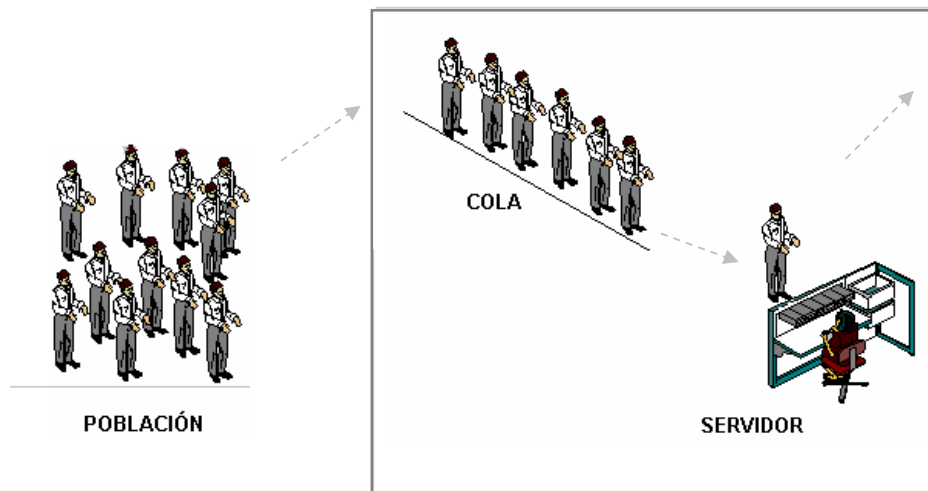




	Anexo 1
	<b>MODELO TEÓRICO DE COLAS</b> (Aspectos básicos)

Un problema de colas o líneas de espera se produce cuando la demanda de un servicio supera la capacidad de proporcionar dicho servicio. En este modelo, el sistema está compuesto por **servidores** que realizan el servicio y por las **entidades** que arriban al sistema para obtener dicho servicio. Dependiendo del sistema que se trate, las entidades pueden ser clientes, piezas, autos, barcos, etcétera. Mientras que los servidores pueden ser cajeros, máquinas, semáforos, grúas, operarios, etcétera.

Tanto los arribos de las entidades al sistema como el tiempo de servicio son fenómenos que generalmente tienen asociadas fuentes de variación que se encuentran fuera de control del tomador de decisiones, de tal manera que se requiere de la utilización de modelos estocásticos que permiten el estudio de este tipo de sistemas.



Ejemplos:

- Los clientes de un Banco que esperan en cola por un servicio.
- El arribo de lotes de productos a una estación de trabajo para ser procesados.
- Las llamadas telefónicas que ingresan a una oficina para ser atendidas.
- Órdenes de compra generadas por el departamento de ventas que arriban a la planta para su producción.
- Reportes de equipos descompuestos que ingresan a la oficina para ser atendidos.

**Clasificaciones:**

- Tamaño de la población { Finita  
Infinita
- Cantidad de colas { 1 cola  
Varias colas
- Cantidad de servidores { 1 servidor  
Varios servidores



**Modelo básico:**    **1 cola** con **1 servidor**    (población infinita)

Posee los siguientes elementos:

**1. Cantidad de entidades en el sistema**

La cantidad de entidades que están recibiendo el servicio actualmente, así como las que están esperando.

**2. Número de entidades en cola**

La cantidad de entidades que están esperando por el servicio

**3. Tiempo de espera**

Lapso que media entre el momento en que una entidad ingresa al sistema y el momento en que sale.

**4. Tiempo de espera en la cola**

Tiempo que media entre el momento que la entidad ingresa al sistema y el comienzo del servicio.

### Tasa promedio de llegadas ( $\lambda$ )

En adelante, a cada llegada la llamaremos *tarea*. Dado que no se conoce con certeza el lapso entre dos llegadas, necesitamos especificar para él una distribución de probabilidad. La distribución exponencial (llamada también exponencial negativa) proporciona una representación razonable del proceso de llegada en gran número de situaciones en los campos de producción y servicios.

La distribución exponencial queda especificada mediante un parámetro. Este parámetro  $\lambda$  es la tasa media de llegadas que se presenta en un período dado.

*Ejemplo:*

$\lambda = 0.05$  tareas/minuto, un promedio de cinco céntimos de tarea llega cada minuto.

$1/\lambda = 1/0.05 = 20$  minutos, en promedio llega una tarea cada 20 minutos.

Otra distribución utilizada es la Poisson, debido a la relación que existe entre ambas. Si el lapso de llegadas tiene una distribución exponencial, entonces el número de llegadas en un intervalo de tiempo específico tiene una distribución de Poisson.

### Tiempo promedio de Servicio ( $\mu$ )

Es el tiempo medio que dura la terminación de una tarea; se maneja también mediante la distribución exponencial, cuyo parámetro en este caso llamaremos  $\mu$ , que representa la tasa promedio de servicio expresado en tareas/minuto.

*Ejemplos:*

$\mu = 0.10$  tareas/minuto, en promedio se atiende un décimo de tarea cada minuto.

$1/\mu = 1/0.10 = 10$  minutos, el tiempo promedio de servicio de una tarea es de 10 minutos.

### Suposiciones del modelo básico

- Las fórmulas que se utilizarán para este modelo básico se basan en que  $\lambda < \mu$ . Si no se cumple esta condición el número de personas en la cola aumentaría sin límite.

Suponga que  $\lambda = 0.25$  y  $\mu = 0.10$  entonces en promedio llegarán personas a la cola cada 4 minutos y, en promedio, se atenderá una tarea cada 10 minutos. Entonces la operación de servicio quedaría rezagada conforme avance el tiempo y la línea de espera seguirá creciendo.

- Para el modelo se considera un estado estacionario, es decir que la probabilidad de que se observe una cierta cantidad de personas (digamos 4) en el sistema no depende del momento en el que se cuenten. Cuando se ha alcanzado un estado estacionario la probabilidad de que haya, por ejemplo, cuatro personas en el sistema será la misma a las 8.00 a.m. que a las 2.00 p.m.
- **Tamaño de la línea de espera**  
No hay límite para el número de tareas que pueden esperar en la línea, es decir que la capacidad de la cola es infinita.
- **Criterios de atención por el servidor**  
Las tareas son atendidas sobre la base de que el primero en llegar es el primero en ser atendido (FIFO). Es decir, se atenderá en el mismo orden en el que las tareas lleguen a la cola.
- **Horizonte de tiempo**  
El sistema funciona en forma continua y tiende al infinito.

**Características de operación**

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

**L:** Número promedio de tareas que se encuentran en el sistema (*los que están siendo atendidos más los que están esperando*).

$$L_q = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)$$

**L<sub>q</sub>:** Número promedio de tareas en la cola o línea de espera (*tamaño de cola*).

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

**W:** Tiempo promedio de permanencia total de una tarea en el sistema, incluye la duración del servicio (*expresado en minutos*).

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)$$

**W<sub>q</sub>:** Tiempo promedio de demora o espera de una tarea en la cola, antes de ser atendida (*expresado en minutos*).

$$P_0 = 1 - \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)$$

**P<sub>0</sub>:** Probabilidad de que el sistema esté vacío.

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\boxed{L = \lambda W} \quad \boxed{L_q = \lambda W_q} \quad \boxed{L = W_q + \frac{1}{\mu}}$$

*Ejemplo:*

En la oficina administrativa de una empresa se dispone de una máquina fotocopidora, a esta oficina los usuarios llegan de acuerdo a una distribución exponencial y se ubican junto a la máquina formando una cola. Cada uno usa la máquina para realizar una tarea específica al llegar su turno. Estos trabajos varían desde obtener una copia de una página hasta sacar 100 copias de un informe de 25 páginas.

La empresa labora durante 8 horas diaria y los estudios realizados indican que el tiempo promedio de llegada entre las tareas es de 20 minutos. El tiempo promedio en el que se termina una tarea se ajusta a una distribución exponencial y es de 10 minutos.

Determinemos algunos indicadores:

- a) Tasa promedio de llegadas:

$$1/\lambda = 20 \quad \therefore \quad \lambda = 0.05 \text{ tareas/minuto}$$

- b) Tasa promedio de servicio:

$$1/\mu = 10 \quad \therefore \quad \mu = 0.10 \text{ tareas/minuto}$$

- c) ¿El caso corresponde al modelo  $\lambda < \mu$  o al modelo  $\lambda > \mu$  ?

Corresponde al modelo  $\lambda < \mu$  ya que  $0.05 < 0.10$

- d) Cantidad esperada de clientes en el sistema:

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{0.05}{0.10 - 0.05} = 1 \text{ persona o tarea}$$

- e) Cantidad esperada en la cola:

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{0.0025}{0.10(0.10 - 0.05)} = 0.5 \text{ personas}$$

- f) Tiempo promedio de permanencia en el sistema (*desde que llega hasta que sale del sistema*)

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{0.10 - 0.05} = 20 \text{ minutos}$$

- g) Demora promedio en la línea de espera:

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{0.05}{0.10(0.10 - 0.05)} = 10 \text{ minutos}$$

- h) ¿Cuál es la probabilidad de que el sistema esté vacío?

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \frac{0.05}{0.10} = 0.5$$

La probabilidad de que el sistema esté vacío es del 50%.

- i) ¿Cuál es la probabilidad de que el servidor esté ocupado?

$$P_0 = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0.05}{0.10} = 0.5$$

La probabilidad de que el servidor esté ocupado es del 50%.

- j) Promedio total de llegadas al día:

$$(0.05) (8) (60) = 24 \text{ tareas/día en promedio.}$$

- k) ¿Cuántas horas en total se consumen por este servicio?

$$Total = \left( 24 \frac{\text{llegadas}}{\text{día}} \right) W = \left( 24 \frac{\text{llegadas}}{\text{día}} \right) \left( 20 \frac{\text{min}}{\text{llegada}} \right) = 480. \text{min} = 8. \text{horas}$$

- l) ¿Cuál es la probabilidad de que haya un cliente en el sistema?

$$P_1 = \left( 1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) = (0.5)(0.5) = 0.25$$

m) ¿Cuál es la probabilidad de que haya 2 clientes en el sistema?

$$P_2 = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 = (0.5)(0.5)^2 = 0.125$$

n) ¿Cuál es la probabilidad de que haya n clientes en el sistema?

$$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$$

o) ¿Cuál es la probabilidad de que haya un cliente en cola?

La probabilidad de que haya un cliente en cola es igual a la probabilidad de que haya 2 en el sistema:

$$P_2 = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 = (0.5)(0.5)^2 = 0.125$$

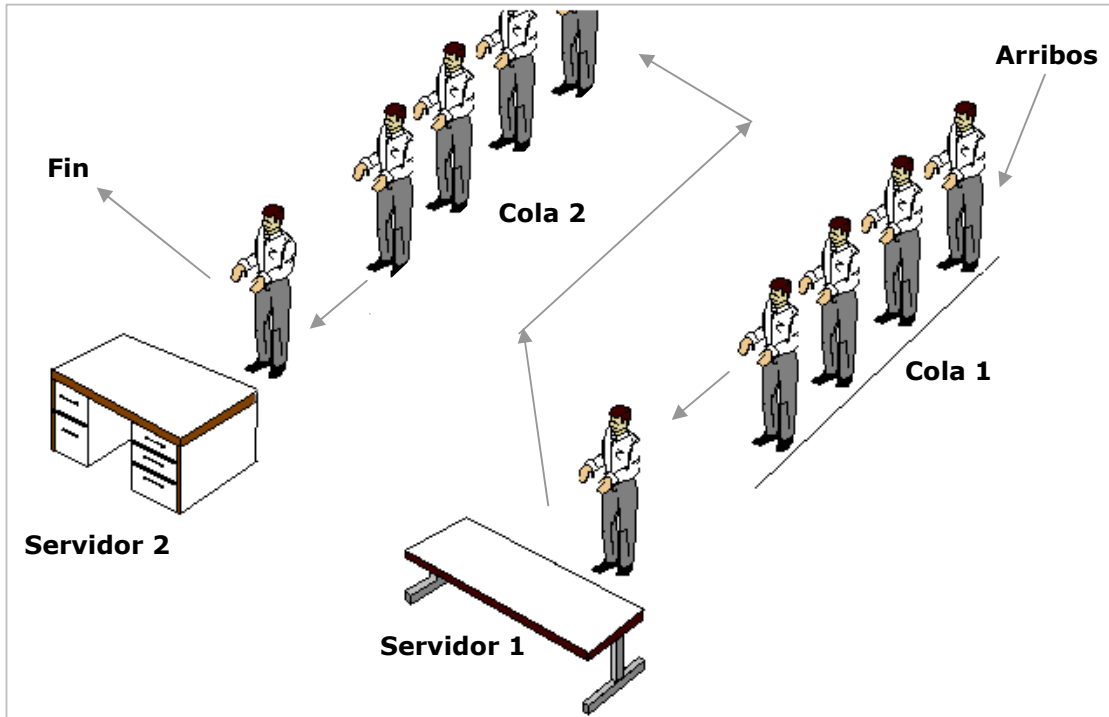
p) ¿Cuál es la probabilidad de que haya n clientes en cola?

$$P(n) = P_{n+1} = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n+1}$$

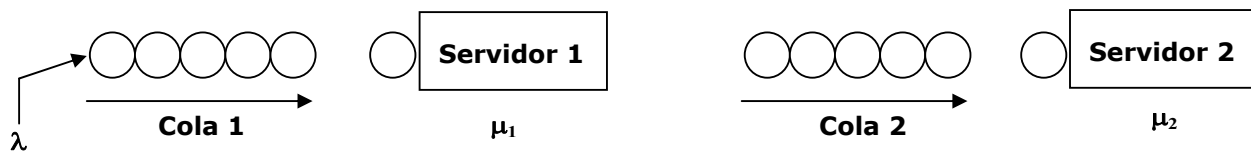
q) ¿Cuál es la probabilidad de tener n o más clientes en el sistema?

$$\begin{aligned} P(x \geq n) &= P_n + P_{n+1} + P_{n+2} + P_{n+3} + \dots \\ &= 1 - [P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{n+1}] \\ &= 1 - \left[ \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) + \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^1 + \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \dots + \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n+1} \right] \\ &= \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \end{aligned}$$

**Variante del modelo básico:** 2 colas, 2 servidores en serie y población infinita



Analizamos los componentes de este modelo:



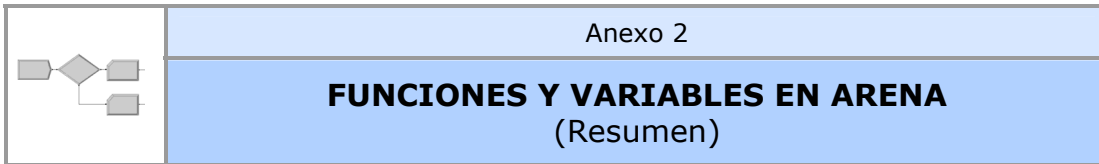
$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

$$L_q = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)$$

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)$$





## Principales funciones matemáticas

- **ABS**(val)  
Retorno el valor absoluto del argumento.
- **MX** (val 1, val 2,..., val i)  
Retorna el valor máximo de una lista. Ejemplo: MX(UNIF(2,5), NORM(4,0.5))
- **MN** (val 1, val 2,..., val i)  
Retorna el valor mínimo de una lista.
- **AINT**(Expresión)  
Trunca la parte decimal de un número real. Ejemplo: AINT(UNIF(15,25))  
La expresión UNIF(15,25) es una distribución uniforme continua y genera números reales, con intervalo abierto en el extremo derecho, tal que:  $15.0 \leq X < 25.0$ , al anteponer la función AINT esta trunca la parte decimal de dicho número real, quedando este como un valor entero, tal que:  $15 \leq X < 25$ , es decir la variable toma valores enteros entre 15 y 24.
- **ANINT**(Expresión)  
Aproxima un número real al entero superior. Ejemplo: ANINT(UNIF(15,25))  
La expresión UNIF(15,25) es una distribución uniforme continua con intervalo abierto en el extremo derecho, que genera números reales, tal que:  $15.0 \leq X < 25.0$ . Al anteponer la función ANINT se aproxima dicho número real al próximo valor entero superior tal que:  $15 \leq X \leq 25$ , es decir la variable toma valores enteros entre 15 y 25.
- **AMOD**(val1, val2)  
Retorna el resto real de:  $(val1 - AINT(val1/val2)) * val2$
- **MOD**(val1, val2)  
Retorna el resto entero, similar al AMOD, excepto que los argumentos primero son truncados a valores enteros.
- **DISC**(PROB1, TIPO1, PROB1+PROB2, TIPO2,....., PROB. ACUMULADA, TIPOi)  
La función "DISC" asigna, en forma aleatoria, un valor a un atributo de acuerdo a la probabilidad especificada. Para el ejemplo, se asigna el valor 1 o 2 al atributo TIPO, proporcionalmente según un 85% y 15%, respectivamente. Ejemplo:

En este ejemplo se representa la llegada de clientes al cine. El 20% llega solo, el 50% llega en pareja y el 30% llega en grupo de 4 personas.



Name:	Entity Type:	
LLEGADA AL CINE	CLIENTES	
Time Between Arrivals		
Type:	Value:	Units:
Random (Expo)	5	Minutes
Entities per Arrival:	Max Arrivals:	First Creation:
DISC(0.2, 1, 0.7, 2, 1, 4)	Infinite	0.0

---

## Principales atributos de Arena

---

- **Entity Type**

Ejemplo: Módulo Assign: Entity Type, PIEZA A

Cada entidad que pase por el módulo Assign guardará en el atributo Entity Type el tipo que diferencia a esa entidad de las otras.

- **Entity.SerialNumber**

Ejemplo: Módulo Assign: Attribute, NUM SERIE, Entity.SerialNumber

Cada vez que se crea una entidad por el módulo Create se genera un atributo Entity.SerialNumber, cuyo valor es único. En el ejemplo, este valor único se guarda en un atributo NUM SERIE, para poder identificarlo posteriormente.

- **Entity.CreateTime**

Ejemplo: Módulo Assign: Attribute, HORA ARRIBO, Entity.CreateTime

Cada vez que se crea una entidad por el módulo Create se genera un atributo Entity.CreateTime, cuyo valor corresponde a la hora en que fue creada. En el ejemplo, este valor único se guarda en un atributo llamado hora de arribo, posteriormente este atributo será utilizado en el módulo Record para calcular el tiempo de permanencia en sistema.

- **Entity.WaitTime**

Ejemplo: Módulo Record: Type: Count; Value: Entity.WaitTime == 0

El módulo Record contará aquellas entidades cuyo tiempo de espera es cero.

- **Entity Picture**

Ejemplo: Módulo Assign: Entity Picture, Picture.Red Ball

Cada entidad que pase por el módulo Assign, cambiará el icono que tiene por el asignado, es decir por la bola roja (*red ball*).

---

## Principales variables de Arena

---

Variables de control de tiempo:

- **TNOW**

Retorna el tiempo transcurrido de simulación, se actualiza cada vez que se produce un evento.

- **TFIN**

Representa la hora final programada de la ejecución de la simulación.

Variable de cola de espera:

- **NQ** (Queue ID)

Retorna el número de entidades en cola. Ejemplo:  $NQ(\text{CAJERO1.Queue}) \leq 3$

Suponga que esta expresión se evalúa en el módulo Decide. Si esta es verdadera la entidad ingresa a la cola del cajero 1, de lo contrario se dirige al cajero 2.

Variable de Miembros de Entidad Grupo:

- **NG**: Evalúa el tamaño de la Entidad Grupo que ingresa al módulo Dropoff.

- **NSYM**(Nombre del símbolo)  
La variable NSYM retorna un valor entero que corresponde al símbolo del argumento.
- **SAG**(Número del atributo)  
La variable SAG suma los atributos de las entidades dentro de una Entidad Grupo; suma los valores del número del atributo que nos interesa. Para identificar qué número le corresponde a nuestro atributo de interés, se utiliza previamente la función NSYM. Ejemplo: SAG(NSYM(peso))

VARIABLES DE RECURSOS:

- **MR**(Recurso)  
Retorna la capacidad actual del recurso. Ejemplo: MR(CAJEROS).  
Esta capacidad puede ser alterada. Los valores que toma esta variable son enteros.
- **NR**(Recurso)  
Retorna el número de recursos ocupados. Ejemplo: NR(CAJEROS)  
La disponibilidad de recursos se obtiene mediante la expresión:  
$$MR(CAJEROS) - NR(CAJEROS)$$
- **ResUtil**(Recurso)  
Retorna la utilización del recurso, es decir, la relación MR(recurso)/NR(Recurso)  
Ejemplo: **ResSeizes(CAJEROS)**
- **ResSeizes**(Recurso)  
Retorna el número de recursos que vienen siendo utilizados en ese momento.  
Ejemplo: **ResSeizes(CAJEROS)**
- **ResourceState**(Número del recurso)  
Retorna el estado actual del recurso:
  - 1: **Idle\_Res** (ocioso), cuando todas las unidades del recurso están desocupadas y no se encuentra en estado "Failed" (falla) o en estado "Inactive" (inactivo).
  - 2: **Busy\_Res** (ocupado), cuando una o más unidades del recurso están ocupadas.
  - 3: **Inactive\_Res** (inactivo), cuando el recurso tiene capacidad cero y no está en estado "Failed" (falla).
  - 4: **Failed\_Res** (falla), cuando el recurso tiene una falla que imposibilita su utilización.

VARIABLES DE ESTADÍSTICA DE CONTEO:

- **NC**(counter ID): valor de conteo. Cada vez que ocurre un conteo el valor de la variable NC es cambiado por el valor específico.

VARIABLES PERSISTENTES EN EL TIEMPO (Dstat)

- **DAVG**(Dstat ID):  
Valor promedio de los valores registrados en la replicación de la expresión definida
- **DMAX**(Dstat ID): Valor máximo.
- **DMIN**(Dstat ID): Valor mínimo
- **DSTD**(Dstat ID): Desviación estándar.

## Variables de estadísticas por observaciones (Tally)

- **TAVG**(Tally ID): Valor promedio
- **TMAX**(Tally ID): Valor máximo
- **TMIN**(Tally ID): Valor mínimo
- **TNUM**(Tally ID): Número de observaciones
- **TSTD**(Tally ID): Desviación estándar
- **THALF**(Tally ID): Half-Width al 95% de nivel de confianza alrededor del valor de la media.

## Variable índice

- **Variable J**  
Se utiliza en el módulo Search, para guardar el índice de la entidad buscada. Luego este índice será utilizado por el módulo remove.

## Variables persistentes en el tiempo (Cstat)

- **CAVG**(Cstat ID): Valor promedio de la expresión Cstat
- **CMAX**(Cstat ID): Valor máximo de la expresión durante la replicación
- **CMIN**(Cstat ID): Valor mínimo de la expresión durante la replicación
- **CSTD**(Cstat ID): Desviación estándar de los valores registrados de la expresión

## Variables de procesos de flujo

- **TankCapacity**(Tank ID)  
Capacidad del tanque. Es asignable
- **TankLevel**(Tank ID)  
Retorna el nivel actual del tanque del material en el tanque. Es asignable
- **TankNetRate**(Tank ID)  
Retorna el ratio neto del tanque. Es positivo si el nivel del tanque es incrementado, en caso contrario es negativo.
- **TankQtyAdded**(Tank ID)  
Retorna la cantidad total del material adicionada en el tanque.
- **TankQtyRemoved**(Tank ID)  
Retorna la cantidad total del material que es removida en el tanque.
- **RegulatorMaxRate**(Regulador ID)  
Retorna el máximo ratio de flujo permitido a través del regulador. Es asignable.
- **RegulatorState**(Regulador ID).  
Retorna el estado del regulador:  
1: adicionando  
-1: removiendo  
0: no en uso
- **RegulatorRate**(Regulador ID)  
Retorna el ratio actual de flujo a través del regulador
- **RegulatorQtyAdded**(Regulador ID)  
Retorna la cantidad total de material adicionada usando el regulador

- **RegulatorQtyRemoved**(Regulador ID)  
Retorna la cantidad total de material removido usando el regulador
- **RegulatorTank**(Regulador ID)  
Retorna el número del tanque con que el regulador está asociado
- **FlowRate**(Source Regulador ID, Destination Regulador ID)  
Ratio del flujo entre reguladores:  
  - > 0 , si existe flujo del regulador fuente al regulador destino
  - = 0 , no existe flujo entre reguladores
  - < 0 , si existe flujo del regulador destino al regulador fuente
- **SensorState**(Sensor ID)  
Retorna el estado del sensor (1=no disponible, 0=disponible)
- **SensorTank**(Sensor ID)  
Retorna el número del tanque con que el sensor está asociado.

### Variables de módulos básicos

Existen otros tipos de variables que son creadas en forma automática por los iconos del panel de módulos básicos. Estas variables toman el mismo nombre del módulo que las crea más una extensión que las distingue.

Módulo	Variables
Create	Nombre.NumberOut
Process	Nombre.NumberIn
	Nombre.NumberOut
	Nombre.WIP
	Nombre.WaitTime
	Nombre.NVATime
	Nombre.VATime
	Nombre.TranTime
	Nombre.OtherTime
	Nombre.WaitCost
	Nombre.NVACost
	Nombre.VACost
	Nombre.TranCost
	Nombre.OtherCost
Decide	Nombre.NumberOutTrue
	Nombre.NumberOutFalse
Assign	Nombre.NumberOut
Batch	Nombre.NumberOut
Separate	Nombre.NumberOutOrig
	Nombre.NumberOutDup
Record	Nombre.NumberOut
Dispose	Nombre.NumberOut

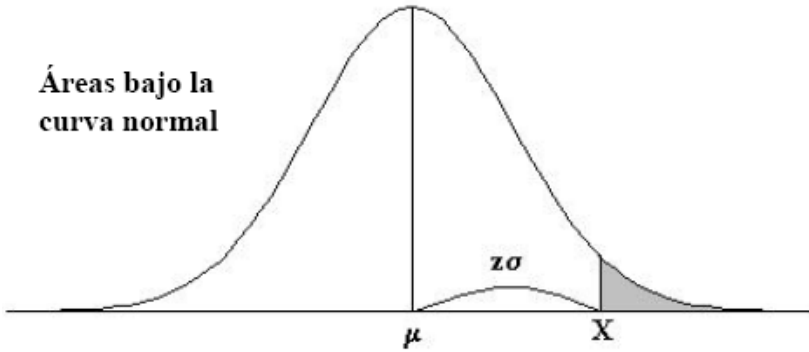


Anexo 3

**TABLAS ESTADÍSTICAS**

**TABLA 1: DISTRIBUCIÓN NORMAL**

Áreas bajo la curva normal



Ejemplo:

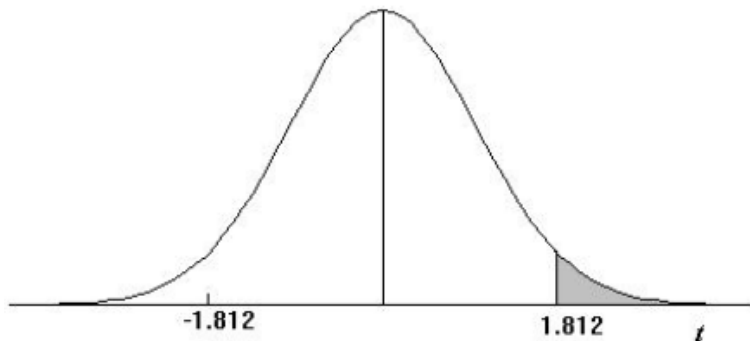
$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$P [Z > 1] = 0.1587$$

$$P [Z > 1.96] = 0.0250$$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

TABLA 2: DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT



## Ejemplo

Para  $r = 10$  grados de libertad:

$$P[t > 1.812] = 0.05$$

$$P[t < -1.812] = 0.05$$

$\alpha$ $r$	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
$\infty$	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290



Las redes de Petri\* representan una teoría matemática, una herramienta gráfica aplicada en el diseño de sistemas distribuidos discretos. La formulación de esta teoría fue presentada por el científico alemán Carl Adam Petri.

Los modelos de eventos discretos se basan fundamentalmente en los conceptos de evento y actividad. Un evento genera un cambio en las variables de estado y una actividad encapsula lo que sucede entre dos eventos. Las redes de Petri permiten representar de forma natural un modelo de eventos discretos; los eventos están asociados a transiciones y las actividades a lugares. Aunque no es el único formalismo que maneja eventos y actividades, es el único que representa formalmente el paralelismo y la sincronización.

Matemáticamente, una red de Petri puede definirse a partir de la siguiente tupla (secuencia ordenada de objetos) de cinco elementos:

$$\mathbf{RdP} = (P, T, F, W, M_0)$$

donde:

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_{np}\}$  es un conjunto finito no vacío de lugares

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_{nt}\}$  es un conjunto finito no vacío de transiciones

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_{na}\}$  es un conjunto de arcos. Es subconjunto del producto de todos los nodos  $P$  y  $T$ .

$W: A_i \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\} \forall A_i$ : peso asociado a cada arco.

$M_i: P_i \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\} \forall P_i$ : número de marcas iniciales en cada nodo tipo lugar.

(marcado inicial)

Elementos de un modelo de Petri:

### 1. Entidades

- Entidades temporales, son las que describen los objetos que fluyen y se procesan en el sistema; estos se crean y se destruyen durante la simulación. Ejemplo las piezas que fluyen por una planta de producción, o los clientes que hacen cola para recibir un servicio.
- Entidades permanentes, representan a los recursos, son los medios con los que se pueden ejecutar las actividades. Ejemplo las máquinas, o los operarios en una industria.

### 2. Atributos

Son los elementos que caracterizan a las entidades (ejemplo: tipo, hora de arribo, tiempo de ejecución de la operación, etc.). En el formalismo de las Redes de Petri, estos se representan por medio de los colores.

\* Basado en GUASCH, A.; Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios, 2003.



### 3. Actividades

Representan a las tareas, operaciones o, en general, acciones que se deben realizar en el sistema. Su duración (proceso estocástico) es un aspecto importante y debe conocerse. Una actividad se inicia cuando una entidad temporal está disponible para ser procesada y una entidad permanente (recursos) está libre.

### 4. Eventos

Las variables de estado, en un modelo de eventos discretos, cambian de valor en instantes de tiempo asociados a la aparición de un evento; así, un evento define una acción instantánea (que no consume tiempo) y cambia el valor de una variable de estado del sistema.

- Eventos condicionados, para que se activen es necesario que se cumplan una o más condiciones. Son los ligados a transiciones con más de un arco de entrada.
- Eventos no condicionados, son los que están programados para su ejecución y que no dependen de condiciones.

Los eventos también se clasifican en endógenos y exógenos. Los primeros son causados por condiciones en el modelo, por ejemplo el término de una tarea. Los exógenos son eventos externos al modelo, por ejemplo la llegada al sistema de una pieza.

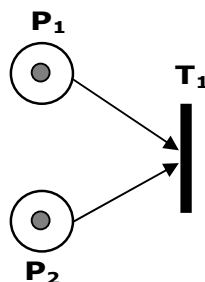
El estado del sistema, así como el estado de cada una de las entidades (atributos) cambian sus valores con la presencia de los eventos. Esta característica es la que permite a los simuladores avanzar el tiempo de simulación y gestionar los eventos de tal modo que la evolución de los valores de las variables de estado describan el comportamiento del sistema en estudio.

### 5. Colas

Son las estructuras que están conformadas por entidades temporales, ordenadas en forma lógica. Ejemplo clientes en espera por un servicio de atención, ubicados de acuerdo al orden de llegada. Las entidades en cola sufren un retardo de duración indeterminada. En las Redes de Petri no aparecen las colas de forma explícita, sin embargo aquellos lugares ( $P_i$ ) ocupados por entidades temporales podrían representar las colas de espera.

Transición sensibilizada:

Una transición está sensibilizada cuando sus lugares de origen están marcados; las transiciones disparan inmediatamente después de la sensibilización. Veamos la siguiente figura:



*Ejemplo:*

Considere la llegada de piezas a una planta para realizar un proceso simple mediante una operación de maquinado en una estación de trabajo compuesta por tres máquinas. En caso las máquinas estén ocupadas, las piezas esperarán su turno en una cola FIFO (First in First out). Una vez procesadas, las piezas son llevadas al almacén.

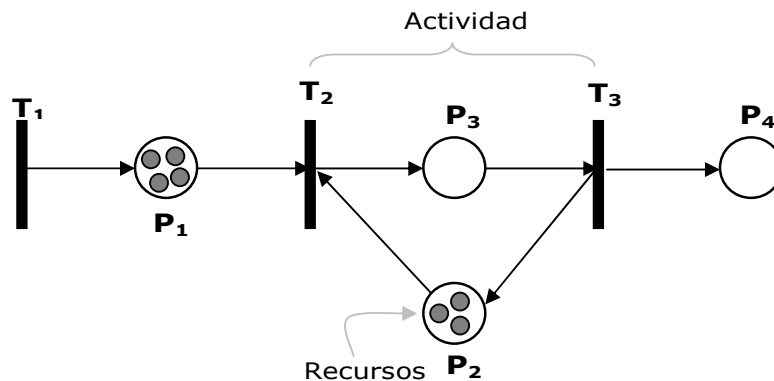
*Consideremos:*

**T<sub>i</sub>**: Conjunto de nodos tipo **Transición**

**P<sub>j</sub>**: Conjunto de nodos tipo lugar (**Place**)

**M<sub>k</sub>**: Conjunto de marcas en un instante dado (**Estado del sistema**). Las marcas que representan a las entidades temporales (piezas) fluyen a través de los recursos del sistema, y desaparecen cuando salen de este. En cambio, las marcas que representan las entidades permanentes (máquinas) siempre están en la red.

La red de Petri para nuestro ejemplo se muestra a continuación:



**T<sub>1</sub>**: Arribos de piezas (Evento no condicionado y externo)

El evento asociado a esta transición provoca la llegada de piezas al modelo.

**P<sub>1</sub>**: Piezas en cola (Entidades temporales)

**T<sub>2</sub>**: Inicio de la actividad maquinado (Evento condicionado e interno)

El evento asociado a esta transición provoca el inicio de la actividad. Este evento no está condicionado, ya que cuando se inicia la actividad se planifica el tiempo de finalización.

**P<sub>2</sub>**: Máquinas libres, son los recursos disponibles. Si hay una pieza lista para ser procesada y hay una máquina libre, entonces se inicia la actividad.

**P<sub>3</sub>**: Pieza(s) en proceso.

**T<sub>3</sub>**: Fin de la actividad maquinado (Evento no condicionado)

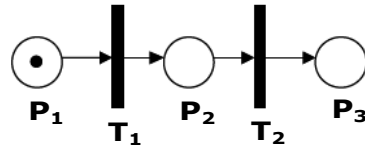
**P<sub>4</sub>**: piezas procesadas

En la red anterior, después de la transición T<sub>1</sub> o después de la transición T<sub>3</sub>, se evaluará si se puede ejecutar el evento condicionado T<sub>2</sub>

Las variables de estado permanecen constantes entre eventos (el estado del sistema permanece constante entre los instantes), y su valor tan solo puede cambiarse como efecto de la aparición de un evento.

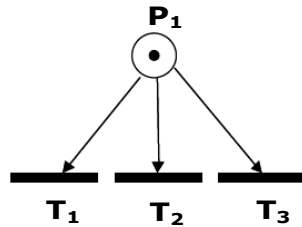
Principales estructuras de la RdP:

1. Secuencia:



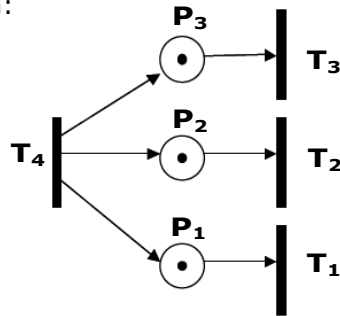
Refleja la dependencia causal entre los eventos. La transición  $T_2$  solo puede ser disparada después de activarse la transición  $T_1$ .

2. Decisión:



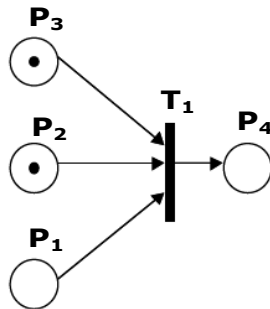
Las transiciones  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  están todas habilitadas para su disparo. No obstante, el disparo de una de ellas supone la deshabilitación del resto.

3. Concurrencia:



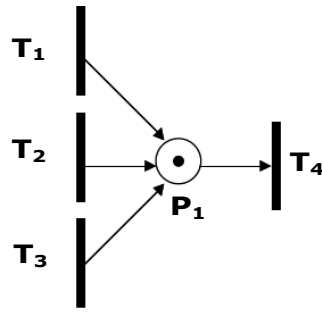
Las transiciones  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  son concurrentes. La concurrencia es uno de los conceptos más importantes que encontramos en los procesos dinámicos de interés.

4. Sincronización:



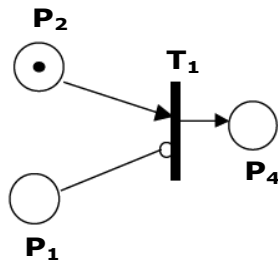
La transición  $T_1$  no se puede disparar hasta que no se tenga una marca en el lugar  $P_1$ . Ejemplo cuando se está a la espera de un recurso; también en procesos de ensamble en los que se requiere de todos los componentes para ejecutar la operación.

5. Agrupación:



Las marcas que llegan por diferentes caminos (transiciones  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ) se agrupan en el lugar  $P_1$ . Por ejemplo cuando productos procedentes de diferentes líneas, son inspeccionados por el mismo ingeniero.

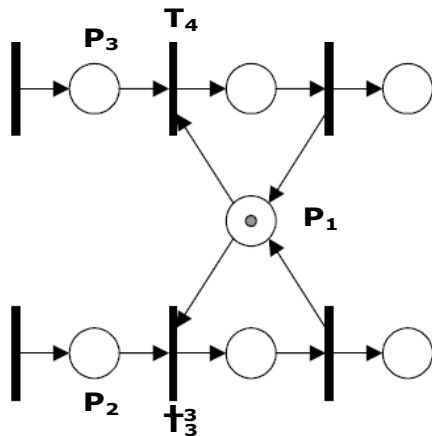
6. Inhibición



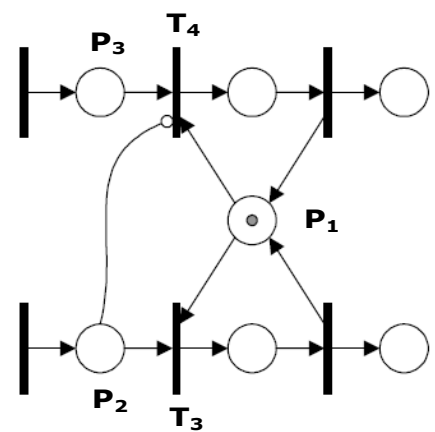
Se observa un caso especial de arco, con un circuitito como terminal, denominado de inhibición. Este no permite la transición de  $T_1$  cuando  $P_1$  tiene una o más marcas (en función del peso del arco). Así, su efecto es el contrario al de los arcos anteriores. Por ejemplo, se utiliza para priorizar unas transiciones frente a otras.

Ejemplo:

Observe el modelo siguiente de recursos compartidos:



En la figura se observa que si  $P_2$  y  $P_3$  tienen más de una entidad (marca), entonces ambas compiten para capturar el recurso  $P_1$  cuando esté libre. En este caso no hay prioridades.

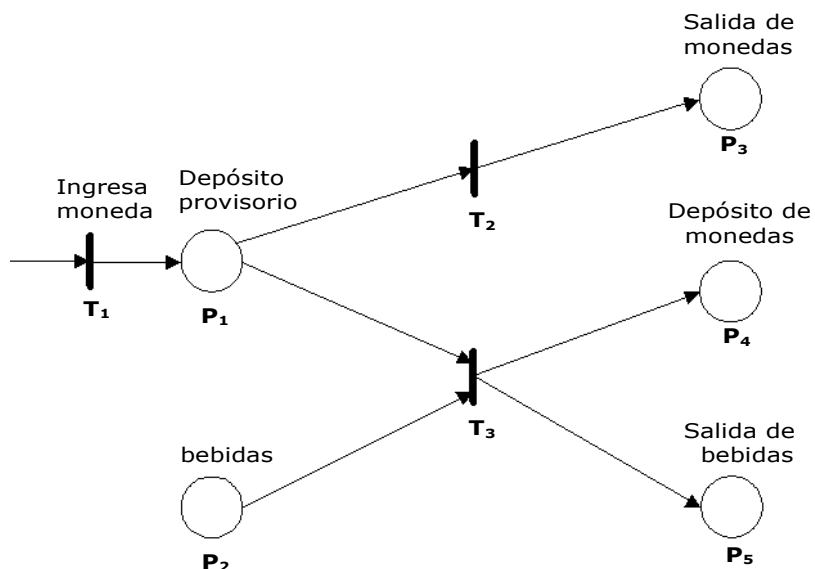


En la figura se observa cómo se resuelve el conflicto anterior incluyendo el arco inhibidor ( $P_2$ ,  $T_4$ ) que indica que la transición  $T_4$  está inhibida siempre que se tengan marcas en  $P_2$ .

## Ilustraciones\*

**1.** Construya una red de Petri para especificar el funcionamiento de una máquina expendedora de bebidas. La misma tiene un depósito de bebidas con una cierta carga inicial, y un depósito de monedas el cual inicialmente se encuentra vacío. Cuando se le ingresa una moneda y hay bebidas, la máquina entrega una bebida y almacena la moneda en el depósito correspondiente. ¿Cómo modelaría la situación de que cuando no hay más bebidas la máquina retorne la moneda?

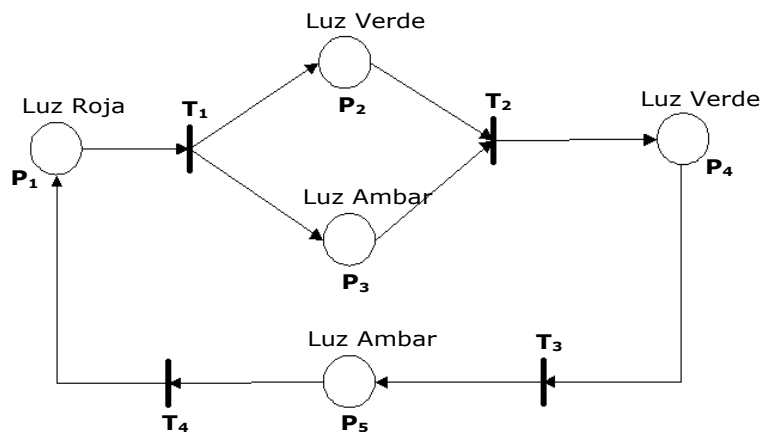
*Solución:*



**2.** Existen pequeñas diferencias entre los sistemas de luces de tránsito en diferentes países. Por ejemplo, el sistema de luces alemán tiene una fase extra en su ciclo. Las luces no cambian repentinamente de rojo a verde sino que antes de pasar al verde enciende la luz verde junto con la luz ambar.

Construya una red de Petri que se comporte como el sistema de luces de tránsito alemán. Asegúrese que la red no permita transiciones que no son posibles.

*Solución:*

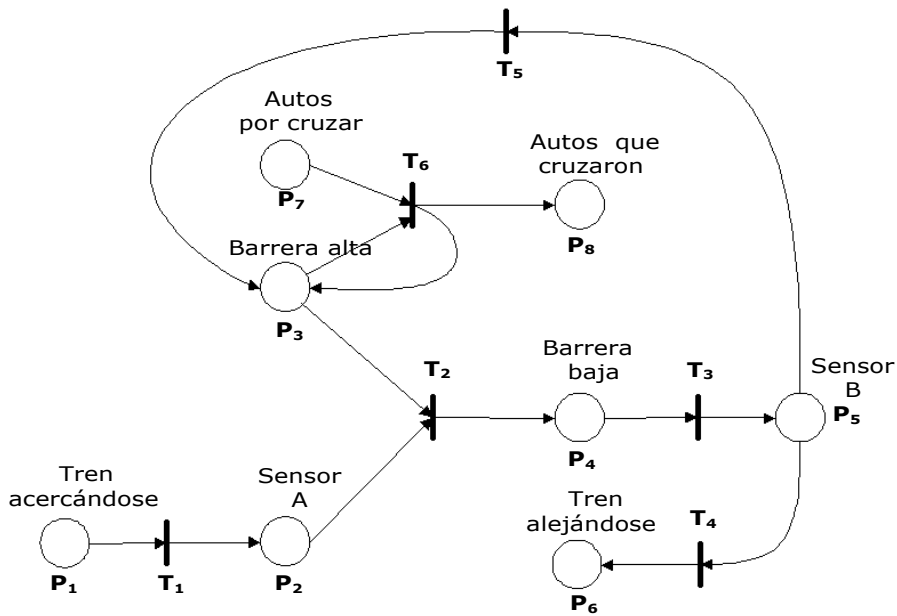


\* Ilustraciones tomadas de Salvati C., Cofre L. y Suárez F. *Teoría de Redes de Petri*, 2006

**3.** Construya una red de Petri para especificar el funcionamiento de un sistema de control de barreras de un paso a nivel. Cuando un tren se acerca, éste es detectado por un sensor que ocasiona que se baje la barrera del paso a nivel. Cuando se aleja el tren, es detectado por otro sensor que ocasiona que se eleve la barrera. Si la barrera está elevada, los vehículos que lleguen al paso a nivel pueden pasar a través de él, en caso contrario deben esperar hasta que la barrera sea levantada.

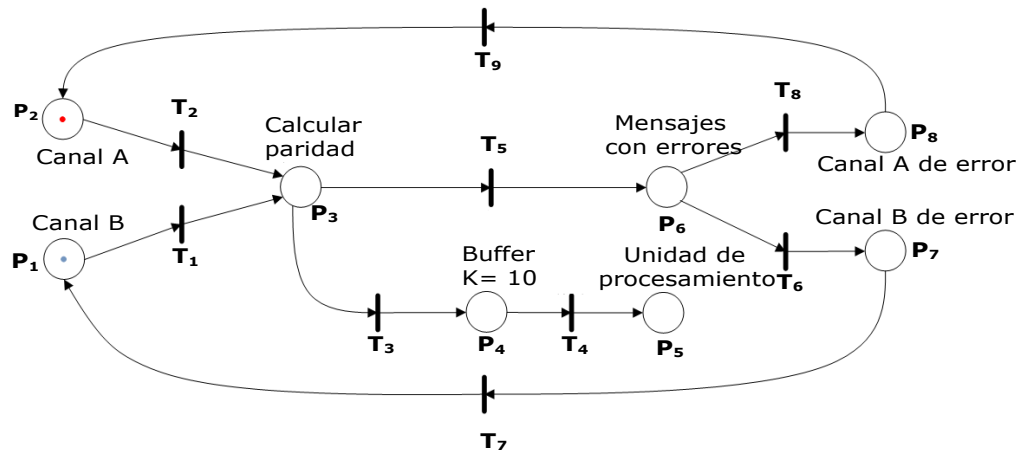
Verifique que el modelo construido no permita la situación en la que la barrera se encuentre alta, arribe un tren y un vehículo, y se le dé el paso al vehículo antes de bajar la barrera. Construya una red de Petri para especificar el funcionamiento de un sistema de control de barreras de un paso a nivel.

*Solución:*



**4.** Un proceso despachador de mensajes recibe mensajes provenientes de dos canales diferentes. Verifica la paridad de cada mensaje. Si la paridad es incorrecta, envía un aviso de no-reconocimiento del mensaje a través de un canal de respuesta (existe un canal de respuesta por cada canal de entrada); si la paridad es correcta, coloca el mensaje recibido en un buffer. El buffer puede contener hasta diez mensajes. Cuando el buffer está lleno, el despachador envía todo el contenido del buffer a una unidad de procesamiento a través de otro canal. No se pueden colocar mensajes en un buffer lleno.

Solución:



Nota: observe las marcas en colores para representa atributos, en los canales A y B.



# Simulación de sistemas

## *con el software Arena*

Las técnicas de simulación son utilizadas cada vez más como soporte en el proceso de toma de decisiones, para predecir el comportamiento de sistemas complejos, variables e inciertos, que no podrían ser estudiados y evaluados mediante técnicas analíticas convencionales.

En esta segunda edición se incluyen algunos temas y se profundizan otros, procurando enriquecer el contenido del libro. El autor presenta —de manera didáctica— los fundamentos de las técnicas de simulación y su aplicación en múltiples casos de estudio, que se aproximan a situaciones reales en la producción de bienes, en la logística y en los servicios; identificando y analizando las variables de interés que se manejan en cada situación particular.

Este texto está dirigido a los estudiantes de ingeniería industrial, ingeniería de sistemas y administración de negocios; también constituye un material de consulta para profesionales de carreras afines interesados en proyectos de mejora continua, innovación y optimización de procesos.

### **Pedro J. Torres Vega**

Ingeniero industrial por la Universidad de Lima. Egresado de la Maestría en Administración de Negocios de la Universidad del Pacífico. Se especializó en ingeniería de sistemas en el OIC (JICA), Okinawa, Japón; en control estadístico y mejora continua de la calidad en la Universidad Veracruzana de México (OEA); y en administración de la calidad en el KKC (AOTS), Osaka, Japón. Es profesor asociado de la Universidad de Lima en la Facultad de Ingeniería Industrial.