

Evaluación del desempeño de sistemas
con líneas de espera mediante su
modelación y simulación dinámica.

2013

Paulín



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática

Evaluación del desempeño de sistemas con líneas de
espera mediante su modelación y simulación dinámica.

Tesis
Que para obtener el grado de
Maestro en Sistemas de Información: Gestión y
Tecnología.

Presenta:

L.I. Francisco Javier Paulín Martínez
Exp. 114090

Director de Tesis:
Dr. Ubaldo Chávez Morales
Santiago de Querétaro, Qro., Mayo de 2013



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Informática
 Maestría en Sistemas de Información: Gestión y Tecnología.

Evaluación del desempeño de sistemas con líneas de espera mediante su modelación y simulación dinámica.

TESIS

Que para obtener el grado de
 Maestro en Sistemas de Información: Gestión y Tecnología.

Presenta:

L.I. Francisco Javier Paulín Martínez

Dirigido por:
 Dr. Ubaldo Chávez Morales

SINODALES

Dr. Ubaldo Chávez Morales
 Presidente

Dra. Rosa María Romero González
 Secretario

M.S.I. Elisa Morales Portillo
 Vocal

M.S.I. Ernesto Rubalcava Duran
 Suplente

M.I.S.D. Jesús Armando Rincones
 Suplente

M.C. Ruth Angélica Rico Hernández
 Directora de la Facultad de Informática

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

DR. IRINEO TORRES PACHECO
 Director de Investigación y
 Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 Mayo 2013
 México

RESUMEN

Este proyecto de investigación, está orientado hacia la construcción de un modelo dinámico, en un sistema de colas de una fila con uno o más servidores y un solo canal de comunicación, utilizando una disciplina de cola FIFO (First In First Out).

Este proyecto no pretende simular el comportamiento dinámico de un modelo en específico, sino modelar el comportamiento de sistemas con líneas de espera estándar.

La construcción de dicho modelo dinámico, se realizó utilizando herramientas de la dinámica de sistemas como son los diagramas de flujo, diagramas de influencias y diagramas de Forrester, enfocados al desarrollo de un Sistema de Soporte a la Decisión.

El tipo de análisis empleado, es un análisis dinámico que permite identificar tendencias, pautas y patrones de comportamiento, a través del tiempo. Realizando simulaciones del desempeño y comparando su impacto con los KPI's.

(Palabras clave: Líneas de espera, modelación dinámica, simulación, teoría de colas)

SUMMARY

This research project is geared towards building a dynamic model in a queue of a row with one or more servers and a single communication channel, using a queue discipline FIFO (First In First Out).

This project is not intended to simulate the dynamic behavior of a specific model, but to model the behavior of systems with standard queues.

The construction of the dynamic model was made using tools of dynamic systems such as flow charts, influences diagrams and Forrester diagrams, focused on the development of a Decision Support System.

The type of analysis used, is a dynamic analysis for identifying trends, patterns and behavior over time. Performing simulations and comparing its performance with KPI's impact.

(Keywords: waiting lines, dynamic modeling, simulation, queuing theory)

DEDICATORIAS

A Dios.

Por haberme permitido cumplir con mis objetivos y concluir exitosamente la maestría. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien. Gracias por sus consejos, por el amor que siempre me han brindado y por cultivar e inculcar el valor de la responsabilidad.

A mis hermanos

Por qué siempre he contado con ellos para todo, gracias a la confianza que siempre me han tenido, por su apoyo y amistad.

A mis amigos.

Especialmente a la Lic. Laura Chavero Basaldúa, por su apoyo y consejos, durante la elaboración de la tesis y en el transcurso de la maestría.

A la Universidad Autónoma de Querétaro

En especial a la Facultad de Informática por darme la oportunidad de formar parte de ellas.

AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis es el resultado de un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo la misma.

Agradezco especialmente al Dr. Ubaldo Chávez Morales por haber confiado en mi persona, por la paciencia y dirección de este trabajo de investigación. A la Dra. Sandra Luz Canchola Magdaleno y la MC Ruth Angélica Rico Hernández, directora de la Facultad de Informática, por su orientación y por sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y sus atinadas correcciones.

Agradezco a los Docentes de la Facultad de Informática ya que directa o indirectamente contribuyeron para finalizar exitosamente la tesis, especialmente al MSI Ernesto Rubalcava Duran y a la MSI Elisa Morales Portillo por su apoyo incondicional.

INDICE

	Página
<i>Resumen</i> _____	3
<i>Summary</i> _____	4
<i>Dedicatorias</i> _____	5
<i>Agradecimientos</i> _____	6
<i>Indice</i> _____	7
<i>Indice de tablas</i> _____	10
<i>Indice de figuras</i> _____	11
<i>Indice de ecuaciones</i> _____	12
<i>Indice de gráficos</i> _____	13
<i>I. Introduccion</i> _____	14
<i>II. Marco teórico</i> _____	16
2.1. Líneas de espera. _____	16
2.1.1. Teoría de colas. _____	16
2.1.2. Estructura básica de un modelo de colas. _____	17
2.1.2.1. Fuente de insumos o de entradas. _____	17
2.1.2.3. Disciplina de cola o regla de prioridad. _____	17
2.1.2.4. Mecanismo de servicio. _____	18
2.1.2.5. Las instalaciones de servicio _____	18
2.1.3. Variables de desempeño en un sistema de colas. _____	18
2.1.3.1. Longitud de la fila. _____	18
2.1.3.2. Número de clientes en el sistema. _____	18
2.1.3.4. Tiempo total en el sistema. _____	19
2.1.3.5. Factor de utilización de las instalaciones de servicio. _____	19
2.1.4. Terminología y notación. _____	19
2.2. Simulación de sistemas complejos. _____	20
2.2.1. Factores a considerar en el desarrollo de modelo de simulación _____	21
2.2.1.1. Generación de variables aleatorias no uniformes _____	21
2.2.1.2. Lenguaje de programación. _____	21
2.2.1.3. Condiciones iniciales. _____	21
2.2.1.4. Tamaño de la muestra. _____	22
2.2.1.5. Diseño de experimentos. _____	22
2.2.2. Ventajas y desventajas en el uso de la simulación. _____	23
2.3. Dinámica de sistemas _____	24
2.3.1. Sistema. _____	24
2.3.2. Elementos de un sistema _____	25
2.1.1.1. Límites o fronteras de un sistema _____	25
2.1.1.2. Entradas y salidas. _____	25

2.3.3.	Sistema abierto.	26
2.3.4.	Sistema cerrado.	26
2.3.5.	Componentes del sistema	27
2.3.5.1.	Control de los sistemas	27
2.3.5.2.	Elementos de control esenciales	27
2.3.5.3.	Meta (propósito, objetivo o norma) predeterminada.	28
2.3.5.4.	Medio para efectuar la medición del funcionamiento o rendimiento.	28
2.3.5.5.	Medio para efectuar la comparación, a fin de detectar divergencias respecto del punto 1.	28
2.3.5.6.	Medio para llevar a cabo la corrección y el ajuste.	28
2.3.6.	Dinámica y comportamiento de los sistemas	28
2.3.6.1.	El concepto de modelo.	29
2.3.6.2.	Construcción de modelos de simulación dinámicos.	30
2.3.6.3.	Diagramas causales.	30
2.3.6.4.	Proceso de modelado.	30
2.3.6.4.1.	Definición del problema.	31
2.3.6.4.2.	Conceptualización del sistema.	31
2.3.6.4.3.	Formalización.	31
2.3.6.4.4.	Comportamiento del modelo.	31
2.3.6.4.5.	Evaluación del modelo.	31
2.3.6.4.6.	Explotación del modelo.	32
2.4.	Modelado mediante dinámica de sistemas	32
2.4.1.	Diagramas de forrester.	34
2.4.1.1.	Variables de estado.	34
2.4.1.2.	Variables de flujo.	35
2.4.1.3.	Variables auxiliares.	36
2.4.1.4.	Programación del modelo.	36
2.5.	Metodología sistémica	36
2.5.1.	Lenguaje elemental para la descripción de sistemas.	37
2.5.2.	Retroalimentación negativa	38
2.5.3.	Retroalimentación positiva.	38
2.5.4.	Modelación de sistemas con líneas de espera.	38
2.5.5.	Herramientas software para construir modelos dinámicos.	39
2.5.6.	Comparativo de herramientas de software para construcciones modelos dinámicos.	39
2.5.7.	Vensim.	44
III. METODOLOGIA		46
3.1.	Definición del problema.	46
3.2.	Conceptualización.	47
3.3.	Formalización.	49
3.3.1.	Nomenclatura de los identificadores:	50
3.4.	Comportamiento.	52
3.4.1.	Análisis de bucles de realimentación positiva y negativa.	52
3.4.2.	Diagrama de forrester	57
IV. RESULTADOS Y DISCUSION		68
V. CONCLUSIONES, IMPLICACIONES Y TRABAJO A FUTURO		76
VI. BIBLIOGRAFÍA		78
VII. ANEXOS		79

Anexo 1 Generación de números pseudoaleatorios.	80
Anexo 2 Código del modelo	85
Anexo 3 Tabla de tiempos simulación 1, 2 y 3	88
Anexo 3 Gráficos resultantes las simulaciones realizadas	93

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE- DE MODELACIÓN SIMULACIÓN ANYLOGIC.	40
2.2	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE- DE MODELACIÓN SIMULACIÓN EVOLUCION.....	41
2.3	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE- DE MODELACIÓN SIMULACIÓN POWERSIM.....	41
2.4	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE- DE MODELACIÓN SIMULACIÓN SMILE.	42
2.5	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE- DE MODELACIÓN SIMULACIÓN VENSIM.	43
3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DE DECISIÓN EN UN SISTEMA DE LÍNEAS DE ESPERA.	49
3.2	CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA.....	50
3.3	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIABLES	51

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA DE COLAS.....	17
2.2 GRAFO QUE REPRESENTA UN SISTEMA.	24
2.3 FACES EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO	32
2.4 SIMBOLOGÍA ESTÁNDAR UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS DE FORRESTER.....	34
2.5 METODOLOGÍA UTILIZADA QUE DESCRIBE LAS FACES EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DINÁMICO.	46
3.1 MAPA MENTAL DE LAS VARIABLES QUE FORMAN EL SISTEMA DE LÍNEAS DE ESPERA	47
3.2 BUCLES DE REALIMENTACIÓN SALIDAS.	52
3.3 COMPORTAMIENTO DEL NÚMERO DE CLIENTES EN EL SISTEMA.	53
3.4 COMPORTAMIENTO DEL TIEMPO PROMEDIO EN EL SISTEMA.	54
3.5 COMPORTAMIENTO DE LAS LLEGADAS	54
3.6 COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL SISTEMA.....	55
3.7 DIAGRAMA CAUSAL SISTEMA DE LÍNEAS DE ESPERA.....	56
3.8 MODELO DE FORRESTER SISTEMA DE LÍNEAS DE ESPERA.....	57
3.9 CON DICIÓN INICIAL DEL MODELO.	58
3.10 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: WS.....	59
3.11 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: WQ.	59
3.12 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: WQ.	60
3.13 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: LS.	60
3.14 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: P.	61
3.15 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: LLEGADAS.....	61
3.16 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: SALIDAS.....	62
3.17 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: PERSONAS ATENDIDAS.	62
3.18 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: N.	63
3.19 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: SALIDAS.....	63
3.20 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: TIEMPO ENTRE LLEGADAS.	64
3.21 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: TIEMPO ENTRE SALIDAS.....	64
3.22 DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y UNIDADES VARIABLE: WSS.....	65
3.23 VERIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DEL SISTEMA.	65
3.24 VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	65
3.25 RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DE NÚMEROS PSEUDOALEATORIOS.....	66
5.1 MODELO DE TRABAJOS FUTUROS.....	80

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Página
2.1 CALCULO DEL NÚMERO DE ELEMENTOS EN EL SISTEMA.....	19
2.2 CALCULO DEL NÚMERO DE ELEMENTOS EN LA COLA.....	19
2.3 FÓRMULA PARA CALCULAR EL TIEMPO DE ESPERA EN EL SISTEMA.....	20
2.4 FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL SISTEMA.....	20
2.5 ANÁLISIS DE VARIABLES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	29
2.6 COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DINÁMICAS.....	33
2.7 ESTADO DE UNA VARIABLE.....	35
2.8 ASOCIACIÓN DE ESTADOS DE UNA VARIABLE DE FLUJO.....	35
2.9 ESTADO ESTABLE DE UNA VARIABLE DE FLUJO.....	35
2.10 DESCOMPOSICIÓN MULTIPLICATIVA	35
3.1 ECUACIÓN DEL MODELO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE ELEMENTOS EN EL SISTEMA.	58
3.2 ECUACIÓN DEL MODELO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE ELEMENTOS EN LA COLA.	58
3.3 ECUACIÓN DEL MODELO PARA DETERMINAR TIEMPO DE ESPERA EN EL SISTEMA.....	58
3.4 ECUACIÓN DEL MODELO PARA DETERMINAR EL FACTOR DE UTILIZACIÓN EL SISTEMA.	59

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA.....	51
3.2 PROBABILIDAD DE LLEGADAS NÚMEROS PSEUDOALEATORIOS.	66
3.3 PROBABILIDAD DE LLEGADAS NÚMEROS PSEUDOALEATORIOS.	67
4.1 SIMULACION 1 VARIABLE:LS.....	68
4.2 SIMULACION 1 VARIABLE:LS.....	69
4.3 SIMULACION 1 VARIABLE:P.....	69
4.4 SIMULACION 2 VARIABLE:LS.....	70
4.5 SIMULACION 2 VARIABLE:WS.....	71
4.6 SIMULACION 2 VARIABLE:P.....	71
4.7 SIMULACION 3 VARIABLE:LS.....	72
4.8 SIMULACION 3 VARIABLE:WS.....	73
4.9 SIMULACION 3 VARIABLE:P.....	73
4.10 ANÁLISIS SIMULACIÓN 1,2 Y 3 VARIBALE LS.....	74
4.11 ANÁLISIS SIMULACIÓN 1,2 Y 3 VARIBALE WS.....	75
4.12 ANÁLISIS SIMULACIÓN 1,2 Y 3 VARIBALE LS.....	75

I. INTRODUCCIÓN

El entorno empresarial actual se encuentra sometido a rápidos cambios, los cuales son originados por diversos factores, entre ellos se encuentra: la globalización, innovaciones tecnológicas, cambios políticos y sociales, y una mayor conciencia y demanda de parte de los clientes.

El cambio produce un ambiente competitivo entre las organizaciones, lo que las obliga a tomar decisiones que les ayuden a incrementar su productividad y su capacidad competitiva. Estas decisiones deben ser tomadas en el momento oportuno, de tal forma que permita obtener una ventaja competitiva y anticiparse a situaciones futuras. Las continuas evoluciones tecnológicas permiten a las organizaciones transformar sus modelos negocios y desarrollar nuevas estrategias para poder sobrevivir.

Para las empresas es de suma importancia que las personas involucradas en el proceso de toma de decisiones cuenten con información relevante, que les permita tomar decisiones oportunas y acertadas. Los sistemas de información juegan un papel clave en este aspecto, ya que dentro de ellos se encuentra la información, que en la mayoría de las ocasiones no se encuentra estructurada para servir como base en el proceso de toma de decisiones, como es el caso de los sistemas transaccionales. Generalmente los sistemas de información son diseñados con finalidad de servir de base al proceso de toma de decisiones. Los sistemas de información contribuyen a la reducción de costos y a la optimización de tareas, incrementando de esta manera la ventaja competitiva de las empresas.

Las líneas de espera las podemos encontrar en muchos lugares, desde la fila que se forma en un establecimiento para recibir un servicio, hasta los procesos que forman un cola para poder ser ejecutados por un procesador.

En general a nadie le gusta esperar mucho tiempo formado para recibir un servicio y las empresas no están dispuestas incrementar los gastos derivados del tiempo de inactividad de un servidor (maquinas, personas, equipos, etc.). El estudio de las líneas de espera, nos permitirá encontrar un balance entre el tiempo de espera y la tasa de servicio, de tal manera que se encuentre un equilibrio entre el costo del servicio y el costo de espera.

Las variables de decisión de la teoría de colas, se encuentran en constante movimiento, es decir la tasa de llegadas de clientes puede ser muy baja en un día y al día siguiente sobrepasar la capacidad del servicio. Por esta razón no podemos ver este tipo de sistemas como sistemas estáticos, principalmente porque cada una de estas variables se comporta diferente en función del tiempo.

Al crear un modelo dinámico, podremos simular el comportamiento del sistema un momento dado, pero también nos permitirá predecir el comportamiento futuro y determinar pautas de comportamiento de cada una de

las variables del sistema. De esta manera podremos tomar decisiones en cuanto a la capacidad del servicio en base a información objetiva, teniendo mayor grado de certeza sobre el impacto de dichas decisiones.

Se requiere de un análisis de información continuo en el tiempo y no sólo en un momento puntual. Aunque el análisis estático, puede aportar valor, es incomparable con lo que nos puede aportar en un proceso continuo, en el que podemos observar tendencias, cambios y variabilidades que incluye la comunicación de los descubrimientos y efectuar los cambios necesarios.

La dinámica de sistemas permite descubrir tendencias, patrones y comportamiento de los sistemas al evaluar las variables a través del tiempo y encontrar posibles relaciones que regularmente no se pueden encontrar a través del análisis estático.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Líneas de espera.

Se le denomina línea de espera a la hilera formada por uno o varios “clientes” que aguardan para recibir un servicio. Al referirnos a clientes estamos considerando no solo personas sino también a objetos inanimados como podrían ser: maquinas que requieren mantenimiento, pedidos de mercancía en espera de ser embarcados, o elementos de inventario antes de ser utilizados, etc.[Krajewski, Ritzman 2000].

Estas filas de espera se forman a causa de un desequilibrio temporal entre la demanda de un servicio y la capacidad del sistema para suministrarlo. En la mayoría de los casos, la tasa de demanda varía; ya que los clientes llegan en intervalos impredecibles.

Lo más usual es que también haya variaciones en el ritmo de producción del servicio, ya que este depende de las necesidades de cada cliente.

Las filas de espera pueden formarse a pesar de que el tiempo necesario para atender al cliente sea constante. Se podría decir que si no hay variabilidad en las tasas de demanda y servicio y se cuenta con la capacidad suficiente, no se forman las líneas de espera. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.1. Teoría de colas.

La teoría de colas proporciona un conjunto de modelos matemáticos que describe el comportamiento de una línea de espera en un momento dado. [S. Hillier, Liebernam 2006].

El estudio de las líneas de espera trata de medir cuantitativamente el fenómeno de esperar formando filas, mediante medidas representativas de eficiencia. Entre estas medidas se encuentran la magnitud promedio de la cola, el tiempo promedio de espera y la utilización promedio de las instalaciones. [Taha 2004].

Los resultados del análisis de colas en el contexto de optimización de costos, es reducir al mínimo la suma de los costos de ofrecer el servicio y los costos de esperar. Donde el costo de servicio aumenta al incrementar el nivel de servicio. Al mismo tiempo que el costo de esperar disminuye al incrementar el nivel de servicio. [Taha 2004].

2.1.2. Estructura básica de un modelo de colas.

La estructura básica de un sistema de colas está formado por los siguientes elementos: fuente de entrada, cola, mecanismo de selección (disciplina de cola) y el mecanismo de servicio, en la figura 2.1 se muestra gráficamente cada uno de estos elementos:

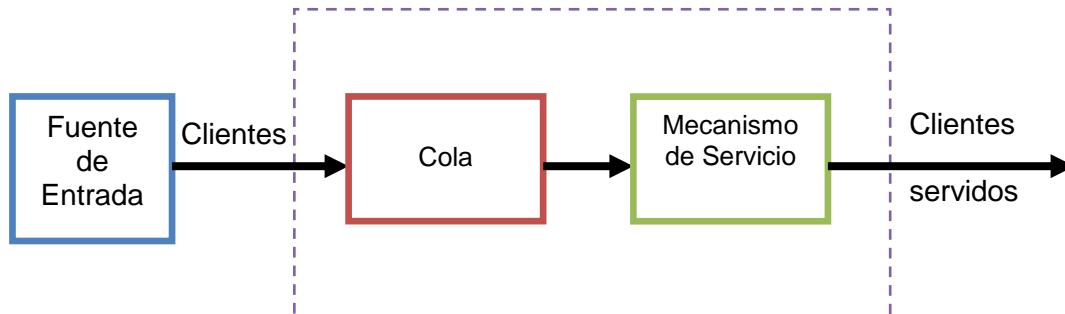


Figura 2.1 Estructura Básica de un sistema de colas.

2.1.2.1. Fuente de insumos o de entradas.

Representa la población de clientes y esta puede ser finita o infinita.

- a. Una población de clientes es finita cuando el número potencial de nuevos clientes para el sistema de servicio resulta afectado notablemente por el número de clientes que ya se encuentran en el sistema. [Krajewski, Ritzman 2000].
- b. Una población de clientes es infinita cuando el número de clientes que entran al sistema no afecta la tasa a la cual dicha población genera nuevos clientes. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.2.2. Cola.

Se caracteriza por el número máximo permisible de clientes que pueden admitir, estas pueden ser finitas o infinitas. [S. Hillier, Liebernam 2006].

2.1.2.3. Disciplina de cola o Regla de prioridad:

Se refiere al orden en que se seleccionan los miembros de una línea de espera para recibir el servicio. [S. Hillier, Liebernam 2006]. En la mayoría de los sistemas de servicio se aplica la regla de “a quien llega primero, se atiende primero” (FCFS), Existen otras disciplinas de colas como son: EDD (earliest due date) o al que corresponda al tiempo más corto (STP). Una disciplina

prioritaria consiste en una regla que permite a un cliente de más alta prioridad interrumpir el servicio de otro cliente. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.2.4. Mecanismo de servicio.

Consiste en una o más instalaciones de servicio, cada una de ellas con uno o más canales paralelos de servicio, llamados servidores. [S. Hillier, Liebernam 2006].

2.1.2.5. Las instalaciones de servicio

Están conformadas por el personal o equipo necesario para poder brindar este servicio al cliente. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.3. Variables de desempeño en un sistema de colas.

Los resultados de la teoría de colas, tratan de obtener expresiones explícitas de métricas de rendimiento de interés (por ejemplo, el tiempo medio de respuesta), en función de la distribución de algunos parámetros del sistema, con un conjunto de criterios adecuados para realizar el análisis. [Gupta, 2011]

Entre estos parámetros o variables se encuentran:

2.1.3.1. Longitud de la fila.

Es el número de clientes que se encuentran actualmente en la fila y su longitud refleja las siguientes condiciones:

- Las hileras cortas significan que el servicio al cliente es bueno o que la capacidad es excesiva.
- Las hileras largas. Indican una baja eficiencia del servidor o la necesidad de aumentar la capacidad.

2.1.3.2. Número de clientes en el sistema.

Está conformado por la cantidad de clientes que forman la cola más los que se encuentran recibiendo el servicio. Un gran número de clientes en el sistema provoca congestionamientos y puede dar lugar a la insatisfacción del cliente, a menos que el servicio aumente su capacidad. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.3.3. Tiempo de espera en la fila.

Si la tasa de servicio es rápida, una fila larga puede ser atendida eficientemente, cuando el tiempo de espera es largo el cliente tiene la impresión de que la calidad del servicio es deficiente. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.3.4. Tiempo total en el sistema.

Es el tiempo transcurrido desde la llegada hasta la salida del mismo, esta variable ofrece indicios sobre problemas con los clientes, eficiencia del servidor o capacidad. [Krajewski, Ritzman 2000].

2.1.3.5. Factor de utilización de las instalaciones de servicio.

Refleja el porcentaje de tiempo en que las instalaciones de servicio permanecen ocupadas. Es recomendable que el resultado de esta variable se mantenga menor al 100%. [S. Hillier, Liebernam 2006].

2.1.4. Terminología y Notación.

La terminología y notación, varían de acuerdo a los autores consultados, a continuación se describe la terminología descrita por [S. Hillier, Liebernam 2006].

$P(n)$ = Probabilidad de que n clientes se encuentren en el sistema.

L_s = Número esperado de clientes en el sistema.

L_q = Longitud esperada en la cola (excluye a los clientes que están en servicio).

W_s = Tiempo de espera en el sistema para cada cliente.

W_q = Tiempo de espera en la cola (excluye el tiempo de servicio).

S = Número de servidores.

λ = Tasa media de llegadas. (Número de llegadas por unidad de tiempo).

μ = Tasa media de servicio. (Número esperado de clientes atendidos por unidad de tiempo).

$n(t)$ = Número de clientes en el sistema de colas en el tiempo (t)
Ecuaciones del sistema.

Suponiendo que λn es una constante λ para toda n . Jonh D.C. Little en su publicación "A Proof for the Quequin Formula" demostró que en un proceso de colas estable:

$$L_s = \lambda W_s$$

Ecuación 2- 1 Calculo del número de elementos en el sistema.

Esta misma demostración prueba que:

$$L_q = \lambda W_q$$

Ecuación 2- 2 Calculo del número de elementos en la cola.

Si las λn no son iguales, entonces λ se puede sustituir en estas ecuaciones por λ promedio. Suponiendo que el tiempo medio de servicio es una constante $\frac{1}{\mu}$, para toda $n \geq 1$, se tiene que:

$$W_s = W_q + \frac{1}{\mu}$$

Ecuación 2.3 Fórmula para calcular el tiempo de espera en el sistema.

Estas relaciones son importantes, pues permiten determinar cuatro variables de decisión en el sistema de colas. El factor de utilización del sistema es denotado por la siguiente ecuación: [Krajewski, Ritzman 2000].

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$$

Ecuación 2.4 Factor de utilización del sistema

2.2. Simulación de sistemas complejos.

H. Masiel y G. Gnugnoli, definen simulación como: "Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, industriales, biológicos físicos y químicos a través de largos períodos de tiempo."

Robert E. Shannon (1988) presenta su definición de simulación: "Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema".

Se dice que "x" simula a "y" si y sólo si:

- x y y son sistemas formales;
- y se considera como el sistema real;
- x se toma como una aproximación del sistema real.
- las reglas de validez en x no están exentas de error.

2.2.1. Factores a considerar en el desarrollo de modelo de Simulación

Coss (2003) describe los siguientes factores a considerarse en el desarrollo de modelos de simulación de sistemas complejos:

2.2.1.1. Generación de variables aleatorias no uniformes

Si el modelo de simulación es estocástico, la simulación debe ser capaz de generar variables aleatorias no uniformes de distribuciones de probabilidad teóricas o empíricas. Lo anterior puede obtenerse si se cuenta con un generador de números uniformes y una función que transforme estos números en valores de la distribución de probabilidad deseada. A este respecto, se han desarrollado una gran cantidad de generadores para las distribuciones más comunes como; la distribución normal, exponencial, Poisson, Erlang, Binomial, Gamma, Beta, etc.[Coss 2003]

2.2.1.2. Lenguaje de programación.

Las primeras etapas de un estudio de simulación se refieren a la definición del sistema a ser modelado y a la descripción del sistema en términos de relaciones lógicas de sus variables y diagramas de flujo. Sin embargo, llega el momento de describir el modelo en un lenguaje que sea aceptado por la computadora que va utilizar (compatible).

En esta etapa se tienen dos cursos de acción a seguir si no se tiene nada de software de simulación, que son:

- Desarrollar el software requerido.
- Comprar software (lenguaje de programación de propósito especial). Para esta alternativa es necesario analizar y evaluar varios paquetes de simulación antes de tomar la decisión final.

2.2.1.3. Condiciones iniciales.

La mayoría de los modelos de simulación estocástica se corren con la idea de estudiar al sistema en una situación de estado estable. Sin embargo, la mayor parte de estos modelos presentan en su etapa inicial estados transientes los cuales no son típicos del estado estable. Por consiguiente es necesario establecer claramente las alternativas o cursos de acción que existen para resolver este problema. La forma de atacar este problema sería a través de:

Usar un tiempo de corrida suficientemente grande de modo que los períodos sean relativamente insignificantes con respecto a la condición de estado estable.

- Excluir una parte apropiada de la parte inicial de la corrida.
- Utilizar simulación regenerativa.

2.2.1.4. Tamaño de la muestra.

Uno de los factores principales a considerar en un estudio de simulación es el tamaño de la muestra (número de corridas en la computadora). La selección de un tamaño de muestra apropiado que asegure un nivel deseado de precisión y a la vez minimice el costo de operación del modelo, es un problema algo difícil pero muy importante. Puesto que la información proporcionada por el experimento de simulación sería la base para decidir con respecto a la operación del sistema real.

Esta información deberá ser tan exacta y precisa como sea posible o al menos el grado de imprecisión presente en la información proporcionada por el modelo debe ser conocida. Por consiguiente, es necesario que un análisis estadístico se haya realizado para determinar el tamaño de la muestra requerido.

El tamaño de la muestra puede obtenerse de dos maneras:

- Previa e independientemente de la operación del modelo, o
- Durante la operación del modelo basado en los resultados arrojados por el mismo. Para la última alternativa se utiliza la técnica estadística de intervalos de confianza.

2.2.1.5. Diseño de experimentos.

El diseño de experimentos es un tópico cuya relevancia en experimentos en estudios de simulación ha sido reconocida, pero raramente aplicada. El diseño de experimentos en estudios de simulación puede ser varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que se hayan planteado.

Existen diferentes formas de análisis que pueden ser utilizados. Entre los más comunes e importantes, se pueden mencionar los siguientes:

- Comparación de las medias y varianzas de las alternativas analizadas.
- Determinación de la importancia y el efecto de diferentes variables en los resultados de la simulación.
- Búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.

Para realizar el primer tipo de análisis, al cual se le denomina comúnmente diseño de experimentos de un factor simple, es necesario tomar muy en cuenta el tamaño de la muestra, las condiciones iniciales y la presencia o ausencia de auto correlación. Para el segundo tipo de análisis, existe una gran cantidad de literatura, puesto que la gran mayoría de los libros de texto de diseño de experimentos, explican o tratan el tema de análisis de varianza y técnicas de regresión como medios para evaluar la importancia y el efecto de varias variables en los resultados de operación de un sistema. Para el tercer tipo de análisis,

generalmente se requiere utilizar algoritmos heurísticos de búsqueda como por ejemplo el algoritmo de Hookes y Jeeves.

2.2.2. Ventajas y desventajas en el uso de la simulación.

Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientemente avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado, han hecho posible que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas. [Coss 2003]

Además de las razones antes mencionadas, Tomas H. Naylor (1977), ha sugerido que un estudio de simulación es muy recomendable porque presenta las siguientes ventajas:

- A través de la técnica de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de estas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La técnica de simulación puede ser utilizada como un instrumento pedagógico, para estudiantes al enseñarles los conocimientos básicos en el análisis teórico, el análisis estadístico, y en la toma de decisiones.
- La simulación de sistemas complejos puede producir un valioso y profundo conocimiento acerca de cuáles variables son más importantes que otras en el sistema y cómo ellas obran entre sí.
- La técnica de simulación puede utilizarse para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o nula información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a los posibles resultados no previstos.
- La técnica de la simulación de sistemas complejos puede producir un valioso y profundo conocimiento acerca de cuáles variables son más importantes que otras en el sistema y cómo ellas obran entre sí.
- Se puede utilizar también para entrenamiento de personal. En algunas ocasiones se puede tener una buena representación de un sistema (como por ejemplo los juegos de negocios), y entonces a través de él es posible entrenar y dar experiencia a cierto tipo de personal.
- La simulación de sistemas complejos puede producir un valioso y profundo conocimiento acerca de cuáles variables son más importantes que otras en el sistema y cómo ellas entre sí.
- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede utilizarse para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir en el comportamiento del sistema.

A diferencia de las ventajas mencionadas, la técnica de simulación presenta el problema de requerir equipo de cómputo y recursos humanos, en ocasiones costosas. Además, generalmente se requiere bastante tiempo para que un modelo de simulación sea desarrollado y perfeccionado. Finalmente, es posible que la alta administración de una organización no entienda esta técnica y esto crea dificultad en vender la idea.

2.3. Dinámica de sistemas

2.3.1. Sistema.

Un sistema es un objeto que está conformado por un conjunto de partes relacionadas y comunicadas entre sí. Un sistema manifiesta un aspecto de la realidad de cierta complejidad precisamente por estar formado por partes que se encuentran en iteración. Cada uno de los elementos que conforman el sistema así como su iteración con otros elementos son los elementos básicos en la concepción del sistema. [Aracil, Gordillo 2005]

Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan entre sí para un cierto objetivo. Es una colección de elementos o medios que están relacionados y que pueden ser descritos en términos de sus atributos o de sus partes (componentes). [García, 2003]

Un sistema es un aspecto de la realidad al que podemos adscribir una descripción en la que básicamente se enuncien una serie de partes componentes y una forma de iteración entre ellas que suministre un vínculo que las organice en la unidad que es el sistema.

Un Sistema es un objeto C de sus partes y la relación R entre los elementos de C . A esta relación podemos asociar una imagen gráfica de un grafo ver figura 2, cuyos nodos denotan esas partes y cuyas aristas representan las influencias que se producen entre ellas. Este grafo provee una descripción de la estructura de un sistema.

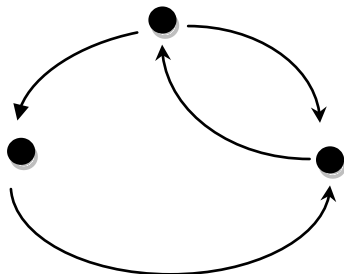


Figura 2.1 Grafo que representa un Sistema.

2.3.2. Elementos de un sistema

Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan entre sí para lograr un fin o propósito. Dentro de definición se pueden identificar los elementos necesarios para la existencia de cualquier sistema.

Todos los sistemas operan dentro de un entorno. Éste es el medio ambiente que rodea al sistema, afectándolo y siendo afectado por él. Lo que denominemos entorno depende de los objetivos del sistema, de sus necesidades y actividades. Seen (2004) identifica los siguientes elementos de un sistema:

2.1.1.1. Límites o fronteras de un Sistema

Los límites o fronteras de un sistema demarcan o separan el entorno respecto del sistema. El sistema existe dentro de sus límites y todo lo que este fuera de ellos constituye el ambiente. La línea que define los límites del sistema determina que está incluido dentro del sistema y que no lo está.

Las características particulares de una frontera varían en función de que un sistema sea físico o abstracto. En un sistema físico el límite es una demarcación natural determinada por la estructura básica del sistema y por los objetivos y fines del mismo. En los sistemas abstractos, los límites son definidos típicamente por un observador.

El límite de un sistema puede, variar de un observador a otro, a menos que todos esté de acuerdo con los criterios para la selección. En cualquier circunstancia los límites de un sistema abstracto son determinados por el nivel de percepción del observador, la intención y el objetivo al determinar la línea y las nociones del observador acerca del funcionamiento interno del sistema.

2.1.1.2. Entradas y salidas.

El sistema interactúa con su ambiente por medio de los elementos de entrada y de salida. Una entrada es cualquier cosa que ingresa al sistema proveniente del entorno; una salida es cualquier cosa que egresa del sistema, cruzando los límites hacia el medio circundante.

La información, la energía y los materiales pueden ser tanto entrada como salida en relación con el entorno.

Los límites controlan cuidadosamente la entrada y la salida, regulando el flujo desde y hacia el sistema, y protegiéndolo de agentes destructivos o

perjudiciales existentes en el ambiente. En esencia, los límites son filtros de las entradas y salidas.

Existen dos tipos de entradas: actuantes y de mantenimiento. Las entradas actuantes son los datos o la información sobre los que puede actuar el sistema para producir una salida. Las entradas de mantenimiento están integradas estrechamente al sistema de control.

La salida se produce a partir de una entrada sobre la que actúa el sistema y es devuelta al entorno. Aquella puede ser mercancía, información, energía o desechos. Así mismo, la salida de un sistema puede ser la entrada de otro.

Es necesario estudiar las entradas y las salidas de un sistema. Estudiando y comparando las entradas y salidas se puede obtener un buen conocimiento de los procesos del sistema. Examinar un sistema analizando únicamente sus entradas y salidas constituye un método de "caja negra". El concepto de caja negra permite al investigador desatender los procesos internos y los componentes de un sistema, colocándolos, en forma metafórica, dentro de una caja negra que los oculta totalmente. De acuerdo al comportamiento de las iteraciones entre el sistema y su medio ambiente se puede clasificar a los sistemas en: abiertos y cerrados.

2.3.3. Sistema abierto.

Un sistema abierto es un sistema que intercambia información, materiales y energía con su entorno. Una característica adicional de un sistema abierto es la capacidad de adaptación, esto es, de ajustarse a los cambios en el medio circundante con miras a preservar su existencia. Los ajustes se efectúan tomando como base las entradas y la retroalimentación a fin de que el sistema funcione en estado de equilibrio.

En esencia, se tiene un proceso de ajuste dinámico debido a que las modificaciones se efectúan continuamente para asegurar que el sistema se encuentre siempre aproximadamente en equilibrio. En caso de que cesara el proceso de ajuste, el sistema podría arruinarse o quedar completamente desorganizado.

2.3.4. Sistema Cerrado.

Un sistema cerrado es un sistema de auto contenido y que no interactúa con el medio circundante. La tendencia en un sistema cerrado es hacia la entropía, ya que no hay entradas desde el entorno para fomentar la adaptación. En otras palabras, sin entradas de mantenimiento no hay ajustes en un sistema cerrado y la tendencia del sistema es hacia la ruina o el deterioro.

2.3.5. Componentes del sistema

Dentro de los límites o fronteras se encuentra todo el sistema, que puede ser una sola entidad o estar constituido por muchos componentes. Cuando un componente de sistema es en sí mismo un sistema, se le llama SUBSISTEMA.

Un componente de sistema puede ser definido como una entidad que trabaja con otros componentes (subsistemas) para lograr un fin específico, normalmente producir una salida. Las operaciones de cada componente separan, combinan o modifican de algún modo las entradas para cambiar su identidad y originar una salida. En el sistema debe haber correlación entre los subsistemas o componentes.

Tiene que existir un medio de transferencia de información entre los componentes o subsistemas a través de interfaces, los elementos de interconexión en los límites de un sistema dan paso a información a través de ellos. Una interface codifica o descodifica información a una forma que el sistema pueda utilizar.

2.3.5.1. Control de los Sistemas

El control del sistema es un problema importante de la administración de las organizaciones. Si el sistema no está bajo control, no cumple de manera eficaz con sus funciones. El control es el proceso que mide el funcionamiento actual y lo guía hacia una meta predeterminada. Los sistemas pueden ser controlados según diferentes grados de complejidad. El control en los sistemas es esencial para tener una actividad y una existencia continuas.

2.3.5.2. Elementos de Control Esenciales

En cualquier sistema o proceso que está siendo controlado, hay diferentes elementos claves de control. La forma particular que estos elementos pueden tomar varía de sistema a sistema, pero siempre existen. Los elementos esenciales son:

- Una meta (propósito, objetivo o norma) predeterminada.
- Un medio para efectuar la medición del funcionamiento o rendimiento.
- Un medio para efectuar la comparación, a fin de detectar divergencias respecto del punto 1.
- Un medio para llevar a cabo la corrección y el ajuste.

2.3.5.3. Meta (propósito, objetivo o norma) predeterminada.

Dentro de cualquier sistema debe conocerse el rendimiento esperado; es decir, debe saberse cuales deben ser los resultados de un proceso. El resultado deseado -la meta, el propósito, norma u objetivo- puede ser un valor cuantitativo en particular, un intervalo o margen de valores o una determinada actividad.

2.3.5.4. Medio para efectuar la medición del funcionamiento o rendimiento.

Un sistema debe contar con el medio para medir su funcionamiento. Tal elemento con frecuencia es el más difícil de desarrollar en un sistema artificial, pues el instrumento de medición no debe afectar al sistema mientras es medido. La precisión de las medidas varían de sistema a sistema, pero en todos los casos tales valores deben estar en las unidades establecidas en los objetivos predeterminados.

2.3.5.5. Medio para efectuar la comparación, a fin de detectar divergencias respecto del punto 1.

La comparación del funcionamiento real con una meta predeterminada es el tercer paso en la operación de control. La discrepancia o variación con respecto al estándar indica que, hasta cierto punto, el sistema no está operando tan bien como debería, Sin embargo, como es de esperar que haya discrepancias en cualquier actividad, llega a ser importante determinar qué grado de variación es tolerable.

2.3.5.6. Medio para llevar a cabo la corrección y el ajuste.

El sistema debe ser capaz de efectuar una acción correctiva y hacer los ajustes necesarios al proceso cuando se detecta una variación significativa. La clase de cambio aceptable dependerá de las características del sistema.

2.3.6. Dinámica y comportamiento de los sistemas

El termino de dinámica es empleado en posición a la estática, y con el expresamos el carácter cambiante en la locomoción de un sistema. El Concepto de trayectoria se refiere al carácter cambiante de una magnitud atreves del tiempo. La representación gráfica de las trayectorias representa el comportamiento del sistema, al que se asocian esas magnitudes. Entendemos por comportamiento a la evolución a lo largo del tiempo de las magnitudes que se consideran relevantes para el logro de los objetivos. [Aracil, Gordillo 2005]

El objetivo básico de la dinámica de sistemas es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema. Esto

implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema, y ver como diferentes acciones, efectuándose sobre partes del sistema, acentúan las tendencias de comportamiento implícitas en el mismo. [García 2003].

Al estudiar el comportamiento de los sistemas, estamos asumiendo que los sistemas cambian con el tiempo, es decir que los atributos asociados a ellos sufren variaciones; por eso registramos sus trayectorias. Lo que nos interesa es dar una razón de esos cambios

Un sistema dinámico es el objeto matemático formado por un espacio de estados X y una regla que prescribe como varían estos estados a lo largo del tiempo Ecuación 1.5:

$$\frac{dx}{dy} = f(x)$$

Ecuación 2- 5 *Análisis de variables en función del tiempo*

2.3.6.1. El concepto de modelo.

El concepto de modelo se puede entender de dos maneras, una de ellas es el referente de lo representado (caso del que posa) o se puede referir al modelo como representación. En este sentido se dice que para un observador O un objeto M es un modelo de un objeto S (un sistema), si O se puede servir de M para responder a cuestiones que le importan con relación a S . En esta definición de modelo, la presencia del observador O es básica, ya que toda descripción lleva asociada un observador. El modelo lo es para él, y para aquellos con los que comparte un lenguaje con el que describir una determinada forma de ver un cierto aspecto de su entorno.

El proceso mediante el cual O construye M recibe la denominación de proceso de modelado. Con su concurso se procede a la construcción de un objeto artificial: el modelo M . En el proceso de modelado se pueden distinguir tres aspectos:

- Una problemática concreta con relación a S , es decir, decidir sobre las acciones a realizar con respecto a S para alcanzar ciertas metas concretas.
- La experiencia previa relativa a otros si análogos a S .
- Un medio de expresión que permita a O realizar M , lenguaje de modelado, que suministra los módulos básicos (conceptos y símbolos) a partir de los cuales se construye el modelo. Combinando estos módulos se tiene un repertorio de posibilidades de representación entre las que hay que buscar la que mejor se ajuste a S .

Un modelo matemático, se caracteriza por tener una estructura que es o representa una abstracción o formalización del sistema o proceso objeto de modelación. Su estructura está definida por las variables de entrada y salida así como los parámetros de las ecuaciones que relacionan las variables de entrada con las de salida. [Lahoz-Beltrá 2004]

2.3.6.2. Construcción de modelos de simulación dinámicos.

Para construir cualquier modelo de simulación dinámico, es necesario contar con un lenguaje que nos permita representar los elementos del sistema real que se pretende estudiar, las relaciones que existen entre los elementos del sistema y la forma en que su comportamiento varía a través del tiempo.

Los dos primeros aspectos del modelo constituyen el componente estructural y determinan qué y cómo se relacionan cada uno de los elementos del mismo. Para representar estos componentes, se utilizan dos tipos de notaciones gráficas o diagramas.

2.3.6.3. Diagramas causales.

Para representar los elementos de un modelo y sus relaciones se utilizan normalmente los diagramas causales. Un diagrama causal es un grafo orientado en el que los nodos representan los elementos del sistema y las aristas las relaciones entre dichos elementos.

Las relaciones existentes entre dos nodos de un grafo representan realmente una relación causa-efecto. El modelo estructural a través de diagramas causales permite representar y formalizar el conocimiento que se tiene sobre los factores que influyen en el desarrollo de los procesos y sobre las relaciones causales que se dan entre dichos factores. Sin embargo, un diagrama causal no deja de ser un diagrama que permite modelar el sistema a un nivel conceptual.

Para obtener un modelo de simulación, es necesario modelar el comportamiento o evolución que cada una de las variables tendrá en el sistema a lo largo del tiempo. Cada una de las relaciones causa-efecto de los diagramas causales representa realmente que una variable

2.3.6.4. Proceso de modelado.

El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que nos resulta problemático. Este proceso, consiste, en esencia, en analizar toda la información de la que se dispone con relación al proceso,

depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico que estamos viendo. En el proceso de modelado se pueden distinguir las fases siguientes representadas en la figura 3: [Aracil, 2005].

2.3.6.4.1. Definición del problema.

En esta primera fase se trata de definir claramente el problema y de establecer si es adecuado para ser descrito. Para ello el problema debe ser susceptible de ser analizado en elementos componentes, los cuales llevan asociadas magnitudes cuya variación a lo largo del tiempo queremos estudiar.

2.3.6.4.2. Conceptualización del sistema.

Una vez asumida, en la fase anterior, la adecuación del lenguaje sistémico es elemental para estudiar el problema, en esta segunda fase se trata de acometer dicho estudio, definiendo los distintos elementos que integran la descripción, así como las influencias que se producen entre ellos. El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama de influencias del sistema.

2.3.6.4.3. Formalización.

En esta fase se pretende convertir el diagrama de influencias, alcanzado en la anterior, en el de Forrester. A partir de este diagrama se pueden escribir las ecuaciones del modelo (algunos entornos informáticos permiten hacerlo directamente). Al final de la fase se dispone de un modelo del sistema programado.

2.3.6.4.4. Comportamiento del modelo.

Esta cuarta fase consiste en la simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera.

2.3.6.4.5. Evaluación del modelo.

En esta fase se somete el modelo a una serie de ensayos y análisis para evaluar su validez y calidad. Estos análisis son muy variados y comprenden desde la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis que incorpora hasta el estudio del ajuste entre las trayectorias generadas por el modelo y las registradas en la realidad. Así mismo, se incluyen análisis de sensibilidad que permiten determinar la sensibilidad del modelo, y por tanto, de las conclusiones que se

extraigan de él, con relación a los valores numéricos de los parámetros que incorpora o las hipótesis estructurales.

2.3.6.4.6. Explotación del modelo.

En esta última fase el modelo se emplea para analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema que se está estudiando. Estas políticas alternativas se definen normalmente mediante escenarios que representan las situaciones a las que debe enfrentarse el usuario del modelo.

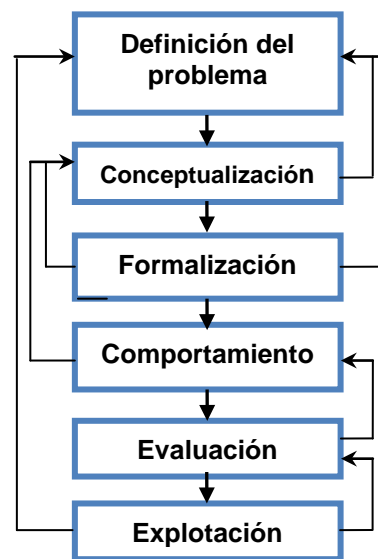


Figura 2.3 *Fases en la construcción de un modelo*

2.4. Modelado mediante dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología para el estudio y la gestión de sistemas complejos que cambian con el tiempo. El método utiliza modelos computacionales para centrar nuestra atención en los bucles de retroalimentación de información que dan lugar al comportamiento dinámico. [Ford 2012]

La simulación por computadora es particularmente útil cuando nos ayuda a comprender el impacto de los retrasos y las no linealidades en el sistema. La dinámica de sistemas es un método de análisis de problemas en los que el tiempo es un factor importante, y que además involucra el estudio de cómo un sistema puede ser afectado por su mundo exterior. [Ford 2012]

La dinámica de sistemas permite realizar la transición de una descripción verbal de un sistema a un diagrama de influencias, y de éste a un sistema dinámico, si se pueden establecer las condiciones oportunas. El proceso de modelado mediante dinámica de sistemas tiene un carácter constructivo en el que después de analizar el sistema, y partiendo del conocimiento disponible de cómo se articulan sus partes mediante un proceso de sucesivas elaboraciones, se llega a un modelo en forma de sistema dinámico que permite generar su comportamiento y del que además, se extraen eventualmente conclusiones cualitativas. [Aracil, Gordillo 2005]

En el diagrama de influencias existen variables que representan la variación respecto al tiempo de otras, lo que conlleva que estas últimas cambien a lo largo del tiempo. Siempre que existe una variable del tipo dX/dt (variación de X respecto al tiempo) se tiene una relación de influencia.

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow x$$

Ecuación 2.6 *Comportamiento de las variables dinámicas.*

La variable X resulta de la acumulación del cambio implícito de la variable dX/dt . La variable X se denomina variable de estado y la dx/dt variable de flujo. Forrester clasifica las variables que aparecen en un diagrama de influencias en tres grupos: variables de estado, variables de flujo y variables auxiliares. Las variables de estado son las más importantes y representan las magnitudes cuya evolución es significativa. Asociadas a las variables de estado están las de flujo que indican su variación en el tiempo. Las variables auxiliares son las restantes y representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las de estado.

La distinción entre variables de estado y variables auxiliares, a partir del diagrama de influencias no está siempre clara siendo difícil de decidir si una variable debe ser un estado o una variable auxiliar. Una regla válida es considerar como se comporta la variable ante un cambio en el sistema. Las variables de estado varían de forma lenta acumulando flujos. Las variables auxiliares varían instantáneamente en respuesta a los valores que toman las variables de estado. Puede ocurrir que una variable, representada por una variable auxiliar cuando se emplea un horizonte temporal muy grande, deba ser representada por una variable de estado al disminuir el tiempo de estado.

2.4.1. Diagramas de Forrester.

El diagrama de Forrester tiene como finalidad la representación de los elementos más representativos de un sistema y de sus interrelaciones, Este modelo fue propuesto por Forrester en los años 60 y 70. [Lahoz-Beltrá 2004].

El diagrama de Forrester También es llamado Diagrama de fluidos, es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. Es una traducción del diagrama Causal a una terminología que facilita la escritura de las ecuaciones en un sistema computacional en la figura 4 se muestra la simbología estándar utilizada en la elaboración de diagramas de Forrester. [García 2003].

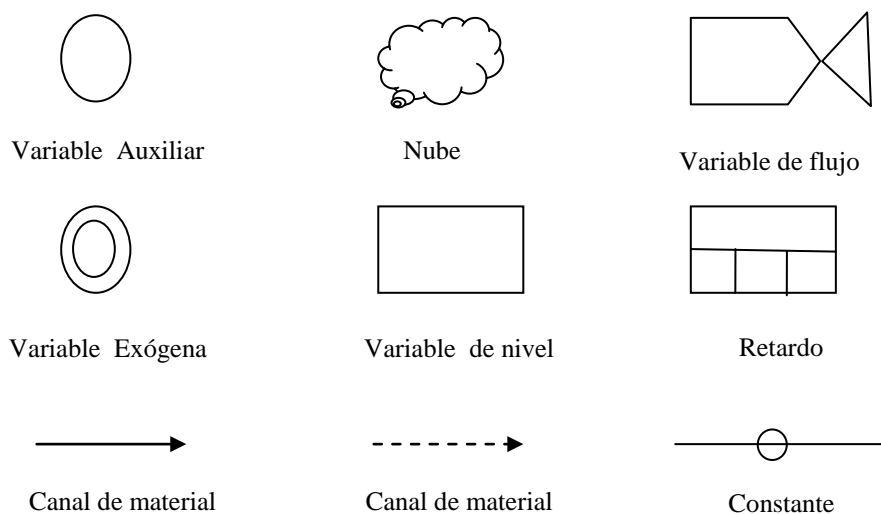


Figura 2.3 Simbología estándar utilizada en la elaboración de diagramas de Forrester.

Los diagramas de Forrester son una herramienta de modelación dinámica básica. Este diagrama utiliza tres tipos de variables que son definidas dentro del diagrama de influencias:

2.4.1.1. Variables de estado.

Son aquel conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estado del sistema. Los estados representan magnitudes que acumulan los resultados de las acciones tomadas en el pasado. La elección de variables de estado depende del problema específico que se esté considerando. Una característica común a todos los estados es que cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables. En los diagramas de Forrester se representan por medio de rectángulos. A cada estado X se le puede asociar un

flujo de entrada F_e y uno de salida F_s , de modo que la ecuación que representa su evolución es la siguiente ecuación :

$$\frac{dx}{dt} = F_e - F_s$$

Ecuación 2.7 *Estado de una variable.*

2.4.1.2. Variables de flujo.

Las variables de flujo determinan las variaciones en los estados del sistema, caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes estados. A las variables de flujo se asocian ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. El bloque representativo de un flujo admite, como señal de entrada, la información proveniente de los estados, o de las variables auxiliares del sistema y suministra como salida el flujo que alimenta un estado. Las ecuaciones asociadas a una variable de flujo reciben el nombre de ecuaciones de flujo o funciones de decisión.

A todo estado se le asocia una variable de flujo, o varias. Una forma frecuente de la ecuación de flujo es la que se muestra en la Ecuación 2.8:

$$F(t) = T_n M(t) \cdot X(t)$$

Ecuación 2- 8 *Asociación de estados de una variable de flujo.*

siendo T_n una tasa normal y M el denominador multiplicador de flujo normal. Si $M = 1$, la situación es neutral

$$F(t) = M(t) \cdot X(t),$$

Ecuación 2- 9 *Estado estable de una variable de flujo*

y el flujo es una fracción constante y normal del nivel. Normalmente el flujo depende de varias variables con una expresión de la forma $F = f(V_1, V_2, \dots, V_k)$. Esta dependencia se puede descomponer multiplicativamente con lo que se tiene la ecuación 2.10 :

$$F = f(V_1) \times f(V_2) \times \dots \times f(V_k)$$

Ecuación 2- 10 *Descomposición Multiplicativa*

En las funciones f_i se recoge el efecto de cada una de las variables que influyen sobre F . Una variable de flujo siempre viene dada por la unidad de estado al que alimenta partido tiempo.

2.4.1.3. Variables auxiliares.

Representan pasos o etapas en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los estados. Se representan por medio de círculos. Las variables auxiliares unen los canales de información entre variables de estado y de flujo. Se pueden utilizar para representar las no linealidades que aparecen en el sistema.

2.4.1.4. Programación del modelo.

Para programar el modelo, es necesario especificar completamente la relación entre las distintas variables; es decir, al diagrama de Forrester que define la estructura del modelo es necesario añadirle más información.

Entre esta información están los datos del modelo, que se pueden clasificar en tres grupos:

- Constantes o datos estáticos: parámetros que se corresponden con variables que no varían en el tiempo y, por tanto, se definen con un sólo valor.
- Valores numéricos que definen las funciones no lineales. Si la variable B depende de A por medio de una función no lineal $f(B = f(A))$, la función f se puede aproximar por medio de un conjunto de N pares de valores: $\{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_N, b_N)\}$
- Datos dinámicos. $[x(t_1), x(t_2), \dots]$ corresponden a variables x que cambian de valor a lo largo del tiempo pero que no son calculadas por el modelo, sino que son datos de éste.

Para definir las sería necesario especificar la trayectoria de las mismas. Esto se hace indicando los valores de estas variables en ciertos instantes de tiempo t_i de manera que en estos instantes la trayectoria será calculada por interpolación, esto se puede realizar de dos formas:

- Definiendo una en la que la variable independiente es el tiempo, es decir, especificando una función f de manera que la variable dinámica D se calcularía haciendo $D=f(t)$, siendo t el tiempo.
- Especificando estos datos en un archivo anexo al modelo, de manera que se pueden hacer distintas simulaciones sólo cambiando el archivo de datos por otro. Estos datos se llaman variables exógenas ya que son magnitudes dinámicas que no son calculadas por el modelo.

2.5. Metodología sistémica

Para el estudio de los sistemas en general se ha desarrollado la metodología sistémica, o conjunto de métodos mediante los cuales se abordan problemas en los que la presencia de sistemas es dominante. [Aracil, Gordillo 2005].

La metodología sistémica pretende aportar instrumentos que permitan estudiar problemas que resultan de las iteraciones que se producen en el sistema y no de disfunciones de las partes aisladas. [Aracil, Gordillo 2005]

El análisis de un sistema consiste en su disección, conceptual, para establecer las partes que lo forman. El mero análisis de un sistema no es suficiente; no basta con saber cuáles son sus partes. Para comprender su comportamiento necesitamos saber cómo se integran; cuáles son los mecanismos mediante los que se produce su coordinación. Necesitamos saber cómo se produce la síntesis de las partes en el sistema. [Aracil, Gordillo 2005]

En el estudio de un sistema, tan importante es el análisis como la síntesis. El énfasis en la síntesis distingue la metodología sistémica de las metodologías científicas más clásicas de análisis de la realidad, en las que se tiende a sobrevalorar los aspectos analíticos por oposición a los sintéticos, mientras que en la metodología sistémica se adopta una posición más equilibrada.

Tan importante es el análisis, que nos permite conocer las partes de un sistema, como la síntesis, mediante la cual estudiamos cómo se produce la integración de esas partes en el sistema.

En la dinámica de sistemas se trata de poner de manifiesto cómo están relacionados su estructura y su comportamiento. La metodología sistémica suministra también un lenguaje que aporta nuevas formas de ver los problemas complejos. [Aracil, Gordillo 2005]

La dinámica de sistemas aporta herramientas que van desde los diagramas de influencias hasta los modelos informáticos que nos permiten ver los sistemas que pueblan nuestro entorno mediante una óptica diferente que nos ayudará a descubrir aspectos en los que posiblemente no hayamos considerado y que nos permite alcanzar una visión más rica de la realidad.

2.5.1. Lenguaje elemental para la descripción de sistemas.

La descripción mínima de un sistema viene dada por la especificación de las distintas partes que lo forman, mediante el conjunto C de su composición, y por la relación R que establece cómo se produce la influencia entre esas partes.

El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema y se representa mediante el diagrama de influencias o causal.

Dos tipos de retroalimentación o realimentación (Feedback) son importantes en las actividades del sistema, y ambos están relacionados con el control, junto con los retardos.

2.5.2. Retroalimentación negativa

La retroalimentación negativa es una de tipo correctivo que ayuda a mantener el sistema dentro de un margen crítico de operación, y reduce las fluctuaciones de rendimiento respecto de las normas o estándares. La retroalimentación negativa se efectúa mediante un lazo o ciclo de control. [Seen]

Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. [Aracil, Gordillo 2005]

2.5.3. Retroalimentación Positiva.

Contrariamente a la retroalimentación negativa, que es de carácter correctivo, la retroalimentación positiva refuerza la operación de un sistema, haciendo que continúe con el mismo rendimiento y sin alternar sus actividades. [Seen]

Se trata de una realimentación que amplifica las perturbaciones y que, por tanto, crea inestabilidad en el sistema. En este sentido se puede decir que su efecto es contrario al de la realimentación negativa. [Aracil, Gordillo 2005]

2.5.4. Modelación de sistemas con líneas de espera.

Estos sistemas han sido representados, a través de modelos lineales que permiten obtener medidas de desempeño en base a información estática de las variables de entrada del sistema, para un momento dado.

Dentro del estudio de la literatura actual de esta investigación no se entró un modelo dinámico que permitiera a los sistemas con líneas de espera, estudiar sus variables en función del tiempo, así como encontrar nuevas variables que afectan directamente el desempeño del sistema.

Para simular el comportamiento del sistema de líneas de espera se puede generar un modelo dinámico utilizando diversas herramientas de la dinámica de sistemas, así como las distintas fórmulas contenidas en la teoría de colas, para poder evaluar y simular el comportamiento del sistema.

2.5.5. Herramientas software para construir modelos dinámicos.

El avance en los sistemas computacionales facilitó el desarrollo de entornos software de modelado y simulación. En sus inicios, estas herramientas facilitaban la labor de la simulación permitiendo al modelador introducir las ecuaciones diferenciales o sistema de ecuaciones, para poder ser resueltos con sus algoritmos de métodos numéricos y luego entregar los resultados de la simulación.

Estas herramientas evolucionaron para brindar soporte, no solo a la simulación, sino además para el modelado y el análisis de sensibilidad, entre otras. Igualmente, se han adaptado a las necesidades específicas de los usuarios; por ejemplo, para el modelado y simulación de diversos fenómenos organizacionales, lo cual facilitó extenderse a sectores como el empresarial e industrial.

En el ámbito académico y empresarial las herramientas más utilizadas para simulación y modelación son las siguientes:

- AnyLogic (AnyLogic, 2010).
- Evolucion (Evolucion, 2010).
- iThink/Stella (ISEE Systems, 2010).
- Powersim (PowerSim, 2010).
- Simile (Simile, 2010).
- Vensim (VenSim, 2010).

Actualmente estas herramientas software ofrecen diferentes servicios, por medio de un entorno intuitivo para el usuario.

Estas herramientas proveen utilidades que permiten utilizar: herramientas para el modelado, como los editores para la creación de diagramas causales y diagramas de flujo n y el uso de funciones matemáticas, herramientas para realizar y controlar la simulación del modelo.

Al momento de realizar el análisis del modelo y su comportamiento, se observa que existen diferentes herramientas para este propósito. Para modelos complejos estos mecanismos de análisis son de gran de ayuda para el entendimiento del comportamiento, depuración y ajuste del modelo.

2.5.6. Comparativo de Herramientas de software para construcciones modelos dinámicos.

En las siguientes tablas se muestran las principales características de cada uno de los principales paquetes de software más utilizados:

Software		Versión	
ANYLOGIC		Professional Edition 6.5.0	
Fabricante		Costo	Idioma
XJ Technologies Company (Rusia)		US \$ 6,199	Ingles Ruso
Diagrama de influencias			
NO			
Diagrama flujo			
Permite dibujar diagramas de flujo-nivel en el editor de diagramas s, usando elementos como:- Stock – Flujo - Variable Auxiliar – Parámetro – Conector - Función Tabla			
Simulación			
Soporta las siguientes formas de presentación de resultados: Diagrama de Gantt, Histograma, Estadísticas y Grafico			
Herramientas de análisis			
Presenta varias herramientas de análisis como son:			
- <i>Comparación de corridas</i> : Compara los resultados de simulación para diferentes parámetros establecidos.			
- <i>Análisis de Sensibilidad</i> : Explora que tan sensibles son los resultados de simulación a la variación de los parámetros del modelo.			
- <i>Montecarlo</i> : ejecuta una simulación (estocástica) un número de veces, obteniendo la colección de salidas y viéndolo como un histograma.			
- <i>Calibración</i> : Ajusta los parámetros del modelo para que su comportamiento en condiciones particulares coincida con un patrón conocido (observado).			
<i>Experimento de encargo</i> : Desarrolla su propio escenario usando AnyLogic API.			

Tabla 2.1 Descripción de herramientas de software- de modelación simulación ANYLOGIC.

Software		Versión	
EVOLUCION		4.0	
Fabricante		Costo	Idioma
Grupo SIMON de Investigación en Modelamiento y Simulación		Software Gratuito para uso académico e investigativo.	Español
Diagrama de influencias			
Cuenta con un Editor de			
Tiene diferentes vistas y puede crear el diagrama con sus elementos, ciclos, clones, sectores y relaciones de material o de información entre ellos.			
Permite generar un bosquejo del Diagrama de Flujo Nivel.			
Diagrama flujo			
Cuenta con un Editor de Diagrama de Flujo Nivel. Presenta diferentes vistas y una barra de herramientas con los elementos que forman el diagrama de flujo nivel para crear el modelo de simulación.			

Simulación
Presenta los resultados de la simulación en forma de gráficos en 2D y 3D, de tablas y gráficos con animadores.
Herramientas de análisis
Realiza el análisis de sensibilidad de dos formas:
- Por Variación de Escenarios. En el <i>Análisis por Variación de Escenarios</i> se selecciona el elemento a analizar y se pueden manipular los escenarios existentes para el modelo.
- Por Variación de Parámetros. El <i>Análisis por Variación de Parámetros</i> define el comportamiento de la variable a analizar, al modificar el valor de uno de los parámetros.

Tabla 2.2 Descripción de herramientas de software- de modelación simulación EVOLUCION.

Software		Versión	
POWERSIM		STUDIO 8	
Fabricante	Costo	Idioma	
Powersim Software AS (Noruega)	Enterprise, Expert, Professional, Executive, Cockpit, SDK US \$1442/usuario	Multilinguaje.	

Diagrama de influencias
Se pueden realizar, con etiquetas de textos y líneas pero que no se conectan entre si (no es propiamente un modelo sino un dibujo).
Diagrama flujo
Permite elaborar modelos con los elementos propios del Diagrama de Flujo- Nivel, entre ellos incluye los elementos: nivel, flujo continuo y discreto, constante, enlace, auxiliar, snapshot, sub-modelo, depósito, variables de vectores y otros elementos adicionales.
Simulación
Plasma la presentación de resultados de diversas formas: Gráficas de tiempo, Tablas de tiempos, gráficos de dispersión, Tabla, Indicador, Deslizador, Switch
Herramientas de análisis
Posee varias herramientas de análisis para estudiar y mejorar el comportamiento de la dinámica de los modelos creados con este software, estas son: Análisis de riesgo, Control de escenarios, Optimización de políticas y Gestión de riesgos.

Tabla 2.3 Descripción de herramientas de software- de modelación simulación POWERSIM.

Software		Versión	
SIMILE		5.7	
Fabricante	Costo	Idioma	
Simulistics Ltd (Reino Unido)	Enterprise Edition US \$ 1195 Standard Edition US \$ 595 Evaluation Edition FREE	Ingles	
Diagrama de influencias			
No			
Diagrama flujo			
Se pueden crear los elementos del diagrama flujo-nivel (compartimientos, flujos, variables) y las relaciones o influencias entre ellos.			
Simulación			
Realiza la presentación de los resultados a través de gráficas, tablas o animaciones.			
Herramientas de análisis			
No			

Tabla 2.4 Descripción de herramientas de software- de modelación simulación SMILE.

Software		Versión	
VENSIM		PLE 5.10a 5.7	
Fabricante	Costo	Idioma	
Ventana System, Inc. (Estados Unidos)	DSS US \$1995/usuario Professional US \$1195/usuario PLE Plus US \$169/usuario PLE (Personal Learning Edition) US \$50/usuario	Chino Ingles Japonés	
Diagrama de influencias			
Se pueden dibujar los elementos pertenecientes al Diagrama de Influencias en la ventana del editor, con sus respectivas variables, relaciones de influencia, bucles de realimentación y signos de polaridad (+ o -). Se pueden imprimir y exportar los esquemas al portapapeles para su uso en otras aplicaciones.			
Diagrama flujo			
Posee una zona de dibujo para crear el modelo con los elementos del Diagrama de Flujo Nivel, como son nivel, flujo, variable auxiliar, constante, flecha. Los diagramas pueden ser personalizados de diferentes maneras. La norma para esquemas de Vensim es mostrar los niveles (acumulaciones) como una caja, con el nombre dentro de la caja. Los flujos se muestran con el nombre de la válvula de forma explícita, aunque a veces un flujo no tiene nombre (se muestra solo una válvula). Las variables auxiliares, las constantes, tablas, los datos variables (externos), etc., se muestran solo con su nombre.			

Simulación
Presenta los resultados de simulación en: s, Tablas, Tablas de Tiempo, Tira de causas
Herramientas de análisis
Presenta varias Herramientas de Análisis como son:
- Diagramas de Árbol de Causas y Diagramas de Árbol de Usos: Permiten investigar la estructura del modelo.
- Ciclos: Muestra todas las variables en todos los ciclos de realimentación.
-Documento: Proporciona la documentación de todo el modelo, mostrando todas las ecuaciones del modelo en un formato de texto simple.
- Grafico y Tabla: Muestran el comportamiento de las variables.
- Tira de Causas: Es una herramienta rápida y poderosa que nos ayuda a determinar <i>qué</i> porciones de un modelo están causando <i>cuál</i> tipo de comportamiento.
- Comparación de Simulaciones: Lista todas las diferencias en Constantes y Funciones Graficas (diferencias en las primeras dos simulaciones de la simulación cargados).
- Análisis de Sensibilidad: Realiza cientos o miles de simulaciones de Montecarlo con las constantes modificadas a lo largo de un rango de valores y después guarda los resultados para un análisis posterior.

Tabla 2. 5 Descripción de herramientas de software- de modelación simulación VENSIM.

2.5.7. Vensim.

Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos dinámicos de simulación que permite realizar la conceptualización, documentación, simulación y optimización de modelos construidos a través de la dinámica de sistemas. Proporcionando una forma simple y flexible para crear modelos de simulación ya sea con diagramas causales o con diagramas de flujo.

Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabra unidas a través de flechas. Una vez determinadas las variables y las relaciones entre ellas se establecen las ecuaciones mediante el editor de ecuaciones para crear el modelo de simulación.

Además se puede analizar el modelo en el proceso de construcción teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos. Mientras que se construye un modelo que puede ser simulado, Vensim permite explorar el comportamiento del modelo.

Los pasos más comunes para construir y utilizar un modelo de simulación en Vensim se muestran a continuación:

- Construir un modelo.
- Dibujo del modelo.
- Introducir las ecuaciones.
- Determinar las unidades de las variables
- Examinar la estructura del modelo y sus unidades.
- Examinar la estructura del modelo utilizando las herramientas de análisis.
- Simular el modelo cambiando los parámetros para ver cómo responde.
- Examinar el comportamiento del modelo mediante las herramientas de análisis.
- Realizar diferentes experimentos para entender y refinar el modelo.

2.4.1.1. Características principales de Vensim.

- Permite identificar los distintos elementos del modelo con nombres de hasta 250 caracteres, incluyendo tantos espacios en blanco, es decir, divisiones de palabras, como se desee.
- Permite introducir datos directamente o en forma de tablas e interpola los datos conocidos cuando se omiten los valores de alguna(s) observación(es).
- La utilidad Units Check del menú Model permite contrastar la consistencia de las unidades en las que han sido medidos los distintos elementos del modelo.
- La apariencia de la pantalla del diagrama causal es muy flexible, en el sentido de que resulta muy sencillo organizar visualmente los elementos por categorías asignándoles bordes o marcos diferentes, desplazándolos por la pantalla a conveniencia, modificando las fuentes que los describen, el grosor, color de las

flechas que indican sus relaciones, etc. No debe olvidarse tampoco la conveniencia de poder poner en segundo plano las relaciones que influyen sobre alguna variable convirtiéndola en variable sombra o la posibilidad de dividir la representación gráfica del modelo entre dos o más bosquejos.

- El modelador podrá realizar simulaciones con los datos de partida del modelo empleando la opción simulate del menú desplegable Model. Seleccionando la opción adecuada también podrá realizar simulaciones alternativas modificando el valor de los parámetros o valores de cuadros o tablas del modelo.
- El menú desplegable Windows permite acceder al panel de control (control panel) desde el que se pueden modificar muchos aspectos de interés, y, en particular, todos aquellos que afectan a los diagramas del modelo. en los ejes, etc.
- El menú vertical de iconos permite realizar con la máxima facilidad operaciones muy convenientes.
- Comprobar en cualquier momento qué elementos influyen sobre el valor de la variable seleccionada en cada momento y sobre qué elementos influye la variable seleccionada presionando respectivamente el primero o el segundo icono de la serie vertical.
- El modelador puede recordar en cualquier momento los datos relativos a cualquier elemento del modelo seleccionando ese elemento.
- El quinto icono de la barra vertical permiten conocer tras cada simulación, la evolución gráfica de la variable seleccionada y las de los elementos que tienen una influencia directa sobre ella. El sexto icono ofrece esa misma información pero sólo para la variable seleccionada.
- El último icono del menú vertical permite leer la evolución de la variable seleccionada periodo tras periodo en forma de cuadro.

III. METODOLOGIA

La metodología empleada en el desarrollo de esta investigación está basada en la metodología empleada para la elaboración de modelos dinámicos descrita por [Aracil, 2005] que consiste en las siguientes etapas:

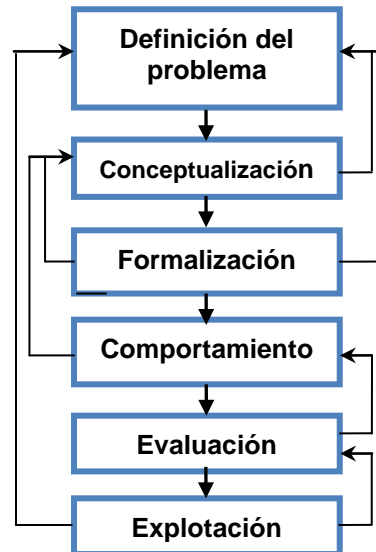


Figura 3.1 Metodología utilizada que describe las Facetas en la construcción de un modelo Dinámico.

2.6. Definición del problema.

Las líneas de espera son muy comunes en la vida cotidiana, desde la fila que se forma en un establecimiento para recibir un servicio, hasta los procesos que forman una cola para poder ser ejecutados por un procesador.

En general a nadie le gusta esperar mucho tiempo formado para recibir un servicio y las empresas no están dispuestas a incrementar los gastos derivados del tiempo de inactividad de un servidor (maquinarias, personas, equipos, etc.).

El estudio de las líneas de espera, nos permite encontrar un balance entre el tiempo de espera y la tasa de servicio, de tal manera que se encuentre un equilibrio entre el costo del servicio y el costo de espera. Las variables de decisión de la teoría de colas, se encuentran en constante movimiento, es decir la tasa de llegadas de clientes puede ser muy baja en un día y al día siguiente sobrepasar la capacidad del servicio. Por esta razón no podemos ver este tipo de sistemas como sistemas estáticos, principalmente porque cada una de estas variables se comporta diferente en función del tiempo.

Al crear un modelo dinámico, podemos simular el comportamiento del sistema un momento dado, pero también nos permitirá predecir el comportamiento futuro y determinar pautas de comportamiento de cada una de las variables del

sistema. De esta manera podremos tomar decisiones en cuanto a la capacidad del servicio en base a información objetiva, teniendo mayor grado de certeza sobre el impacto de dichas decisiones.

El Objetivo es construir un modelo dinámico que permita evaluar, simular y comprender el comportamiento de un sistema con líneas de espera a través de:

- Analizar los diferentes modelos de la teoría de colas.
- Construir un diagrama causal que permita entender el comportamiento de las líneas de espera.
- Construir un diagrama de Forrester con las ecuaciones del sistema de colas.
- Estudiar las técnicas de modelación dinámica de sistemas: diagramas causales, diagramas de influencia, diagramas de Forrester, etc.
- Construir un modelo dinámico de la teoría de colas, a través de herramientas de modelado.
- Simular el comportamiento de la línea de espera utilizando herramientas de simulación.
- Ajustar el modelo en base a la simulación del comportamiento de la línea de espera.

2.7. Conceptualización.

La segunda etapa del proceso de modelado consiste en identificar todos los elementos que conforman el sistema, para identificar dichos elementos se utilizaron mapas mentales, representados en Mindjet MindManager 6. Continuación se muestra el Modelo Mental del Sistema con líneas de espera:

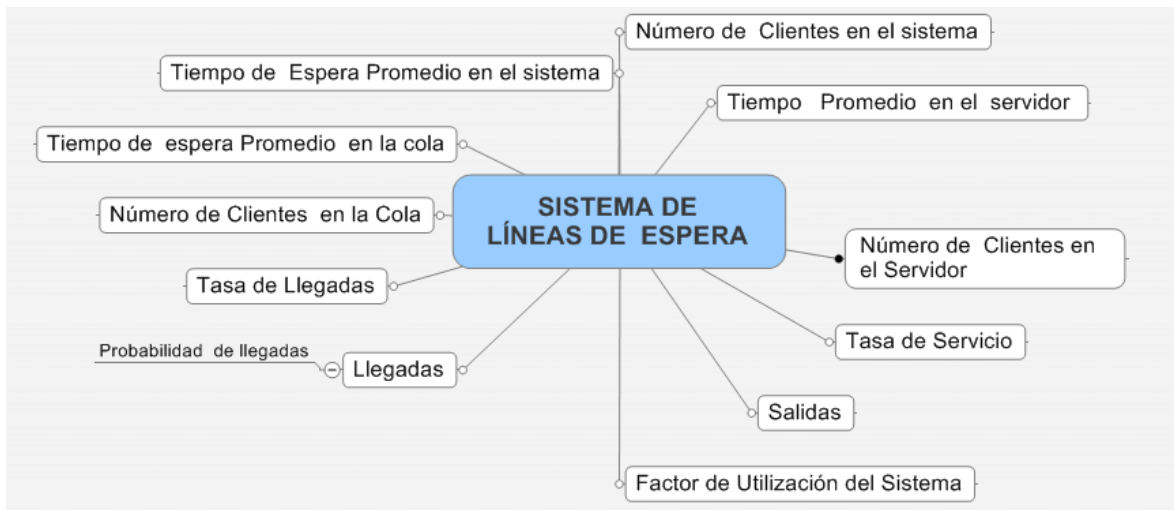


Figura 3.2 Mapa mental de las variables que forman el sistema de líneas de espera

El mapa mental se utilizó con la finalidad de descubrir todas las variables que influyen de manera directa o indirecta en el desempeño del sistema de colas, estas variables se formalizaron en la tercera etapa del modelo.

Las variables identidades se describen en la siguiente tabla, donde se especifica el nombre de la variable, una breve descripción y la nomenclatura que se utilizará en el desarrollo de esta investigación.

Variable	Descripción
<i>Número de Clientes en la Fila</i>	Es el número de clientes que se encuentran actualmente en la fila y su longitud refleja las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Las hileras cortas significan que el servicio al cliente es bueno o que la capacidad es excesiva. ▪ Las hileras largas. Indican una baja eficiencia del servidor o la necesidad de aumentar la capacidad.
<i>Tiempo Promedio en el sistema</i>	Se obtiene al medir el tiempo que transcurre desde la llegada hasta la salida del mismo, esta variable ofrece indicios sobre problemas con los clientes, eficiencia del servidor o capacidad.
<i>Calidad del Servicio</i>	Constituye desde el punto de vista de usuario, su percepción acerca de la calidad en el servicio brindado.
<i>Tiempo de espera Promedio en la cola</i>	Representa el tiempo que el cliente tiene que esperar para entrar a la instalación del servicio. Cuando el tiempo de espera es largo el cliente tiene la impresión de que la calidad del servicio es deficiente.
<i>Tiempo Promedio en el servidor</i>	Es el tiempo promedio que tarda un servidor en atender a un cliente.
<i>Tiempo entre llegadas.</i>	Se obtiene midiendo el tiempo que transcurre entre dos llegadas sucesivas al sistema de colas.
<i>Tasa de Llegadas.</i>	Representa el número esperado de llegadas por unidad de tiempo.
<i>Llegadas</i>	Representa la población de clientes y esta puede ser finita o infinita. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Es finita cuando el número potencial de nuevos clientes para el sistema de servicio es afectado notablemente por el número de clientes que ya se encuentran en el sistema. ▪ Es infinita cuando el número de clientes que entran al sistema no afecta la tasa a la cual dicha población genera nuevos clientes.
<i>Factor de Utilización del Sistema</i>	Refleja el porcentaje de tiempo en que las instalaciones de servicio permanecen ocupadas. Es recomendable que el resultado de esta variable sea menor al 100%. Este Factor se calcula dividiendo la tasa de llegadas sobre la tasa de servicio.

<i>Salidas.</i>	<p>Consiste en el número de clientes que abandonan el sistema, las salidas pueden originarse por dos motivos principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuando el cliente se forma en la línea de espera, espera hasta ser atendido, es atendido y sale del sistema. ▪ Cuando el cliente se forma en la línea de espera pero por ansiedad o cualquier otro motivo abandona la fila antes de ser atendido.
<i>Tasa de Servicio</i>	Constituye el número de clientes que son atendidos por unidad de tiempo.
<i>Número de Clientes en el Servidor.</i>	Representa el número de clientes que se están atendiendo en un momento dado.
<i>Número de Clientes en el sistema</i>	Está conformado por la cantidad de clientes que forman la cola más los que se encuentran recibiendo el servicio. Un gran número de clientes en el sistema provoca congestionamientos y puede dar lugar a la insatisfacción del cliente, a menos que el servicio aumente su capacidad.
<i>Capacidad Máxima de la cola</i>	Es la cantidad Máxima de personas que puede formarse para recibir un servicio. En la teoría de colas se asume que esta variable es infinita.
<i>Capacidad Máxima del</i>	Denotada por la cantidad Máxima de personas que puede albergar el sistema incluyendo clientes y servidores, se encuentra delimitada por la infraestructura física que conforma la instalación del servicio.
<i>Clientes que abandonan la Fila</i>	Son los clientes que abandonan la fila antes de ser atendidos o antes de entrar en la disciplina de cola.
<i>Preparación y experiencia del servidor</i>	Capacidad del servidor para atender diversas situaciones que presentan los clientes.
<i>Personal de contacto</i>	Cantidad de empleados que tienen contacto directamente con el cliente y que no necesariamente son considerados como servidores.

Tabla 3.1 Descripción de las variables de decisión en un sistema de líneas de espera.

2.8. Formalización.

En la fase de formalización se identificaron las variables que conforman el sistema y se clasificaron en los siguientes criterios:

- Variables endógenas y Exógenas.
- Variables cualitativas y cuantitativas.
- Variables críticas y Auxiliares.

Variable	Es Crítica	TIPO		Identificador
<i>Tasa de Servicio</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	μ
<i>Preparación y experiencia del servidor</i>	NO	Cualitativa	Endógena	EXP
<i>Tasa de Llegadas.</i>	SI	Cuantitativa	Exógena	λ
<i>Salidas.</i>	NO	Cuantitativa	Endógena	$L \mu$
<i>Clientes que abandonan la Fila</i>	NO	Cuantitativa	Exógena	LCexit
<i>Número de Clientes en el sistema</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	LSI
<i>Llegadas</i>	SI	Cuantitativa	Exógena	$L \square$
<i>Personal de contacto</i>	NO	Cuantitativa	Endógena	LPC
<i>Número de Clientes en la Fila</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	LQ
<i>Capacidad Máxima de la cola</i>	NO	Cuantitativa	Endógena	LQmax
<i>Número de Clientes en el Servidor.</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	LSE
<i>Capacidad Máxima del Sistema</i>	NO	Cuantitativa	Endógena	LSImax
<i>Tiempo entre llagadas.</i>	SI	Cuantitativa	Exógena	$W \square$
<i>Tiempo de espera Promedio en la cola</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	WQ
<i>Tiempo Promedio en el servidor</i>	NO	Cuantitativa	Endógena	WSE
<i>Tiempo Promedio en el sistema</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	WSI
<i>Factor de Utilización del Sistema</i>	SI	Cuantitativa	Endógena	P
<i>Calidad del Servicio</i>	NO	Cualitativa	Endógena	Cal

Tabla 3.2 Clasificación de las variables del sistema

2.8.1. Nomenclatura de los Identificadores:

Para identificar cada una de las variables en el sistema se utilizó la siguiente nomenclatura:

- W . Indica que es una variable medida en una unidad de tiempo (ms,s,m,h,d,s,m,a).
- L. Representa a una variable que es medida con el número de clientes.
- SI. Sistema.

- Q. Cola.
- SE. Servidor
- C .Clientes.
- μ . Salidas.
- λ Llegadas.

Análisis de variables del sistema.

Variables	Cantidad	Total
Endógenas	14	
Exógenas	4	18
Cuantitativas	16	
Cualitativas	2	18
Criticas	10	
AUX	8	18

Tabla 3.3 Resultados del análisis de variables

Analisis de variables

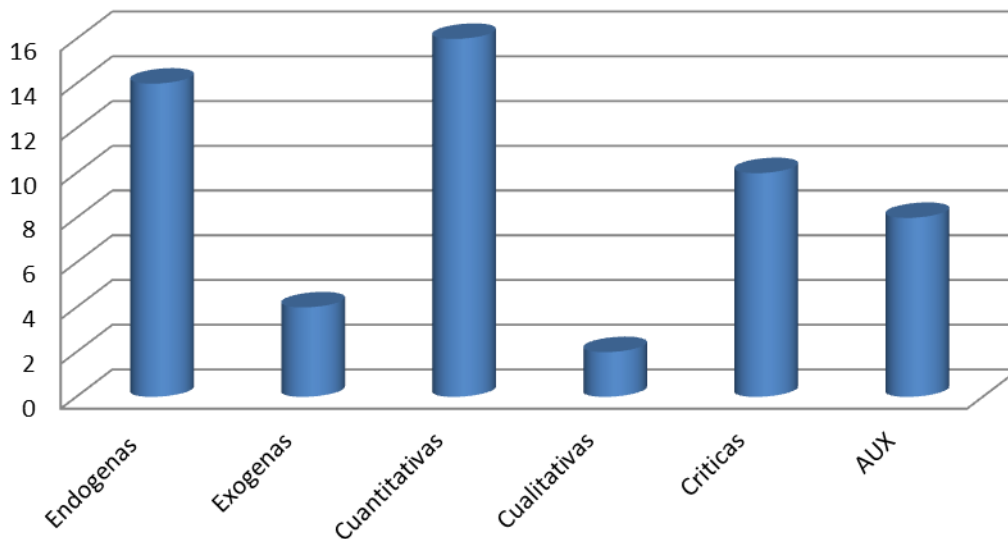


Grafico 3.1. Clasificación de las variables del sistema.

Gran parte de las variables identificadas en el sistema de líneas de espera (72.22 %) resultaron endógenas, lo cual indica que son variables que podemos controlar desde el sistema colas. Además el 83.33 % son variables que pueden medirse cuantitativamente a través de una escala numérica ya sea de tiempo o cantidad. Y el 27.77 % de las variables evaluadas cumplen con las tres características deseables bajo los tres criterios de evaluación, es decir que son variables endógenas, críticas y que además son medidas cuantitativamente. Y estas serán representadas en el modelo de Forrester.

2.9. Comportamiento.

El comportamiento del sistema de líneas de espera, se representó en una primera etapa mediante el diagrama causal, el cual permite identificar las iteraciones entre los distintos componentes que forman parte del sistema de líneas de espera, a través de relaciones que pueden ser de dos tipos:

- Relaciones de influencias positiva.
En una relación de influencia positiva cualquier incremento o disminución en alguna de las variables involucradas tiene un efecto similar en la variable relacionada.
- Relaciones de influencia negativa.

En las relaciones con influencia negativa cualquier cambio en alguna variable tiene repercusiones recíprocamente inversa en la segunda variable.

2.9.1. Análisis de bucles de realimentación positiva y negativa.

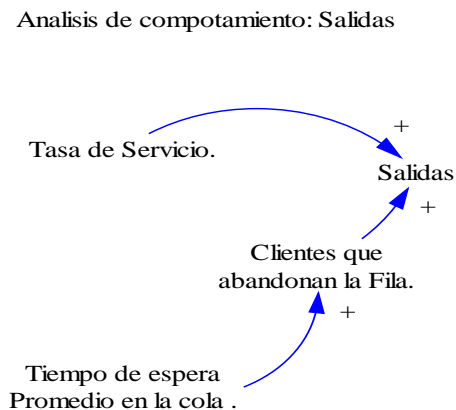


Figura 3.3 *Bucles de realimentación Salidas.*

Este bucle de realimentación indica que si la tasa de servicio o cantidad de clientes que abandonan la fila aumentan, por consecuencia también aumentan las salidas. Las salidas pueden originarse por dos situaciones:

- Por los clientes que ya fueron atendidos.
- Por los clientes que abandonaron el sistema antes de ser atendidos, en este modelo se asume que todos fueron atendidos.

Cuando el tiempo de espera en la cola aumenta, se incrementa el número de clientes que abandonan la fila, debido a que el cliente muchas veces no está dispuesto a esperar tanto tiempo en la instalación del servicio y si tiene opciones busca aquella que le represente menor espera.

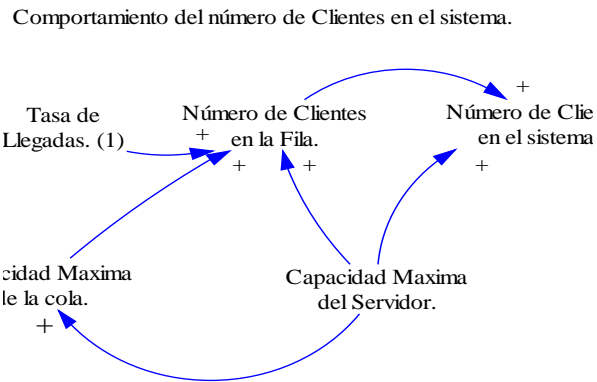


Figura 3.4 *Comportamiento del número de clientes en el sistema.*

En cuanto al número de clientes en la fila este se incrementará cuando las llegadas al sistema aumenten, cuando esta variable aumenta se incrementa el número de clientes en el sistema. El número de clientes en el sistema y en cola, se encuentran con influencia positiva con la capacidad máxima del servidor.

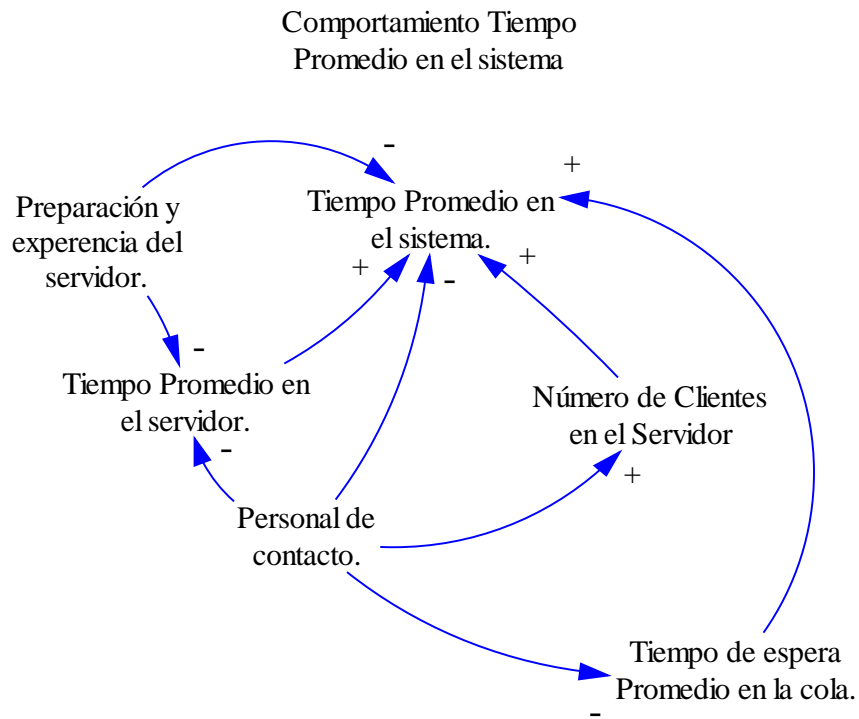


Figura 3.5 *Comportamiento del Tiempo promedio en el sistema.*

El tiempo promedio en el sistema va a disminuir cuando el servidor cuente con la experiencia y preparación adecuada o cuando el personal de contacto se incremente (el personal de contacto son las personas que atienden al cliente). Esta variable se incrementa cuando se presenta un aumento en el tiempo de espera en la cola.

(1) Comportamiento de Las llegadas

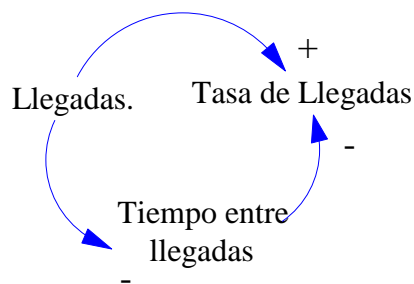


Figura 3.6. *Comportamiento de las llegadas*

La tasa de llegadas sufre un incremento cuando las llegadas aumentan y cuando estas aumentan el tiempo entre llegadas se disminuye.

(3) Comportamiento del factor de utilización del sistema

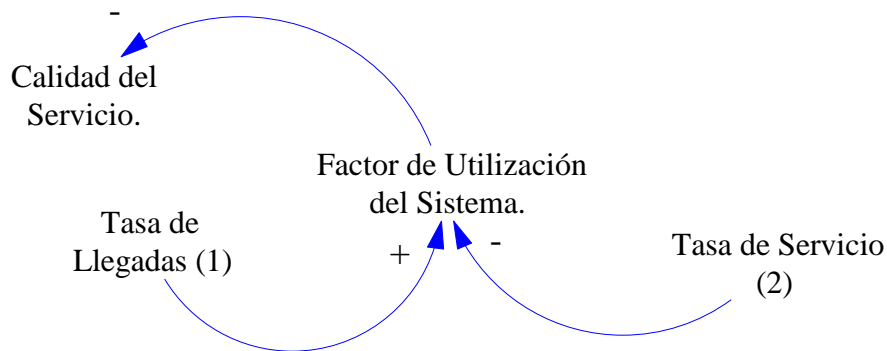


Figura 3.7 Comportamiento del factor de utilización del sistema.

El factor de utilización del sistema se encuentra influenciado por dos variables que son: la tasa de llegadas y la tasa de servicio cuando hay un incremento en la tasa de llegadas, también aumenta el factor de utilización del sistema, ocurre lo contrario con la tasa de servicio. Lo interesante de este bucle es la variable de calidad, cuando el factor de utilización sobrepase su capacidad que es de 1, la calidad en el servicio se verá afectada negativamente.

A continuación se muestra el diagrama causal completo el sistema de línea de espera donde se identifican las relaciones y los bucles de realimentación.

DIAGRAMA CAUSAL SISTEMA DE LINEAS DE ESPERA

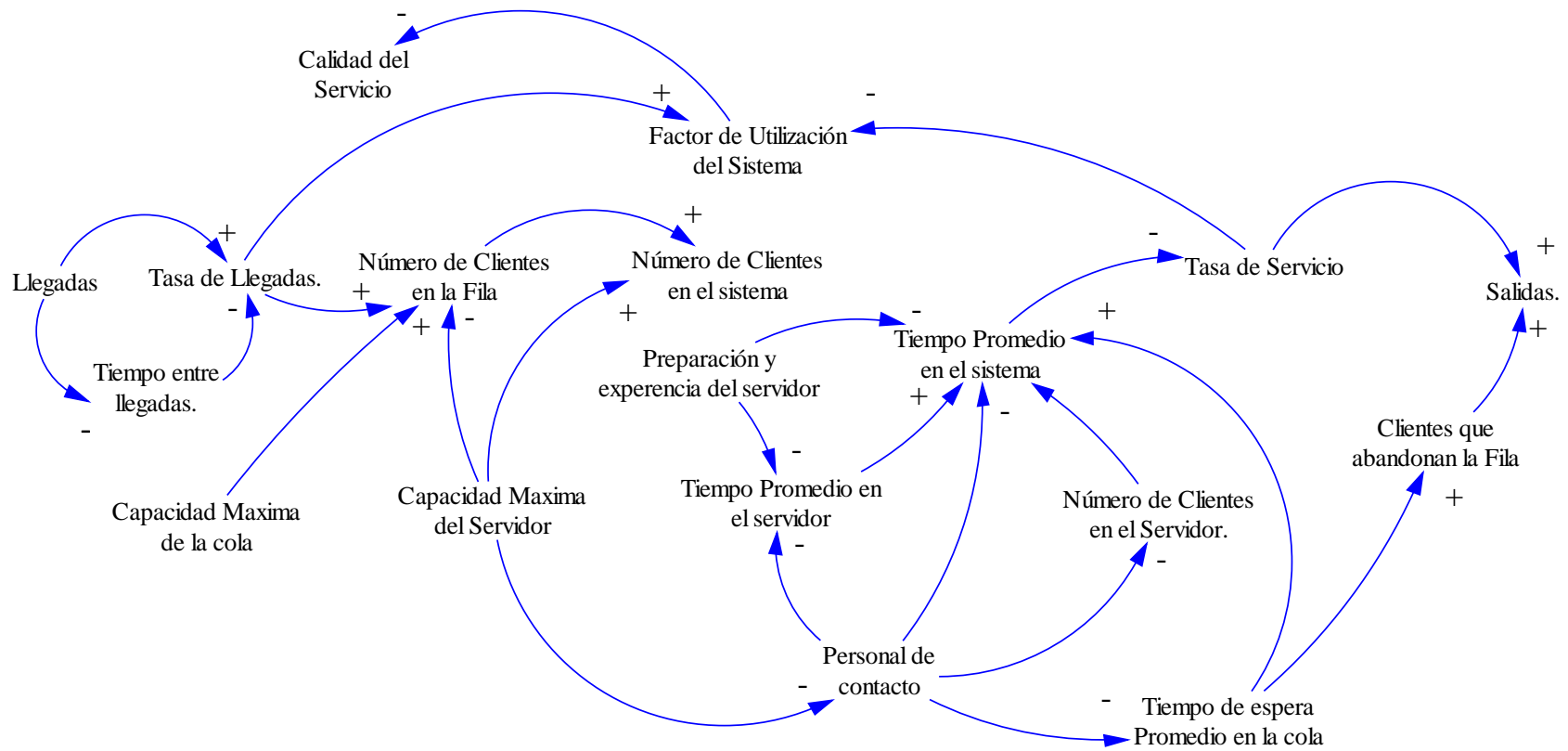


Figura 3.7 Diagrama causal sistema de líneas de espera.

La segunda etapa para representar el comportamiento del sistema de líneas de espera consiste en elaborar el diagrama de Forrester, identificando las variables que van a conformar el diagrama:

- Variables de flujo.
- Variables auxiliares.

Se representaron las variables del sistema mediante el diagrama de Forrester y se determinaron las asociaciones y relaciones existentes entre ellas. En la siguiente figura se muestra el modelo completo del sistema de líneas de espera.

2.9.2. Diagrama de Forrester

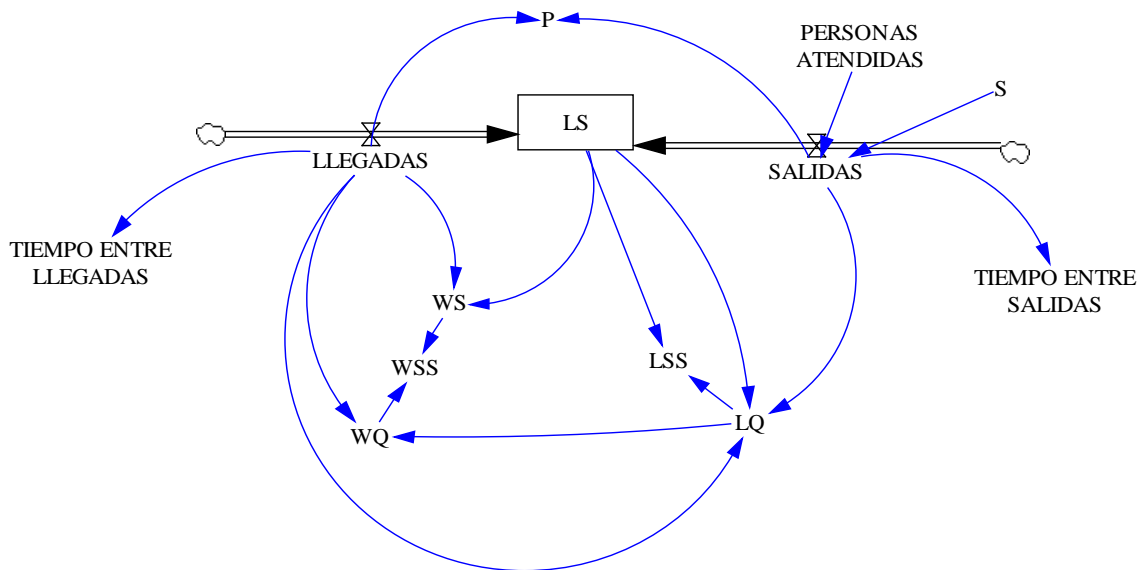


Figura 3.8 Modelo de Forrester Sistema de líneas de espera.

Antes de comenzar con la representación del modelo de Forrester, debemos tener en cuenta las asunciones del modelo:

- Asunción 1. El tiempo que tarda el servidor en atender una solicitud es constante independiente del tipo y número de solicitudes.
- Asunción 2. Todos los clientes que entran en el sistema son atendidos, ningún cliente abandona la fila.
- Asunción 3. La disciplina de cola empleada en el modelo es una disciplina FIFO (Primero que entra primero en salir).
- Asunción 4. La capacidad del sistema y de la cola son infinitas.

- Asunción 5. El sistema cuenta con una sola fila, múltiples servidores y una sola línea de comunicación.
- Asunción 6. Los clientes llegan a una tasa constante.

Iniciamos con la configuración inicial del modelo, el tiempo de inicio para la simulación es de 0 hasta el tiempo final que es 60 (nos interesa simular el comportamiento en minutos durante 1 hora) y definimos la unidad de medición del tiempo, seleccionamos Minute y seleccionamos el tiempo de incrementos de cada iteración.

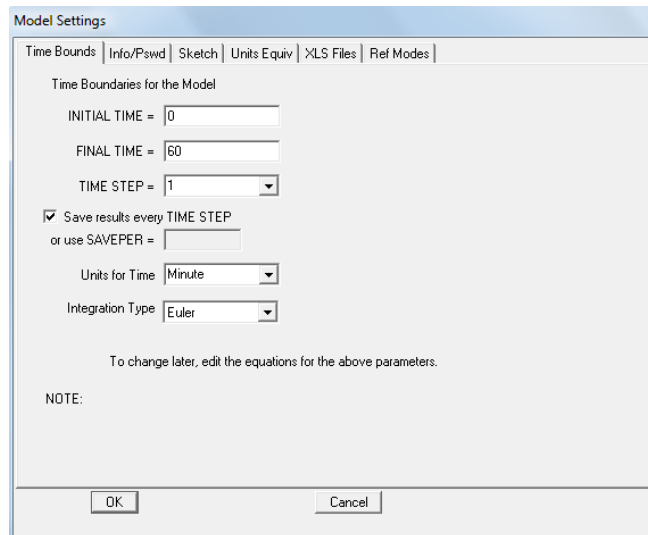


Figura 3.9 Configuración inicial del modelo..

Se definieron las constantes, flujos y ecuaciones del sistema. Las ecuaciones que definen al modelo son las siguientes:

$$Ls = \lambda Ws$$

Ecuación 3.1 Ecuación del modelo para determinar el número de elementos en el sistema.

$$Lq = \lambda Wq$$

Ecuación 3.2 Ecuación del modelo para determinar el número de elementos en la cola.

$$Ws = Wq + \frac{1}{\mu}$$

Ecuación 3.3 Ecuación del modelo para determinar tiempo de espera en el sistema.

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$$

Ecuación 3.4 Ecuación del modelo para determinar el factor de utilización el sistema.

Las ecuaciones mostradas en la sección anterior fueron introducidas en el modelo de Forrester definiendo sus unidades de medición y el rango de valores válidos para cada una ellas.

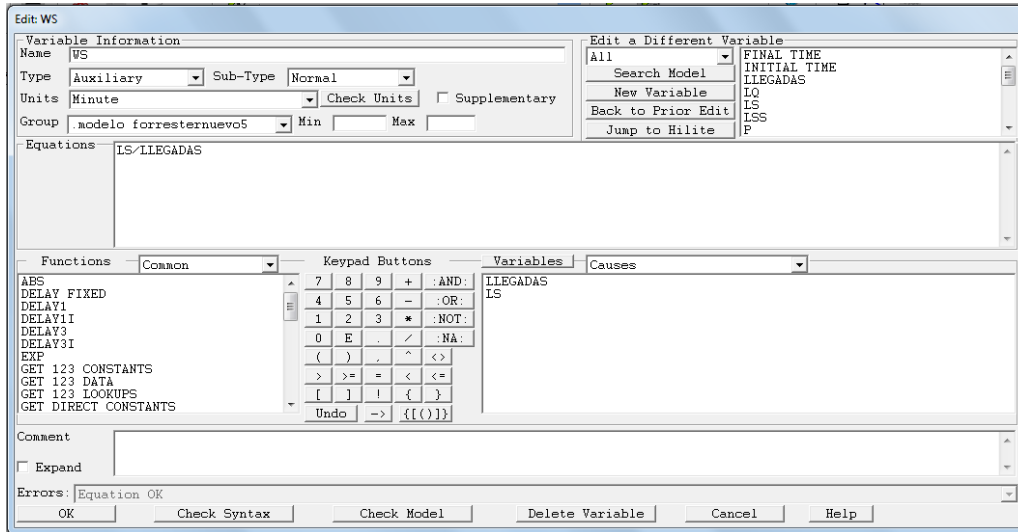


Figura 3.10 Definición de ecuaciones y unidades variable: WS.

Se definió la variable WS junto con la ecuación que representa su comportamiento: $LS/LLEGADAS$ (Número de elementos en el sistema/ Tasa de llegadas) esta ecuación se obtuvo de la ecuación 2.15, como esta variable es medida en una escala de tiempo las unidades asignadas fueron Minute.

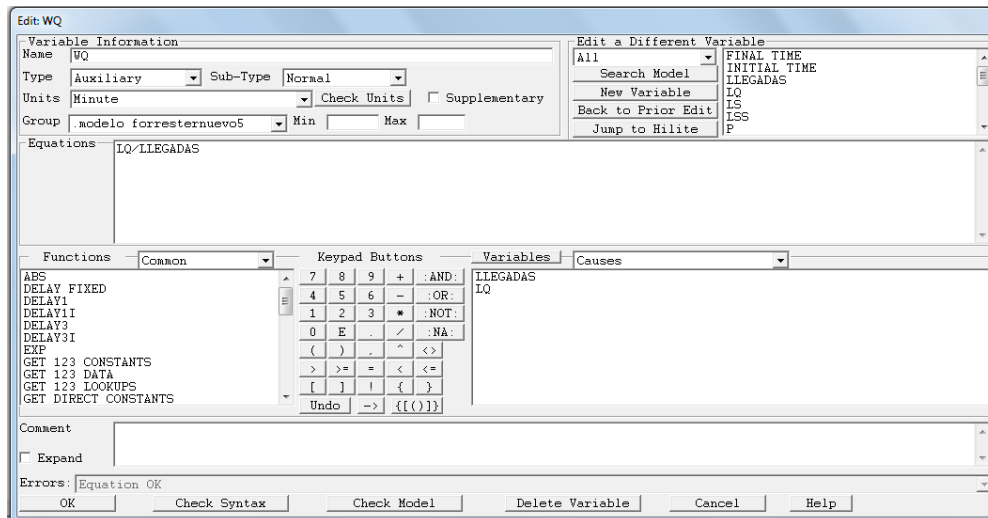


Figura 3.11 Definición de ecuaciones y unidades variable: WQ.

En la variable WQ tomó la siguiente ecuación: $LQ/LLEGADAS$ (Número de elementos en la cola / Tasa de llegadas) de acuerdo a la ecuación 3.2 donde se realizó un despeje. Unidad de medición: Minute que representa una escala de tiempo.

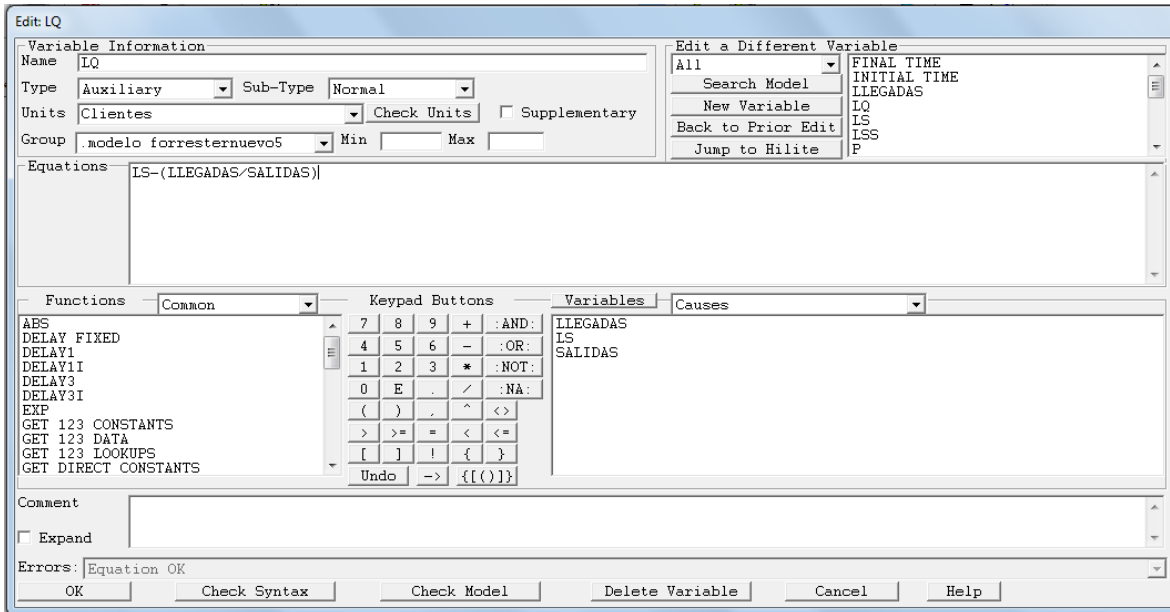


Figura 3.12 Definición de ecuaciones y unidades variable: WQ.

LQ simboliza el número de elementos o clientes en el sistema, por esta razón se utilizaron estas unidades. Su ecuación se denota por: $LS - (LLEGADAS/SALIDAS)$ QUE EQUIVALE El número de clientes en el sistema - (Tasa de salidas / Tasa de llegadas) Dicha ecuación se encuentra puntualizada en la ecuación 2.1.

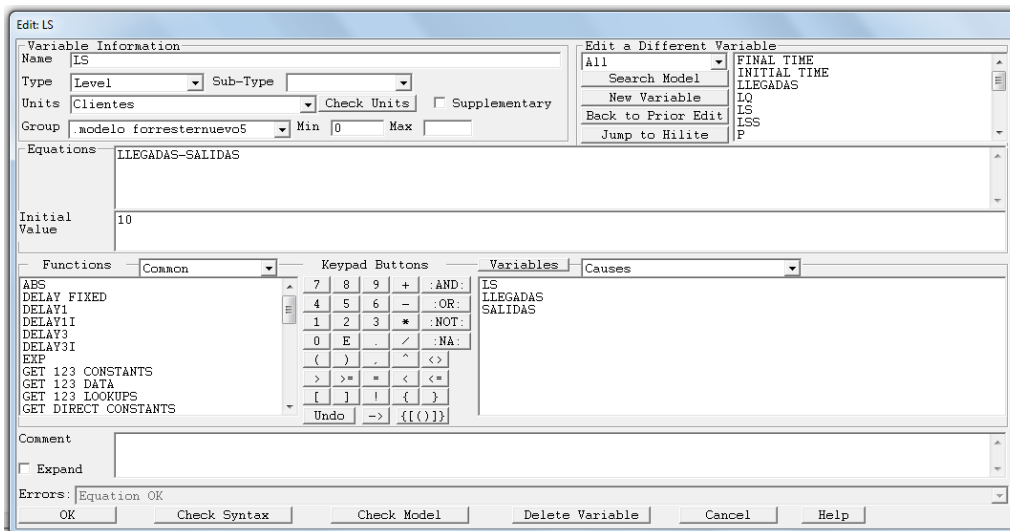


Figura 3.13 Definición de ecuaciones y unidades variable: LS.

LS toma las mismas unidades que LQ ambas variables describen como unidades a los Clientes. Su comportamiento se encuentra definido por ecuación 2.0.

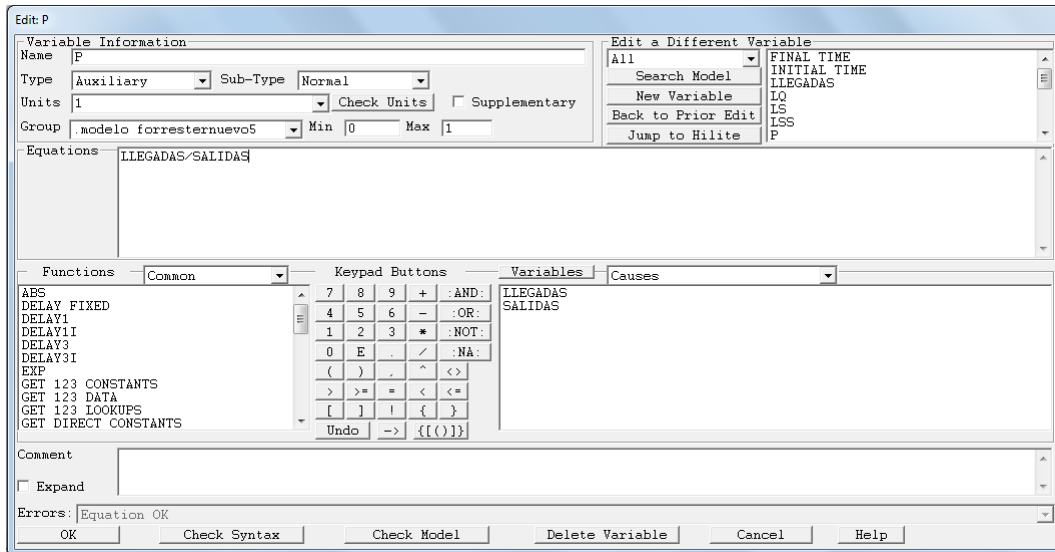


Figura 3.14 Definición de ecuaciones y unidades variable: P.

El factor de utilización del sistema figura el grado de ocupación de los servidores para este análisis buscamos que los estados posibles que no excedan la capacidad del servicio, por la motivo se está variable se encuentra delimitada para que no exceda el límite de capacidad permitido (0 a 1), las unidades de medición es 1 que representará un porcentaje debido a la diferencia de unidades descritas en las llegadas y en las salidas.

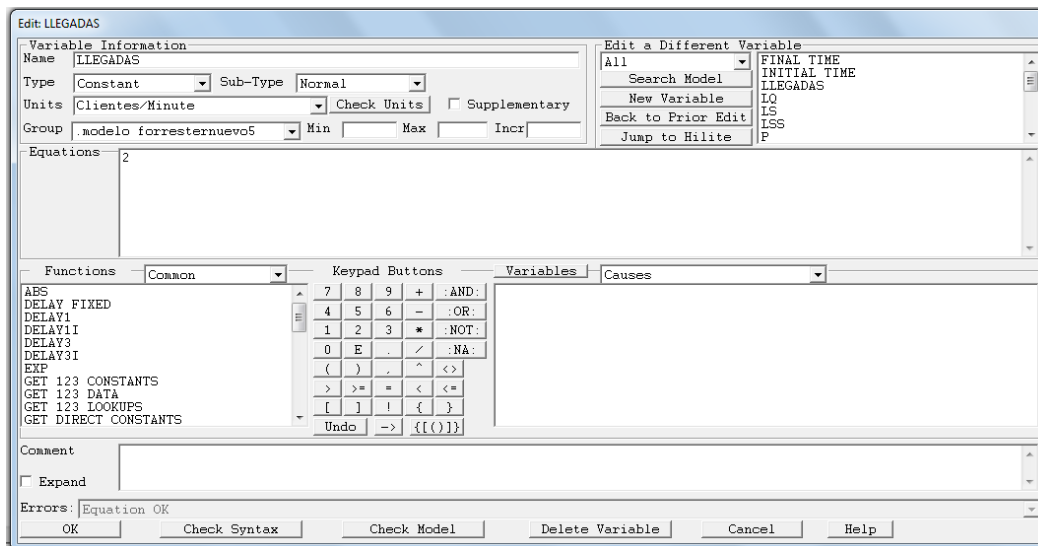


Figura 3.15 Definición de ecuaciones y unidades variable: LLEGADAS.

Las llegadas y las salidas del sistema reflejan el comportamiento de sistema basado en un proceso de nacimiento- muerte. Donde los nacimientos son figurados por las entradas y las salidas como un proceso de muerte. Estas variables son medidas regularmente sobre una unidad de tiempo que en este caso sería Clientes/ Minute. A la variable que representa las llegadas se le asignó un valor inicial para poder realizar la simulación de comportamiento directamente, al cargar los datos por primera vez, cabe aclarar que esta variable será dinámica ya que en el modelo de simulación podrá cambiar su valor de acuerdo al comportamiento del sistema.

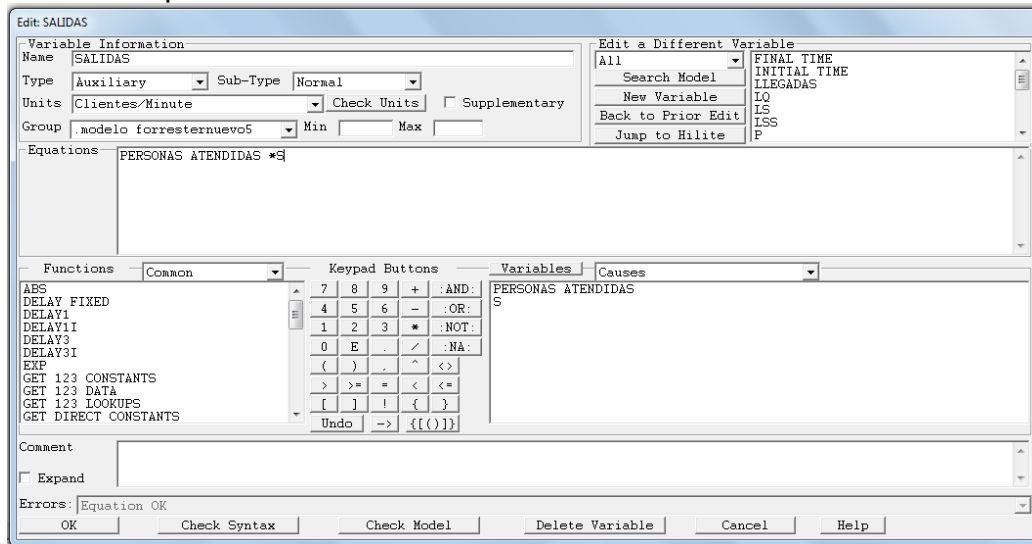


Figura 46 Definición de ecuaciones y unidades variable: SALIDAS.

En las salidas, se tomó como base las personas atendidas por servidor multiplicando las personas atendidas por el número de servidores atendidos.

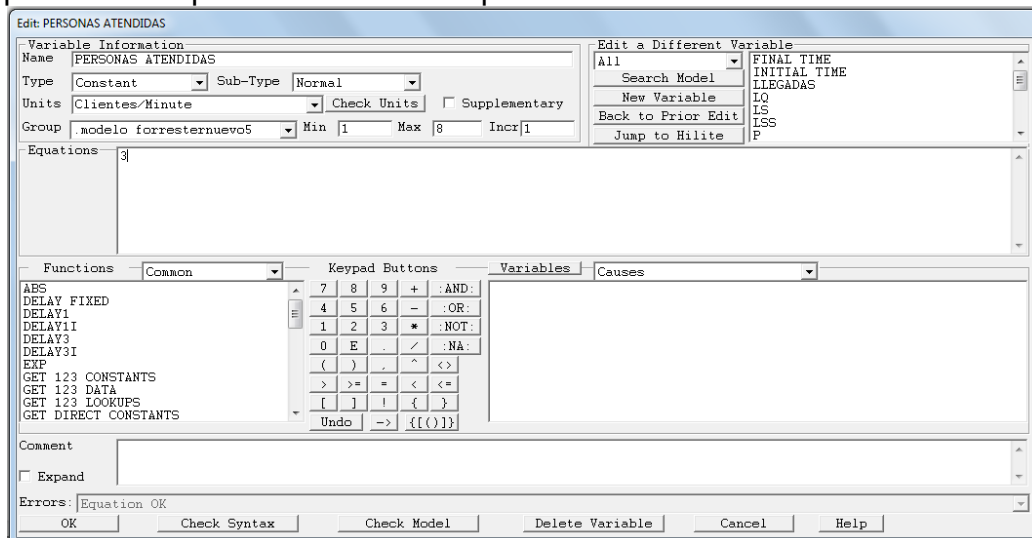


Figura 3.17 Definición de ecuaciones y unidades variable: PERSONAS ATENDIDAS.

En cuanto a las personas atendidas por un servidor, son medidas en una escala de clientes /Minute, dicha escala representa los clientes que son atendidos, por un servidor y en una unidad de tiempo, en este modelo se toman varias asunciones, entre ellas se encuentra la siguiente: “ La tasa de servicio es constante e independiente del tipo de tramite o servicio solicitado?. Por lo tanto esta variable es evaluada tomando en cuenta solo midiendo las salidas sin que influya el número o tamaño de los trámites.

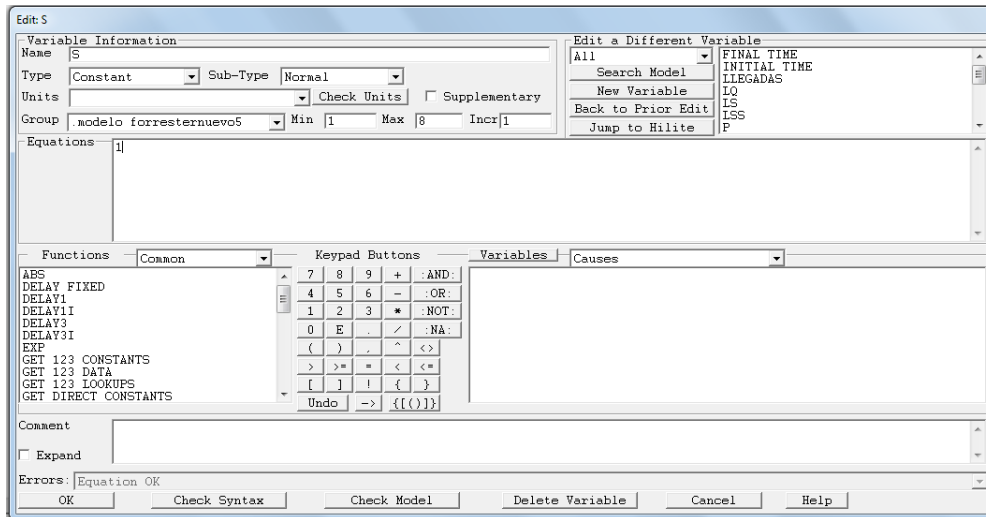


Figura 3.18 Definición de ecuaciones y unidades variable: N.

S es el número de servidores activos o en servicio y se encuentran contribuyendo en las salidas del sistema. En este caso la variable fue inicializada en uno pero en la simulación podrá tomar valores en una escala de 1-8 con incrementos en 1. Sería ilógico representar servidores con una escala decimal. En las unidades de medición se tomó como base el 1 al tratarse de servidores, de lo contrario introduciríamos un error en las unidades del sistema.

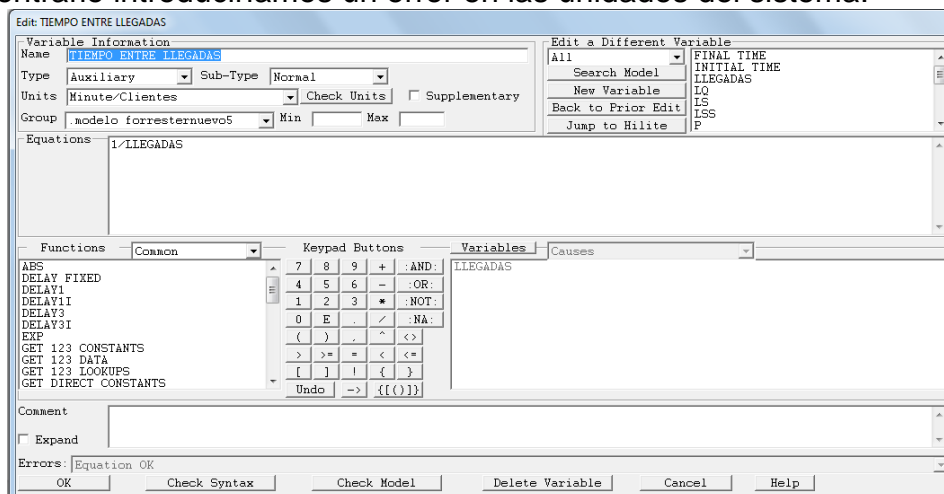


Figura 3.19 Definición de ecuaciones y unidades variable: SALIDAS.

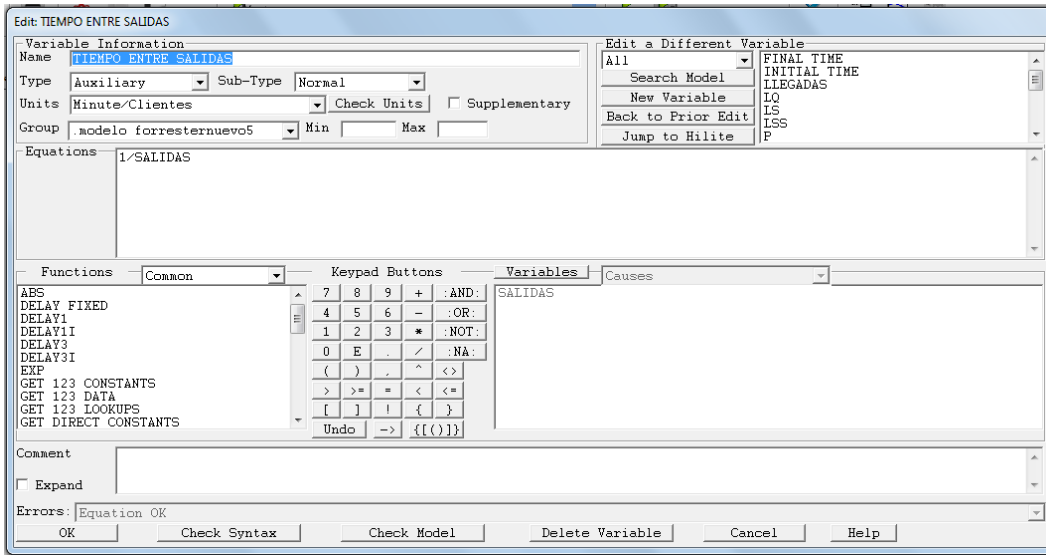


Figura 3.20 Definición de ecuaciones y unidades variable: TIEMPO ENTRE LLEGADAS.

Los tiempos entre llegadas y los tiempos entre salidas constituyen el tiempo que transcurre entre dos llegadas o salidas respectivamente. Se espera que el tiempo entre llegadas sea menor en la tasa de llegadas que en la tasa de servicio.

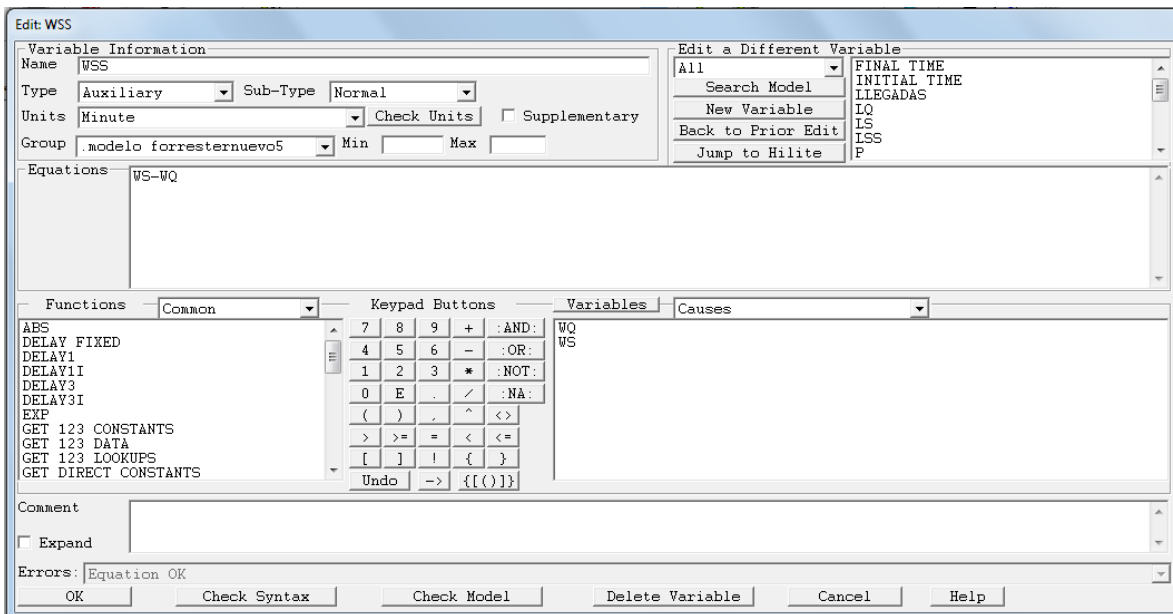


Figura 3.21. Definición de ecuaciones y unidades variable: TIEMPO ENTRE SALIDAS.

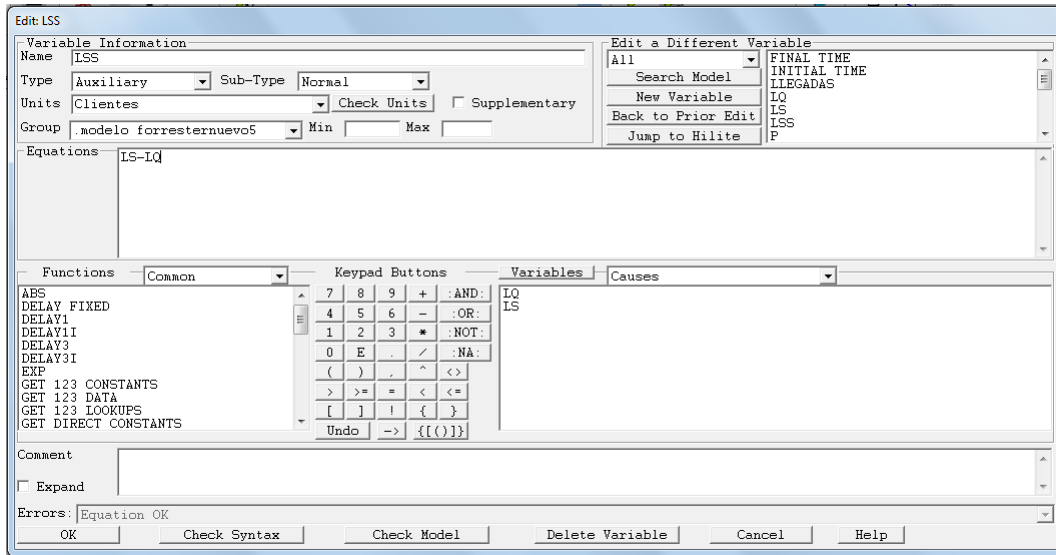


Figura 3.22 Definición de ecuaciones y unidades variable: WSS.

LSS Y WSS son el resultado de la diferencia entre LS y LQ, y WS y WQ respectivamente, ambas variables son apreciadas en una unidad de tiempo.

Una vez establecidas las ecuaciones y las unidades de medición pasamos a verificar que las unidades de medición estuvieran correctas para iniciar con las simulaciones del modelo.

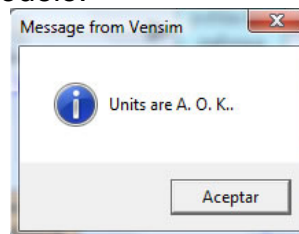


Figura 3.23 Verificación de las Unidades del Sistema.

Después de haber determinado las ecuaciones que formaran el sistema, y de haber identificado y validado sus respectivas unidades de medición se prosigue a verificar que el modelo de simulación no contenga ningún error y comenzar con la simulación del sistema.

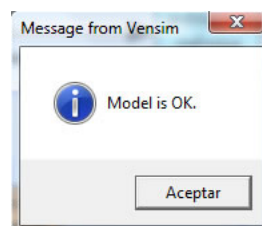


Figura 3.24 Verificación del Modelo.

3.1. Evaluación y validación.

Para el proceso de evaluación y validación del modelo se generaron 60 números pseudoaleatorios con una distribución de Poisson $\lambda = 2$.

El resultado de los números generados se muestra en el Anexo 1 Generación de 60 Números pseudoaleatorios con distribución de Poisson, los números expresados representan 60 momentos de evaluación del sistema con arribos dentro de una escala de 0 (mínimo) y 6 (máximo).

Máximo	6
Mínimo	0
Media	1.69
Desviación estándar	1.44

Figura 3.25 Resultados de la generación de Números pseudoaleatorios.

Las entradas del modelo serán representados por la media que es de 1.69 que equivale a 2 para efectos prácticos de este modelo. Los resultados de la tabla anterior reflejan el comportamiento de la gráfica 3.2. Donde se refleja la probabilidad de ocurrencia en la frecuencia de llegadas. La mayor probabilidad de ocurrencia se encuentra en la media y disminuyen conforme se alejan los valores a la izquierda o a la derecha.

% probabiidad de llegadas Numeros Generados Distribucion de Poisson

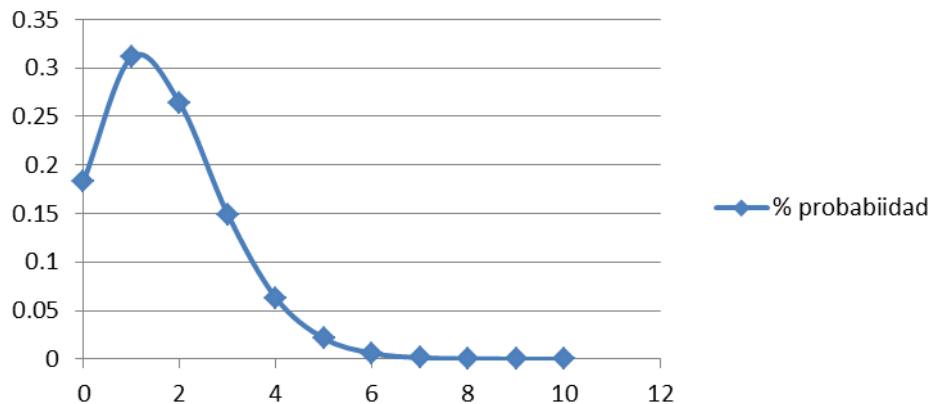


Gráfico 3.2 Probabilidad de llegadas Números pseudo-aleatorios.

Para efectos de simulación para las salidas, no se generaron números aleatorios, ya que en este modelo se asume que la tasa de servicio es constante y que aumenta conforme aumenta el número de servidores.

Comportamiento de la Tasa de servicio en Funcion de los servidores

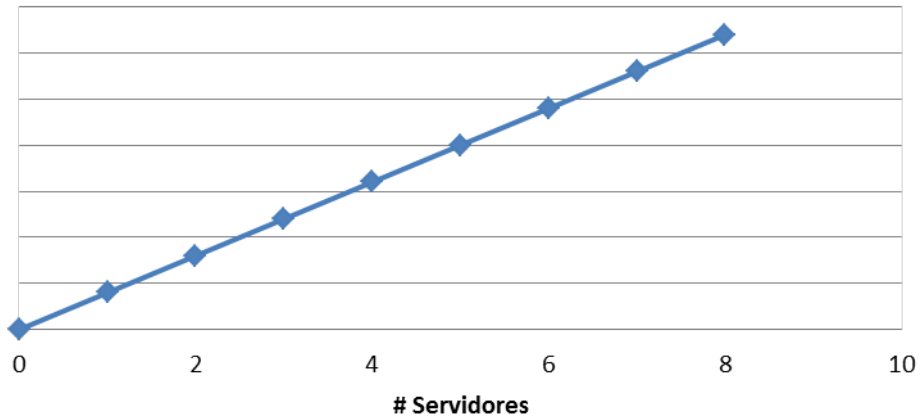


Grafico 3.3 Probabilidad de Llegadas Números pseudo-aleatorios.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación del modelo nos permite encontrar diversos escenarios y validar el comportamiento del sistema.

Se realizaron 3 simulaciones con escenarios distintos:

Simulación 1

La primer simulación se realizó considerando las siguientes entradas:

- Tasa de llegadas: 2 Clientes / Minute.
- Personas atendidas: 3 personas atendidas por Minute.
- Número de Servidores: 1 servidor.
- Tasa de servicio 3 Clientes/Minute

Ante este escenario conocemos que la cantidad de clientes en el sistema irá en descenso hasta convertirse en cero, y solo tomaremos los valores positivos. Cuando la tasa de servicio es mayor que la tasa de llegadas, el número de clientes va disminuyendo en función del tiempo. Las principales variables que nos interesan en esta simulación son: El número de Clientes en el sistema, Tiempo de espera en el Sistema y el Factor de Utilización del sistema.

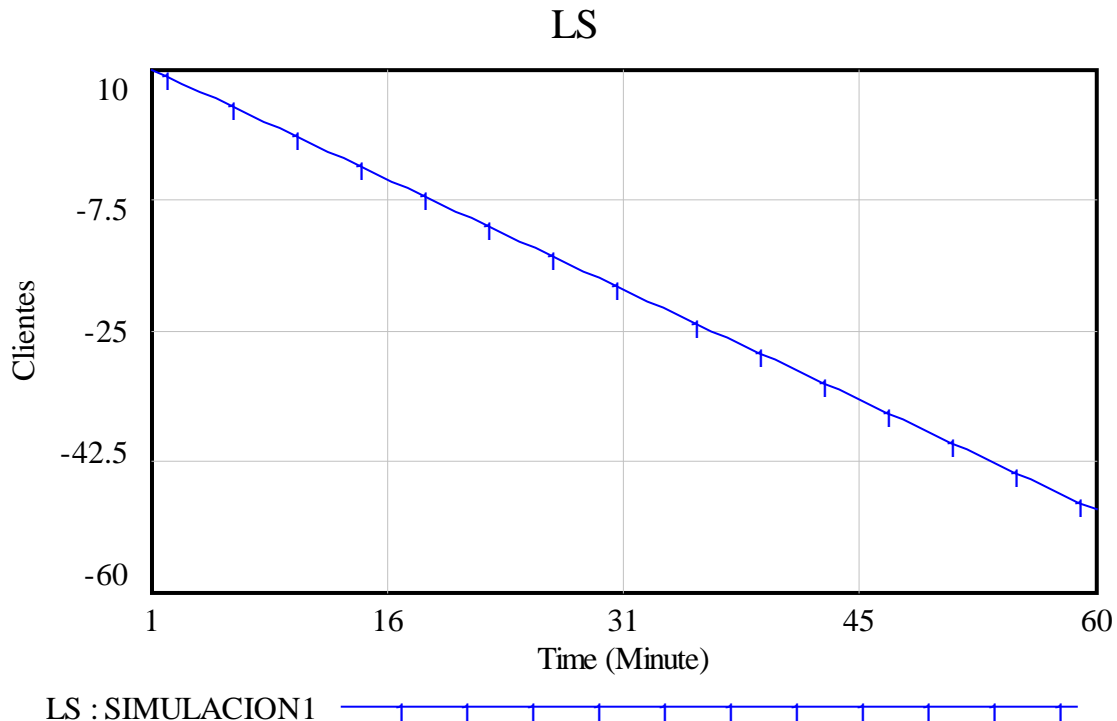
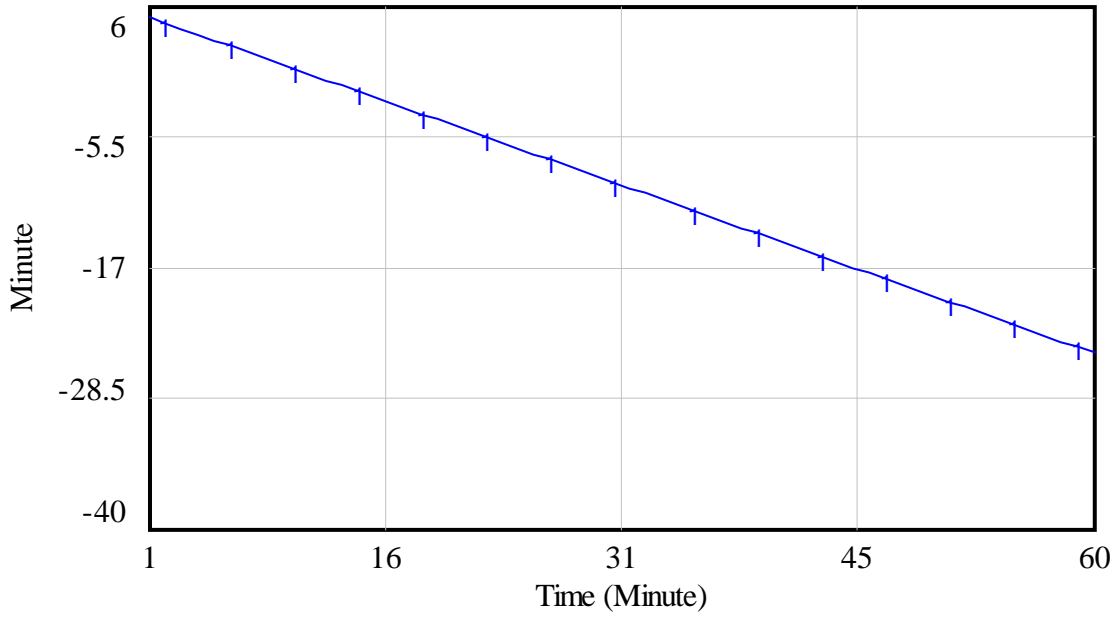


Grafico 4.1 SIMULACION 1 VARIABLE:LS.

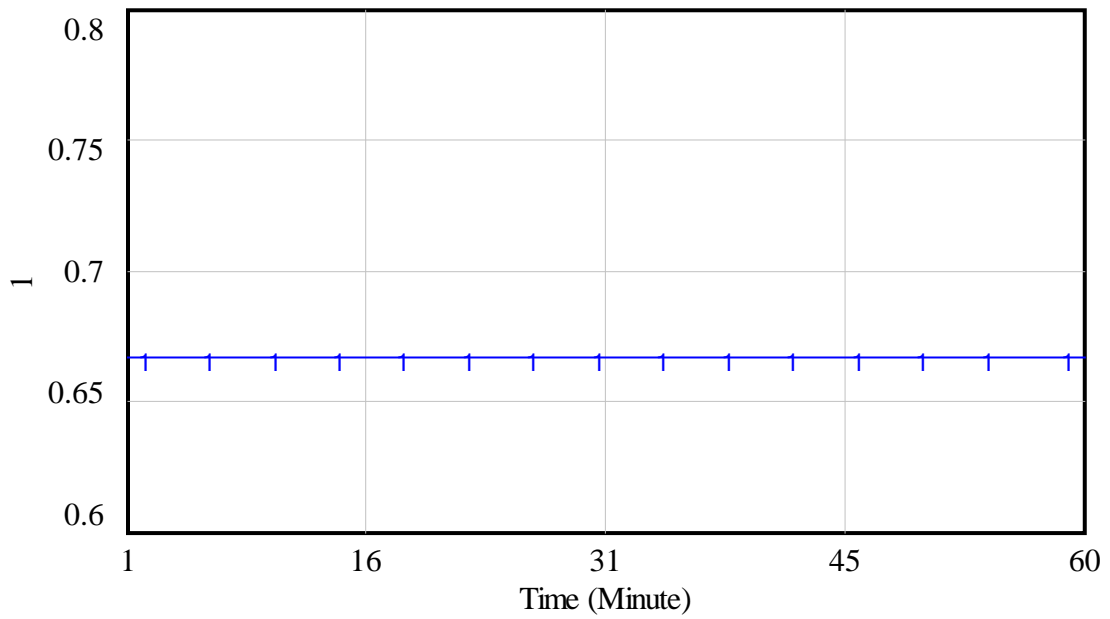
WS



WS : SIMULACION1

Grafico 4.2. SIMULACION 1 VARIABLE:LS.

P



P : SIMULACION1

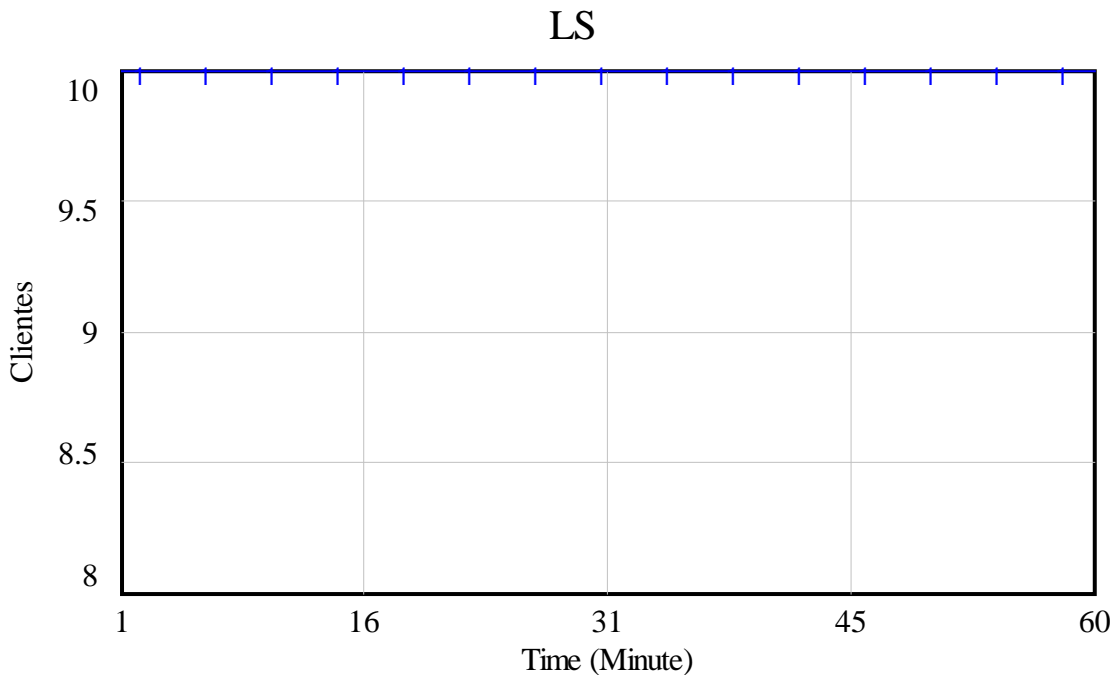
Grafico 4.3 SIMULACION 1 VARIABLE:P

Simulación 2

La segunda simulación se realizó considerando las sucesivas entradas:

- Tasa de llegadas: 2 Clientes / Minute.
- Personas atendidas: 1 persona atendida por Minute.
- Número de Servidores: 2 servidores.
- Tasa de servicio 2 Clientes/Minute.

En esta situación la tasa de servicio es igual a la tasa de llegadas por lo tanto el sistema se encuentra en equilibrio y la cantidad de personas en el sistema y en la cola no sufre ninguna alteración. Pasa algo similar con el tiempo y el factor de utilización del sistema



LS : SIMULACION2

Grafico 4.4 SIMULACION 2 VARIABLE:LS.

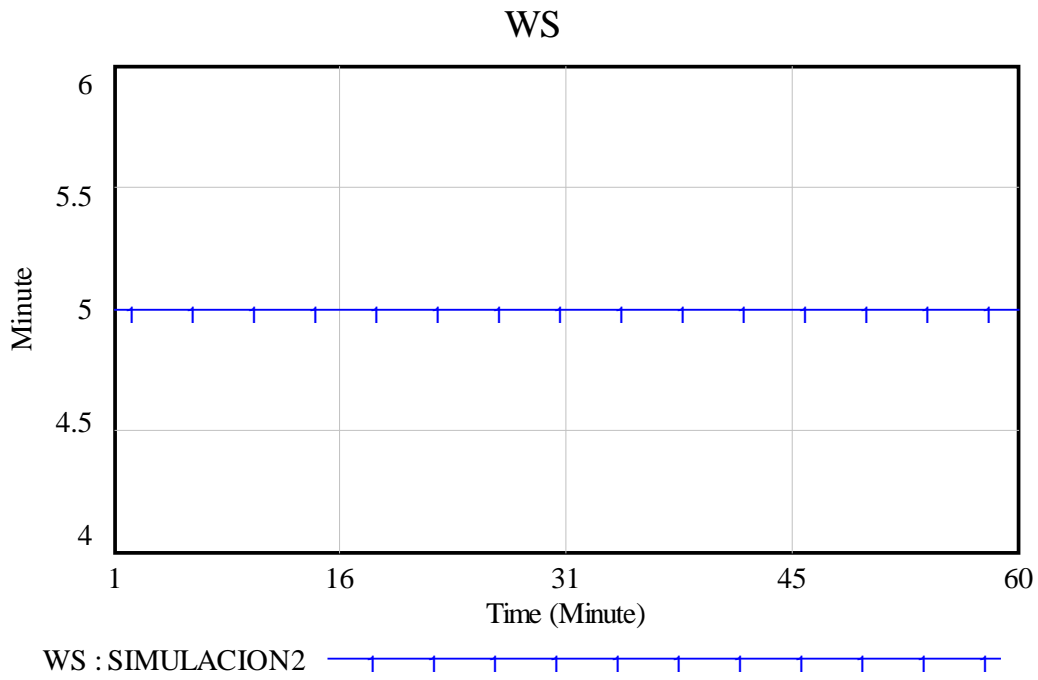


Grafico 4.5 SIMULACION 2 VARIABLE:WS.

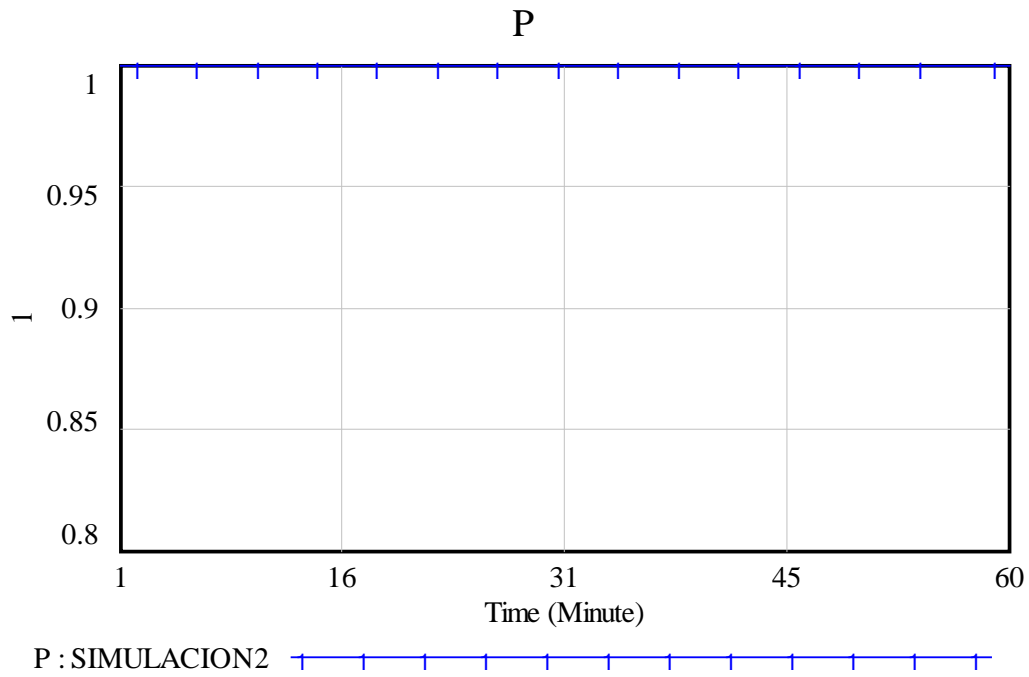


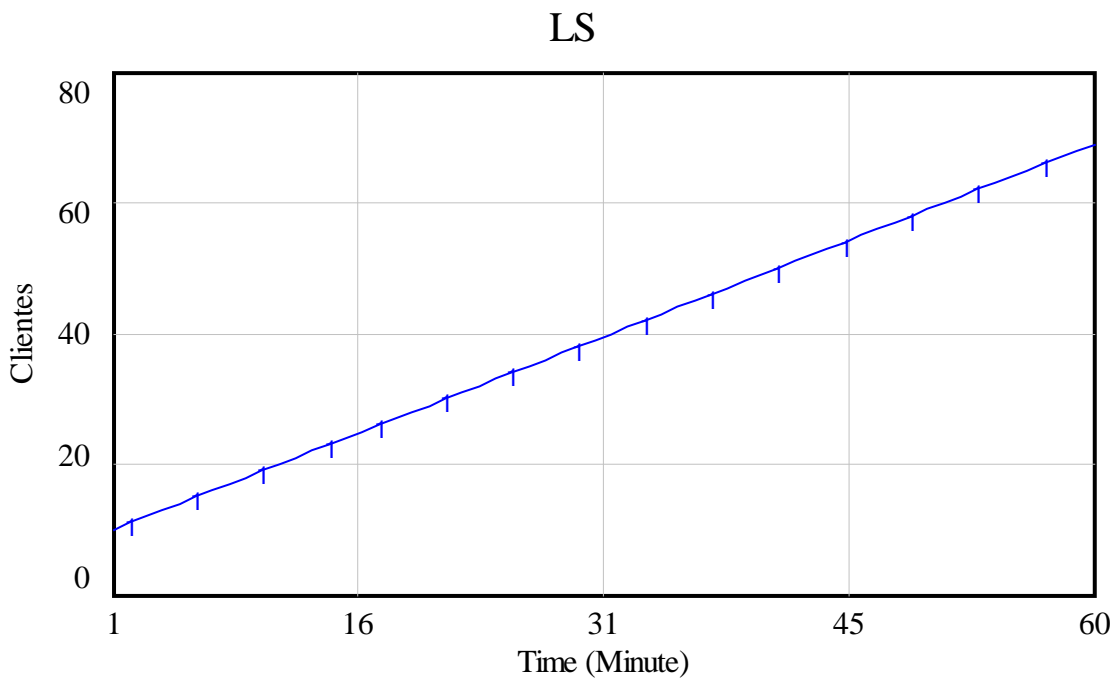
Grafico 4.6 SIMULACION 2 VARIABLE:P .

Simulación 3

En la tercer simulación se superó la capacidad del servidor al introducir una tasa de servicio menor a la tasa de llegadas.

- Tasa de llegadas: 2 Clientes / Minute.
- Personas atendidas: 1 persona atendida por Minute.
- Número de Servidores: 1 servidor.
- Tasa de servicio 1 Clientes/Minute.

Esta situación provoca que el número de clientes y el tiempo de espera en el sistema se incrementen en el tiempo, mientras que el factor de utilización del sistema se duplica de acuerdo al incremento de la tasa de llegadas en función de la tasa de servicio.



LS : SIMULACION3

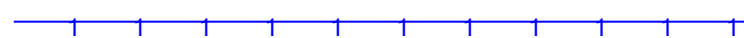
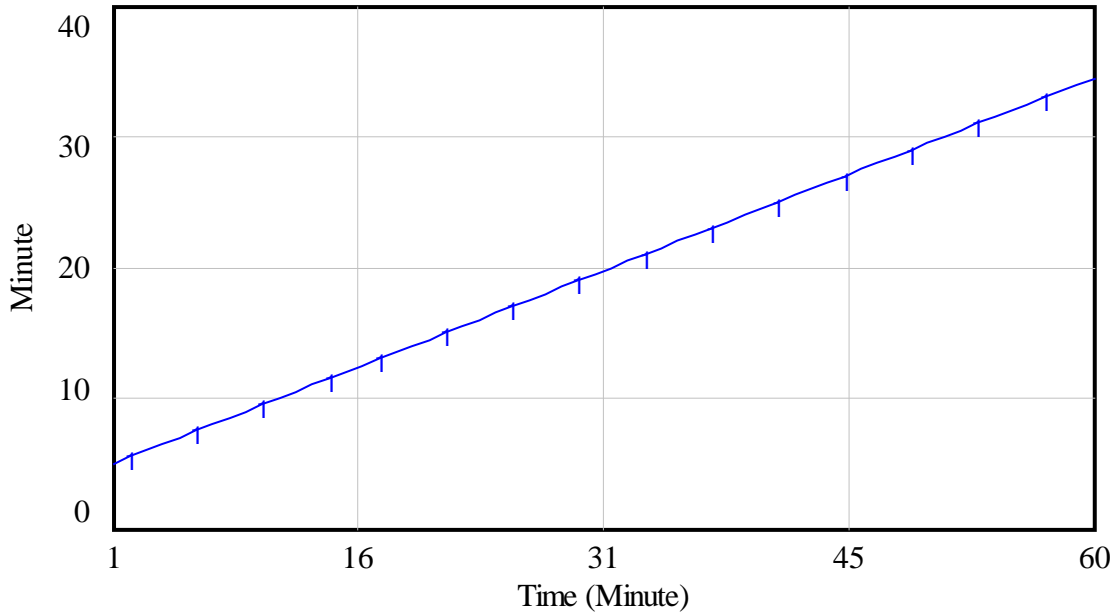


Grafico 2.7 SIMULACION 3 VARIABLE:LS.

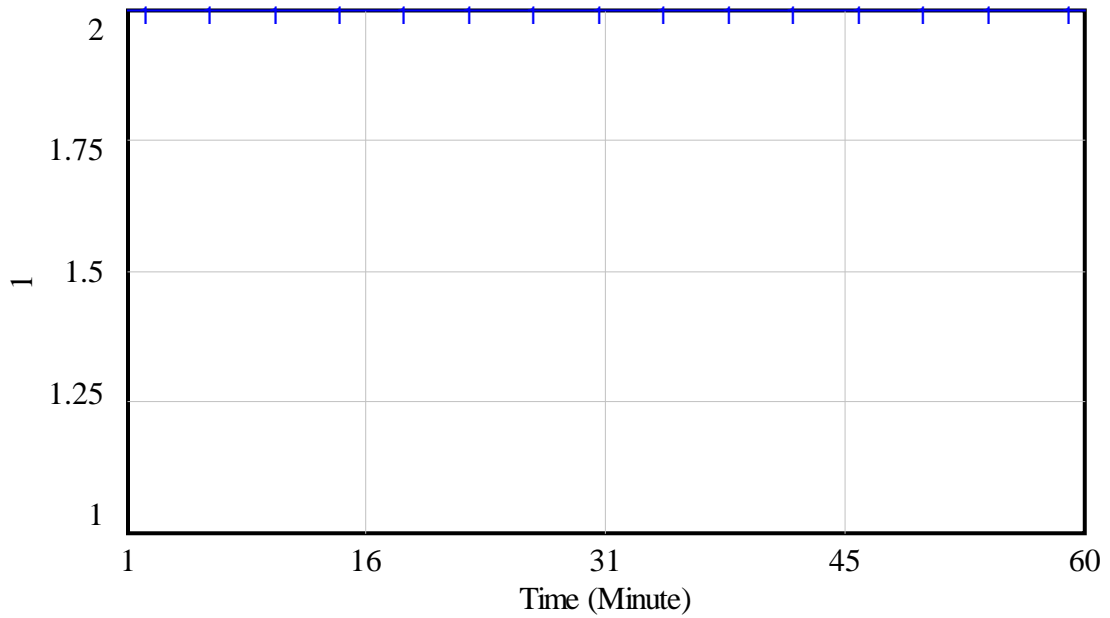
WS



WS : SIMULACION3

Grafico 2.8 SIMULACION 3 VARIABLE:WS.

P



P : SIMULACION3

Grafico 2.9 SIMULACION 3 VARIABLE:P.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones en un solo grafico por variable analizada, con el objetivo de describir gráficamente como afectaron los cambios ante los valores de entrada de cada simulación.

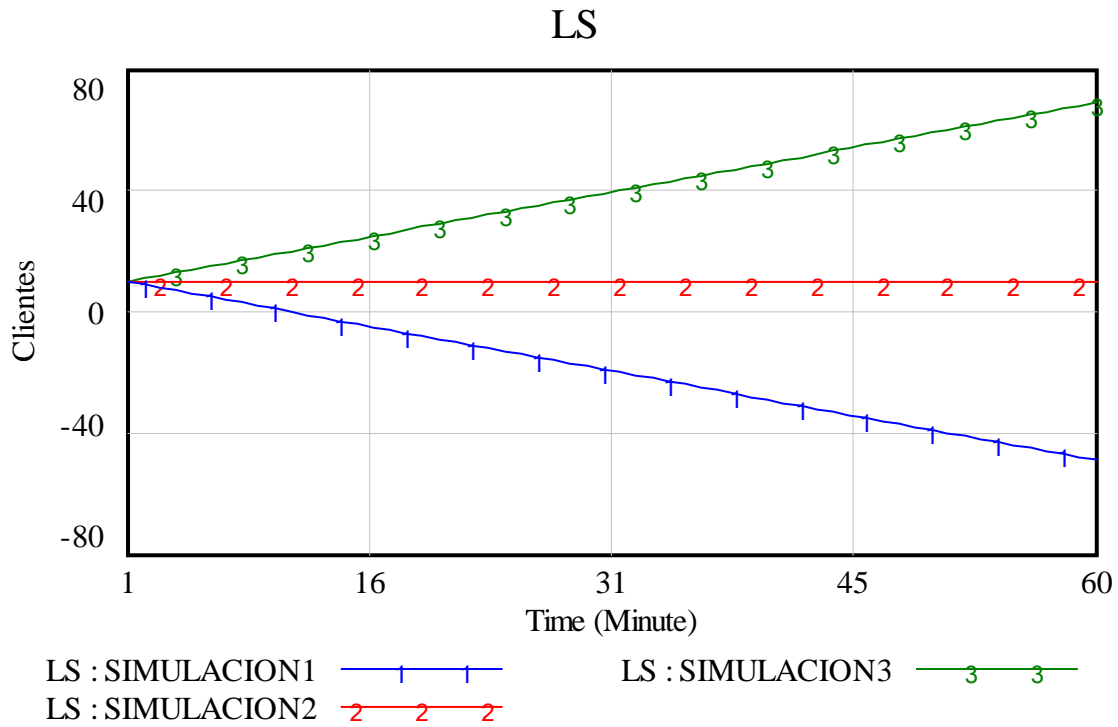


Grafico 2.10 *Análisis Simulación 1,2 y 3 variable LS .*

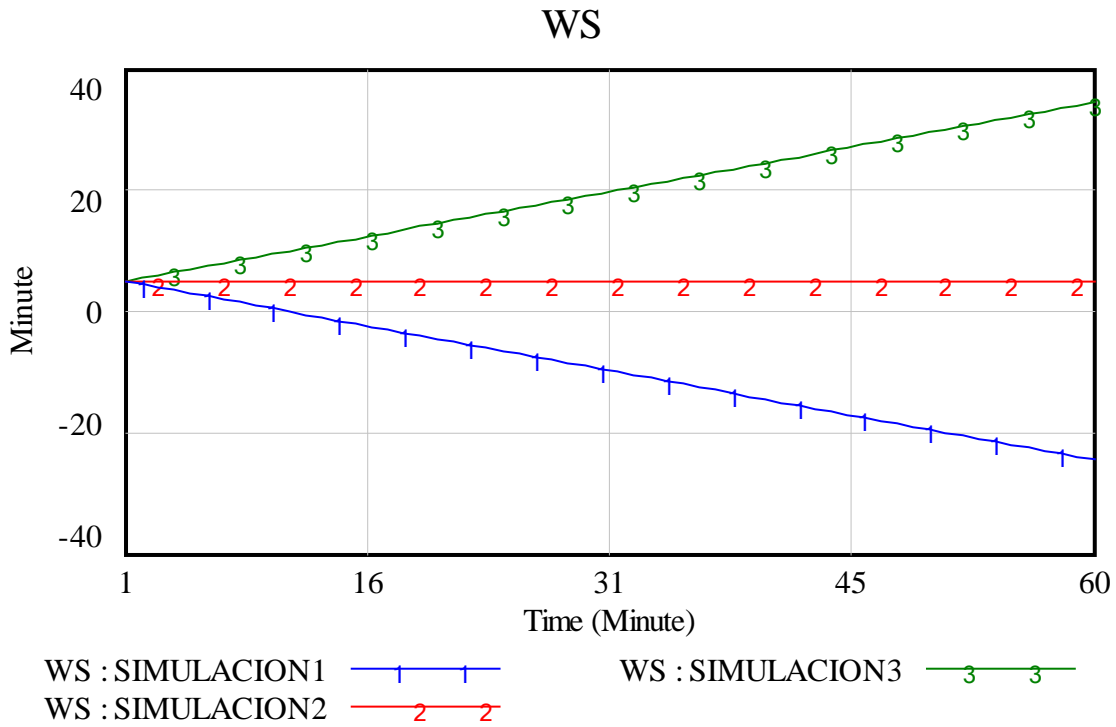


Grafico 11 Análisis Simulación 1,2 y 3 variable WS .

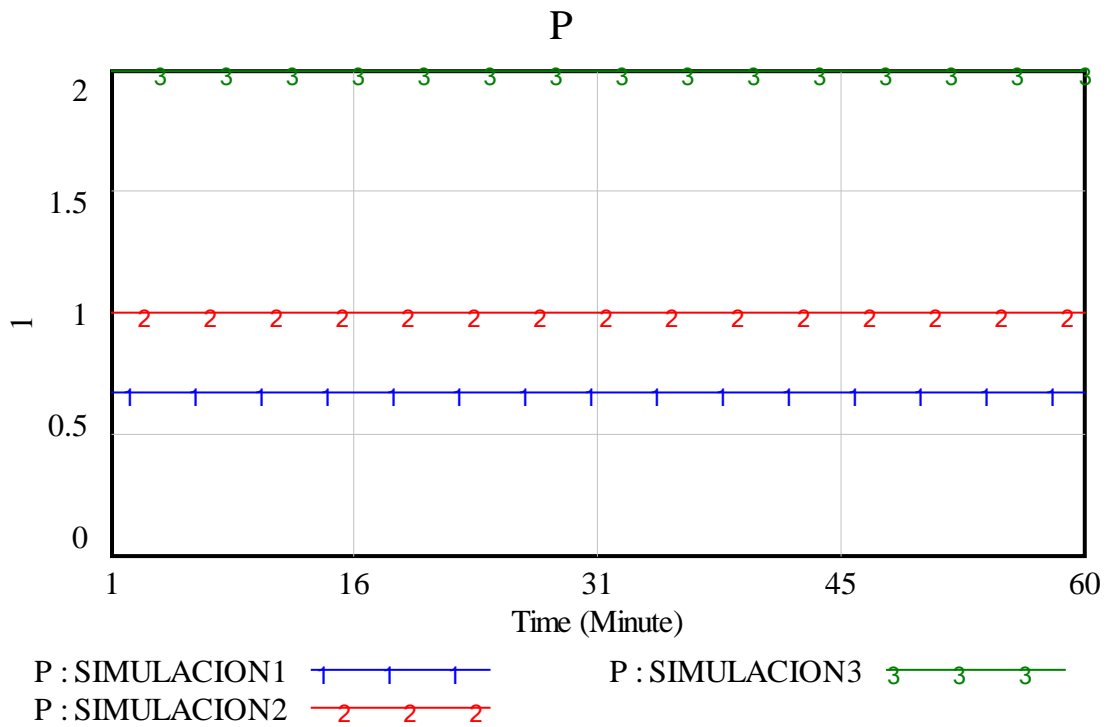


Grafico 12 Análisis Simulación 1,2 y 3 variables LS .

V. CONCLUSIONES, IMPLICACIONES Y TRABAJO A FUTURO

El centro de atención de las empresas, debe ser su información, ya que a través de ella se toman decisiones que repercuten en el rumbo de la misma. El obtener información correcta precisa y oportuna a través de herramientas, procesos y metodologías de análisis, permite tomar decisiones correctas que reflejan en la competitiva de las empresas.

La aportación del presente trabajo radica en una propuesta que permite dar una respuesta adecuada, en los casos donde se presentan filas dinámicas que pueden entorpecer el flujo de productos o servicios que la organización ofrece a sus clientes, así mismo se detectó una gran aplicación en los procesos internos, al permitir un análisis de los procesos que generan colas en el ámbito funcional de la misma organización, es decir las relaciones que existen entre las diversas áreas o departamentos de la empresa, también pueden ser tratados con la modelación dinámica.

El análisis y explotación de la información con un enfoque sistémico, permite encontrar pautas de comportamiento a través del tiempo, de las variables que conforman un sistema y anticiparse a situaciones problemáticas futuras.

El análisis dinámico de sistemas resulta muy práctico para solucionar problemas complejos, permitiendo analizar los sistemas desde sus orígenes. Este tipo de análisis tiene un amplio ámbito de aplicación, es muy común utilizarlo para simular problemas sociales, poblacionales y macro económicos. Sistemas que resultarían difíciles de simular y comprender a través sistemas estáticos.

Para el análisis de las líneas de espera se requiere de un análisis de información continuo en el tiempo y no sólo en un momento puntual. Aunque el análisis estático, puede aportar valor, es incomparable con lo que nos puede aportar en un proceso continuo, en el que podemos observar tendencias, cambios y variabilidades que incluye la comunicación de los descubrimientos y efectuar los cambios necesarios.

Al analizar los diferentes modelos de la teoría de colas y a través de un proceso de abstracción se obtuvieron las variables del sistema que representan en lo general a los sistemas de líneas de espera y no solo a un sistema en específico. Incluyendo las ecuaciones, restricciones, asunciones y representación de sus elementos.

La dinámica de sistemas permite descubrir tendencias, patrones y comportamiento de los sistemas al evaluar las variables a través del tiempo y encontrar posibles relaciones que regularmente no se pueden encontrar a través del análisis estático.

Con la construcción del mapa conceptual, fueron representados los elementos que conforman el sistema, el mapa conceptual fue la base para la construcción del diagrama causal para identificar las relaciones, influencias y bucles de realimentación.

Del diagrama de influencias se obtuvo el diagrama de Forrester, este diagrama permite la interpretación del lenguaje humano a lenguaje máquina a través de ecuaciones que describen el comportamiento de los objetos en el mundo real.

En su conjunto las técnicas de modelación dinámica de sistemas: mapas conceptuales, diagramas causales, diagramas de influencia y diagramas de Forrester contribuyen en la construcción de modelos dinámico aplicados a representar la teoría de colas, a través de herramientas de modelado.

Con el modelo dinámico podemos realizar la simulación de numerosos escenarios, sin la necesidad de poner en riesgo la estabilidad operativa y económica de una empresa al representar escenarios normales y extremos de operación.

En el presente proyecto de investigación se construyó un modelo dinámico que permite evaluar el desempeño de un sistema a través de la teoría de colas, este modelo fue construido, evaluado y simulado, el cual fue concluido con éxito. Sin embargo sería interesante enlazar el modelo con bases de datos de tal manera que los datos de entrada del modelo se cargaran automáticamente y se alimentaran mediante bases de datos. Las bases de datos recolectarían información del comportamiento real del sistema en cualquier momento, a través de sensores.

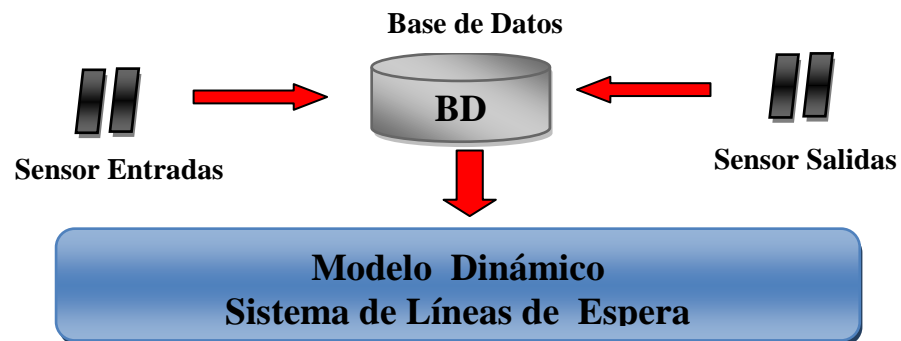


Figura 5.1 *Trabajos futuros*

En la figura 5.1 se representa gráficamente el trabajo futuro, cabe señalar que regularmente las empresas en las instalaciones donde se brinda el servicio se cuenta solo con un acceso, por lo tanto se podría utilizar un solo sensor que diferenciara los eventos en: entradas y salidas. Para los trabajos futuros se prevé la construcción de una aplicación que permita visualizar con más facilidad los elementos y los parámetros de entrada del sistema.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Hillier, Frederick S., 2006. Introducción a la investigación de operaciones, México: McGraw-Hill.

Krajewski, Lee J., 2000. Administración de operaciones estrategia y análisis, México: Prentice Hall : Pearson Educación.

TAHA, HAMDY A., 2004. Investigación de operaciones, México: Prentice Hall.

Wiston, Wayne L. , 2005. Investigación de operaciones, Aplicaciones y Algoritmos, México: Thomson, 4ª. Edición.

Aracil, Javier, Gordillo, Francisco, 2005., Dinámica de sistemas, Madrid: Alianza Editorial, 1ª. Edición.

Lahoz-Beltrá, Rafael, 2004. Bioinformática: simulación, vida artificial e inteligencia artificial, Madrid: Díaz de Santos, 1ª. Edición.

García, Juan Martín, 2003. Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas, Madrid: Editorial Díaz de Santos, 3ª Edición.

Gupta, Varun, June 2011. Tight moments-based bounds for queueing systems, Published in Newsletter ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review – Performance.

Gopal, Sekar, Ayyappan, Govindan , Agosto 2011. Stability analysis of single server retrial queueing system with Erlang service, Published in Newsletter ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review – Performance.

Fonseca, Pau , July 2010. Using specification and description language to define and implement discrete simulation models, Publisher: Society for Computer Simulation International.

Wackerly, Dennis, Willian Mondenhall , 2010., Estadística matemática con aplicaciones, México: CENGAGE Learning , 7ª Edición

FORD ANDREW , 2009. Modeling the environment, US, 2ª. Edición.

James A. Senn, 2004. Sistemas de información para la administración. Grupo Editorial Iberoamérica.

Javier Tuya, Isabel Ramos Román, Javier Dolado Cosín, Técnicas cuantitativas para la gestión en la ingeniería del software Netbiblo, 2007

Coss Bu Raul, 2003. Simulación un Enfoque Práctico, México, Editorial Limusa.

VII. ANEXOS

Anexo 1 Generación de Números Pseudoaleatorios.

A continuación se describe la metodología utilizada para generar números Pseudoaleatorios en Microsoft Excel siguiendo una distribución De Poisson.

- Abrimos Microsoft Excel 2010.
- Abrimos la pestaña de Datos, vamos a la pestaña de análisis de datos. Si esta pantalla no aparece tendremos que habilitarla en Archivo-> Opciones-> Complementos -> Seleccionando la opción de complementos de Excel dar clic en ir. A continuación aparecerán las opciones que se encuentran habilitadas, habilitar las herramientas de análisis.
- Selecciona la opción de generar números aleatorios.

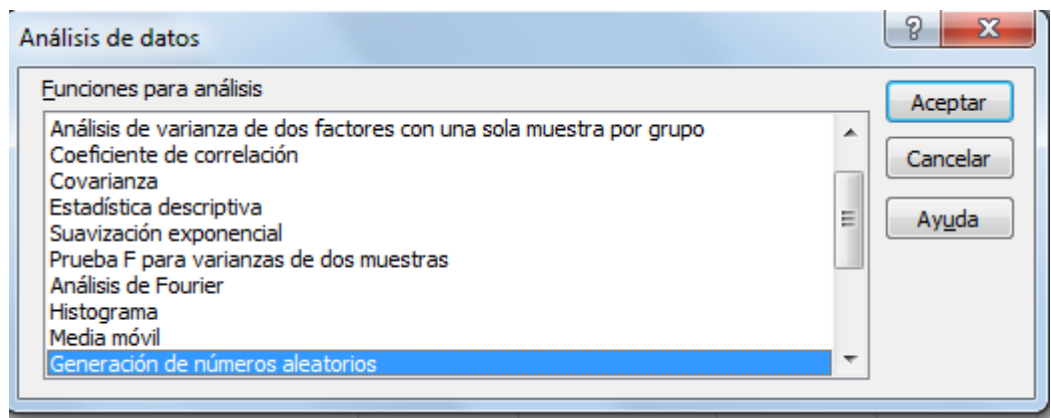


Figura 7.1 *Análisis de Datos*

- Aparecerá la siguiente pantalla en la que seleccionaremos el tipo de distribución que tendrán nuestros números aleatorios.

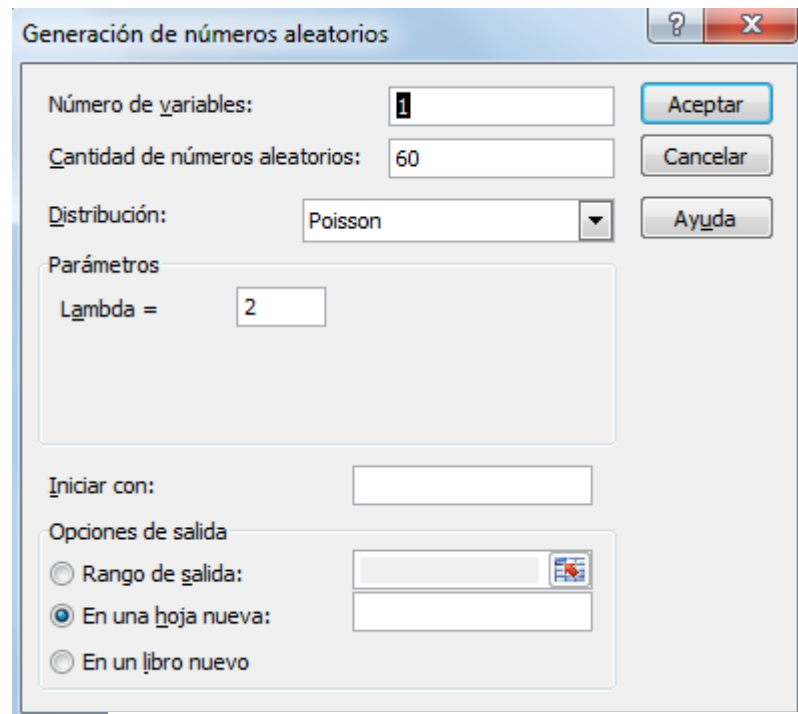


Figura 7.2 Configuración de números pseudo-aleatorios.

- Insertar en el campo “Numero de variables” las variables que necesitamos para la simulación, ente caso fue de 1.
- Después la cantidad de números aleatorios que serán generados. Para nuestro análisis seleccionamos 60.
- A continuación elegimos el tipo de distribución que tendrán los Números.
- Seleccionamos el valor de lamda que es la media de la distribución.
- Optamos por determinar el lugar en donde se mostrarán los números generados.

Los resultados de la simulación se muestran a continuación:

Tiempo	Llegadas Frecuencia
1	1
2	5
3	1
4	1
5	0
6	2
7	2
8	6
9	4
10	1
11	1
12	1
13	3
14	2
15	1
16	0
17	3
18	2
19	0
20	0
21	0
22	2
23	2
24	4
25	3
26	2
27	1
28	1
29	1
30	2
31	1
32	0
33	0
34	2
35	3
36	1
37	2
38	3
39	1
40	2
41	5
42	4
43	2
44	0
45	4
46	0
47	3
48	1
49	0
50	3
51	1
52	2
53	1
54	0
55	1
56	2
57	0
58	2
59	0
60	3
Max	6
min	0
AVG	<u>1.71666667</u>
DEV	1.439063569
ESTANDAR	

Tabla 7.1 *Números Pseudo-Aleatorios generados.*

Se realizó un análisis de los números generados y se obtuvo la probabilidad de ocurrencia con una distribución de Poisson con la siguiente fórmula:

$$=POISSON.DIST(\text{Numero}, \text{RangodeBusqueda}, n \text{ Acumulado})$$

Frecuencia	% probabilidad
0	0.17966403
1	0.30842325
2	0.26472996
3	0.15148437
4	0.06501204
5	0.0223208
6	0.00638623
7	0.00156615
8	0.00033607
9	6.4102E-05
10	1.1004E-05
11	1.7173E-06
12	2.4567E-07
13	3.2441E-08
14	3.9779E-09
15	4.5525E-10
16	4.8845E-11
17	4.9324E-12
18	4.704E-13
19	4.2501E-14
20	3.648E-15
21	2.9821E-16
22	2.3269E-17
Suma	0.82033593

Tabla 7.2 Probabilidad de ocurrencia Números Generados

Se graficaron los resultados del cálculo de probabilidades y se obtuvo el consecuente gráfico que muestra el % de probabilidad de ocurrencia de cada número en una escala de 0 a 10.

% probabiidad de Llegadas Numeros Generados Distribucion de Poisson

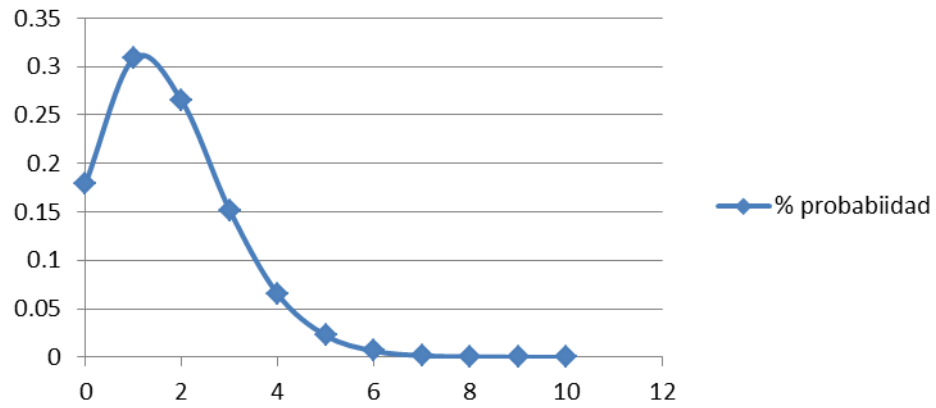


Grafico 7.1 *Grafico de distribución de probabilidad.*

Anexo 2 Código del modelo

```
{UTF-8}
SALIDAS=
  PERSONAS ATENDIDAS *S
  ~      Clientes/Minute
  ~      |

PERSONAS ATENDIDAS=
  3
  ~      Clientes/Minute [1,8,1]
  ~      |

LLEGADAS=
  2
  ~      Clientes/Minute
  ~      |

LQ=
  LS-(LLEGADAS/SALIDAS)
  ~      Clientes
  ~      |

LS= INTEG (
  LLEGADAS-SALIDAS,
  10)
  ~      Clientes [0,?]
  ~      |

LSS=
  LS-LQ
  ~      Clientes
  ~      |

P=
  LLEGADAS/SALIDAS
  ~      1 [0,1]
  ~      |

S=
  1
  ~      1 [1,8,1]
  ~      |

TIEMPO ENTRE LLEGADAS=
  1/LLEGADAS
  ~      Minute/Clientes
  ~      |

TIEMPO ENTRE SALIDAS=
  1/SALIDAS
  ~      Minute/Clientes
  ~      |

WQ=
  LQ/LLEGADAS
  ~      Minute
  ~      |

WS=
  LS/LLEGADAS
  ~      Minute
  ~      |

WSS=
  WS-WQ
  ~      Minute
```

```

~          |
*****
.Control
*****_
Simulation Control Parameters
|
FINAL TIME = 60
~         Minute
~         The final time for the simulation.
|
INITIAL TIME = 1
~         Minute
~         The initial time for the simulation.
|
SAVEPER =
TIME STEP
~         Minute [0,?]
~         The frequency with which output is stored.
|
TIME STEP = 1
~         Minute [0,?]
~         The time step for the simulation.
|

```

```

\\--// Sketch information - do not modify anything except names
V300 Do not put anything below this section - it will be ignored
*View 1
$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1--1-1|-1--1-1|96,96,90,0
10,1,LS,502,171,40,20,3,3,0,0,0,0,0,0
12,2,48,251,179,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0
1,3,5,1,4,0,0,22,0,0,0,-1--1--1,,1|(414,179)|
1,4,5,2,100,0,0,22,0,0,0,-1--1--1,,1|(308,179)|
11,5,48,361,179,6,8,34,3,0,0,1,0,0,0
10,6,LLEGADAS,361,198,42,11,40,3,0,0,-1,0,0,0
12,7,48,803,192,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0
1,8,10,1,4,0,0,22,0,0,0,-1--1--1,,1|(601,187)|
1,9,10,7,100,0,0,22,0,0,0,-1--1--1,,1|(733,187)|
11,10,48,667,187,6,8,34,3,0,0,1,0,0,0
10,11,SALIDAS,667,206,35,11,40,3,0,0,-1,0,0,0
10,12,TIEMPO ENTRE LLEGADAS,169,270,59,19,8,3,0,0,0,0,0,0
1,13,6,12,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(228,214)|
10,14,TIEMPO ENTRE SALIDAS,831,290,59,19,8,3,0,0,0,0,0,0
1,15,11,14,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(815,247)|
10,16,LQ,622,384,13,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,17,1,16,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(580,248)|
1,18,6,16,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(321,403)|
1,19,11,16,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(693,304)|
10,20,WQ,361,394,16,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,21,16,20,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(482,394)|
1,22,6,20,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(318,291)|
10,23,WS,415,299,14,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,24,6,23,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(416,248)|
1,25,1,23,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(492,274)|
10,26,S,794,147,6,11,8,3,0,0,0,0,0,0
10,27,WSS,392,345,19,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,28,23,27,0,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(406,315)|
1,29,20,27,0,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(372,375)|
10,30,LSS,566,340,16,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,31,1,30,0,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(532,253)|
1,32,16,30,0,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(599,366)|
10,33,P,483,98,7,11,8,3,0,0,0,0,0,0
1,34,6,33,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(396,118)|
1,35,11,33,1,0,0,0,0,64,0,-1--1--1,,1|(578,113)|
10,36,PERSONAS ATENDIDAS,697,116,47,19,8,3,0,0,0,0,0,0

```

```
1,37,36,11,0,0,0,0,0,64,0,-1--1-,1|(682,158)|
1,38,26,11,0,0,0,0,0,64,0,-1--1-,1|(745,169)|
///--\\
:GRAPH Pesonas_en_el_sistema_
:TITLE Personas en el sistema
:SCALE
:VAR LQ
:Y-MIN 0
:L□<%^E!@
1:SIMULACION1.vdf
1:SIMULACION2.vdf
1:SIMULACION3.vdf
9:SIMULACION1
22:$,Dollar,Dollars,$s
22:1,Cliente
22:Cliente/Minute,1/Minute
22:Day,Days
22:Hour,Hours
22:Month,Months
22:Person,People,Persons
22:Unit,Units
22:Week,Weeks
22:Year,Years
23:0
15:0,0,0,0,0,0
19:90,0
27:2,
34:0,
4:Time
5:LS
35:Date
36:YYYY-MM-DD
37:2000
38:1
39:1
40:6
41:0
24:1
25:60
26:60
```

Anexo 3 TABLAS DE TIEMPOS SIMULACIÓN 1, 2

Y 3

Time Minute	Simulación 1	Simulació	Simulació
		n 2	n 3
1	10	10	10
2	9	10	11
3	8	10	12
4	7	10	13
5	6	10	14
6	5	10	15
7	4	10	16
8	3	10	17
9	2	10	18
10	1	10	19
11	0	10	20
12	-1	10	21
13	-2	10	22
14	-3	10	23
15	-4	10	24
16	-5	10	25
17	-6	10	26
18	-7	10	27
19	-8	10	28
20	-9	10	29
21	-10	10	30
22	-11	10	31
23	-12	10	32
24	-13	10	33
25	-14	10	34
26	-15	10	35
27	-16	10	36
28	-17	10	37
29	-18	10	38
30	-19	10	39
31	-20	10	40
32	-21	10	41
33	-22	10	42
34	-23	10	43

35	-24	10	44
36	-25	10	45
37	-26	10	46
38	-27	10	47
39	-28	10	48
40	-29	10	49
41	-30	10	50
42	-31	10	51
43	-32	10	52
44	-33	10	53
45	-34	10	54
46	-35	10	55
47	-36	10	56
48	-37	10	57
49	-38	10	58
50	-39	10	59
51	-40	10	60
52	-41	10	61
53	-42	10	62
54	-43	10	63
55	-44	10	64
56	-45	10	65
57	-46	10	66
58	-47	10	67
59	-48	10	68
60	-49	10	69

Tabla 7.3 *Tiempos variable LQ*

Time Minute	Simulación 1	Simulació	Simulació
		n 2	n 3
1	5	5	5
2	4.5	5	5.5
3	4	5	6
4	3.5	5	6.5
5	3	5	7
6	2.5	5	7.5
7	2	5	8
8	1.5	5	8.5

9	1	5	9
10	0.5	5	9.5
11	0	5	10
12	-0.5	5	10.5
13	-1	5	11
14	-1.5	5	11.5
15	-2	5	12
16	-2.5	5	12.5
17	-3	5	13
18	-3.5	5	13.5
19	-4	5	14
20	-4.5	5	14.5
21	-5	5	15
22	-5.5	5	15.5
23	-6	5	16
24	-6.5	5	16.5
25	-7	5	17
26	-7.5	5	17.5
27	-8	5	18
28	-8.5	5	18.5
29	-9	5	19
30	-9.5	5	19.5
31	-10	5	20
32	-10.5	5	20.5
33	-11	5	21
34	-11.5	5	21.5
35	-12	5	22
36	-12.5	5	22.5
37	-13	5	23
38	-13.5	5	23.5
39	-14	5	24
40	-14.5	5	24.5
41	-15	5	25
42	-15.5	5	25.5
43	-16	5	26
44	-16.5	5	26.5
45	-17	5	27
46	-17.5	5	27.5
47	-18	5	28
48	-18.5	5	28.5
49	-19	5	29

50	-19.5	5	29.5
51	-20	5	30
52	-20.5	5	30.5
53	-21	5	31
54	-21.5	5	31.5
55	-22	5	32
56	-22.5	5	32.5
57	-23	5	33
58	-23.5	5	33.5
59	-24	5	34
60	-24.5	5	34.5

TABLA 3.4 TIEMPOS VARIABLE WS

Time Minute	Simulación 1	Simulació	Simulació
		n 2	n 3
1	0.666666687	1	2
2	0.666666687	1	2
3	0.666666687	1	2
4	0.666666687	1	2
5	0.666666687	1	2
6	0.666666687	1	2
7	0.666666687	1	2
8	0.666666687	1	2
9	0.666666687	1	2
10	0.666666687	1	2
11	0.666666687	1	2
12	0.666666687	1	2
13	0.666666687	1	2
14	0.666666687	1	2
15	0.666666687	1	2
16	0.666666687	1	2
17	0.666666687	1	2
18	0.666666687	1	2
19	0.666666687	1	2
20	0.666666687	1	2
21	0.666666687	1	2
22	0.666666687	1	2
23	0.666666687	1	2

24	0.666666687	1	2
25	0.666666687	1	2
26	0.666666687	1	2
27	0.666666687	1	2
28	0.666666687	1	2
29	0.666666687	1	2
30	0.666666687	1	2
31	0.666666687	1	2
32	0.666666687	1	2
33	0.666666687	1	2
34	0.666666687	1	2
35	0.666666687	1	2
36	0.666666687	1	2
37	0.666666687	1	2
38	0.666666687	1	2
39	0.666666687	1	2
40	0.666666687	1	2
41	0.666666687	1	2
42	0.666666687	1	2
43	0.666666687	1	2
44	0.666666687	1	2
45	0.666666687	1	2
46	0.666666687	1	2
47	0.666666687	1	2
48	0.666666687	1	2
49	0.666666687	1	2
50	0.666666687	1	2
51	0.666666687	1	2
52	0.666666687	1	2
53	0.666666687	1	2
54	0.666666687	1	2
55	0.666666687	1	2
56	0.666666687	1	2
57	0.666666687	1	2
58	0.666666687	1	2
59	0.666666687	1	2
60	0.666666687	1	2

TABLA 7.5 TIEMPOS VARIABLE WSS

Anexo 3 Gráficos resultantes las simulaciones realizadas .

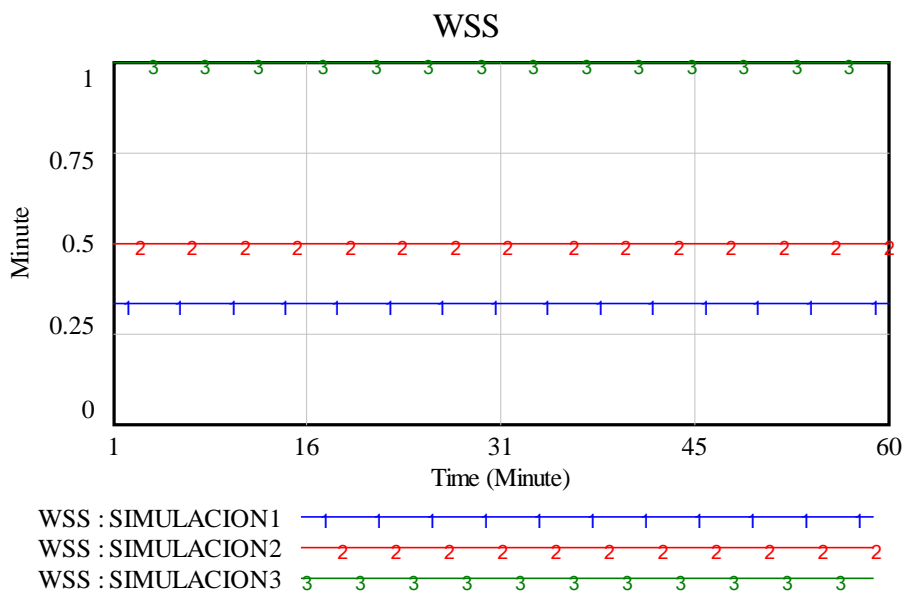


Grafico 7.2 Variable WSS

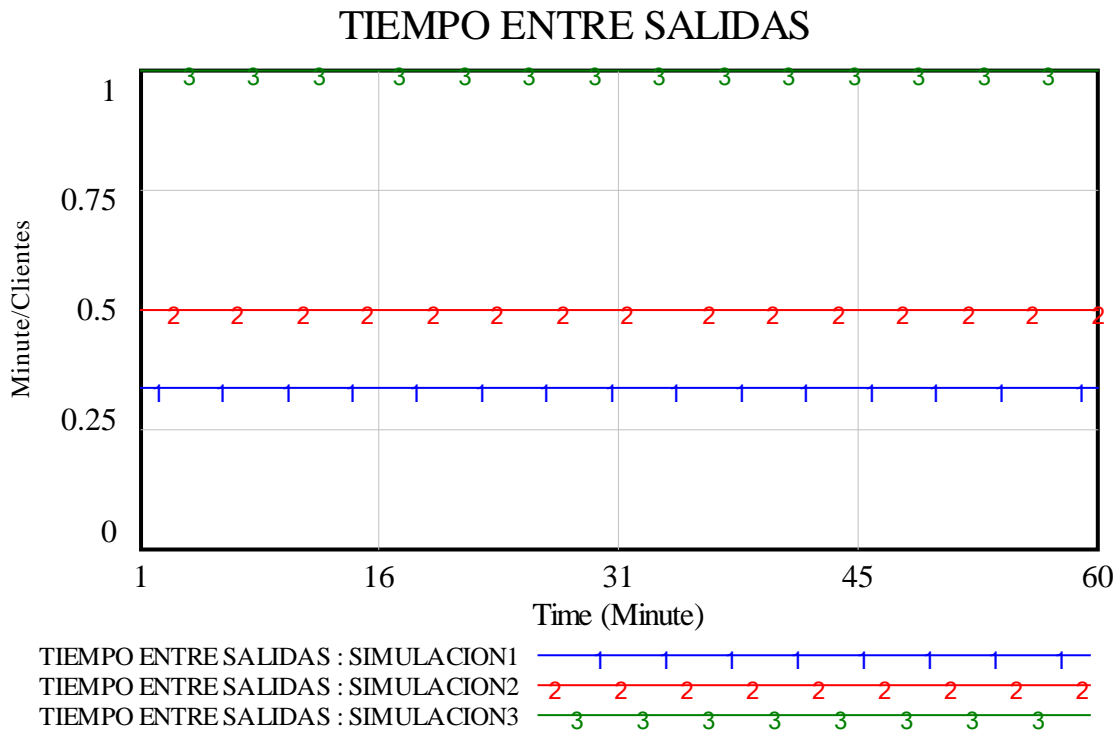


Grafico 7.3
Variable Tiempo entre Llegadas.

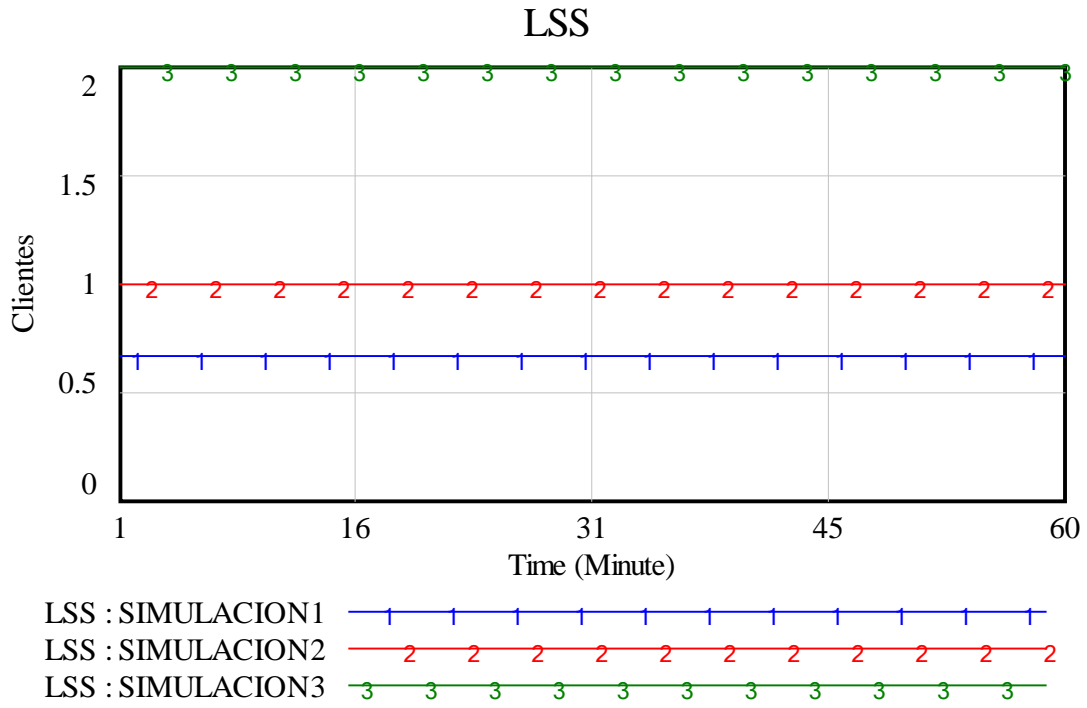


Grafico 7.4 Variable LSS

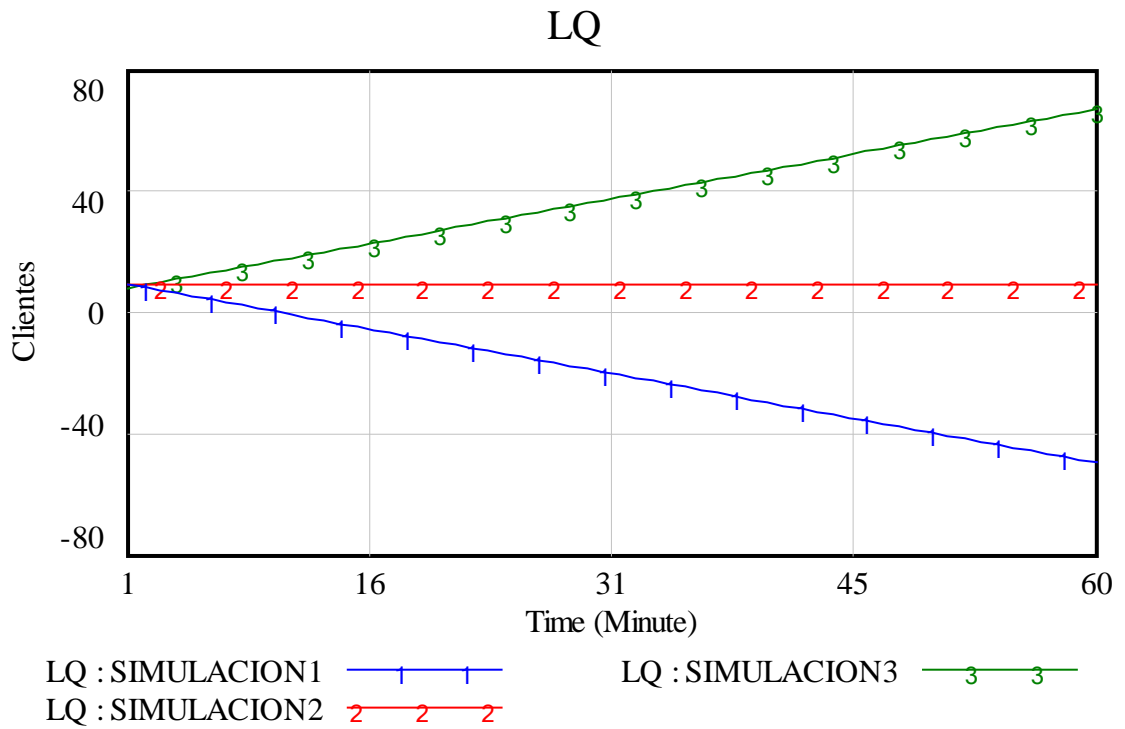


Grafico 7.5 Variable LQ

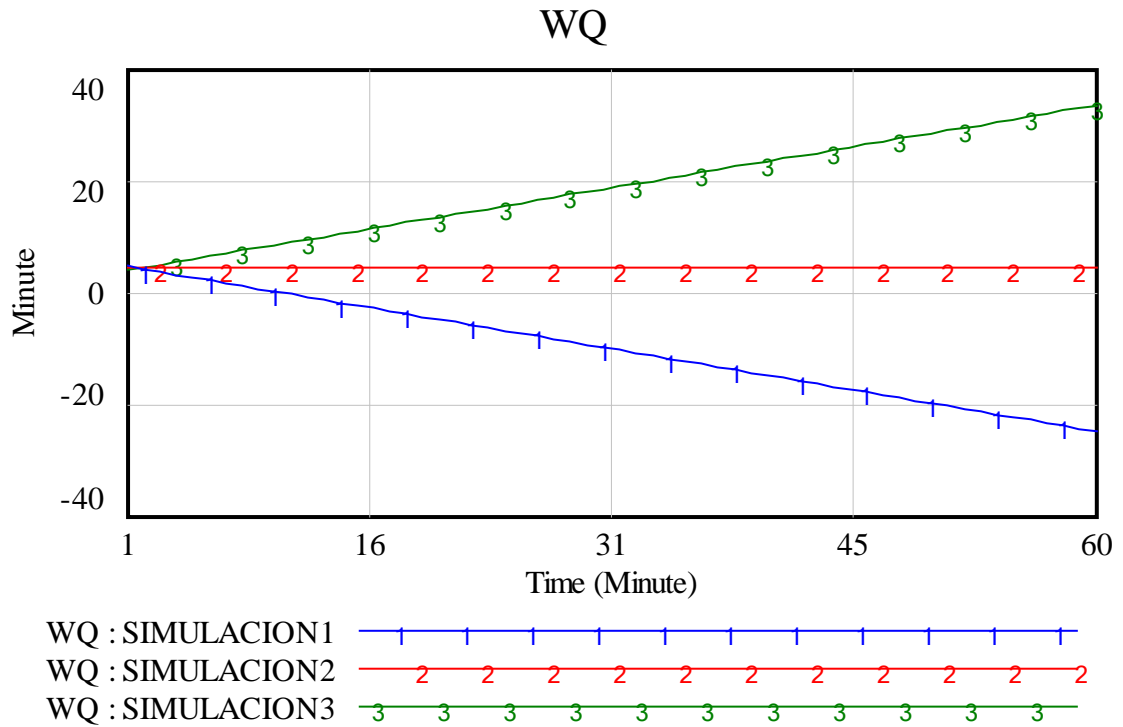


Grafico 7.6 Variable WQ

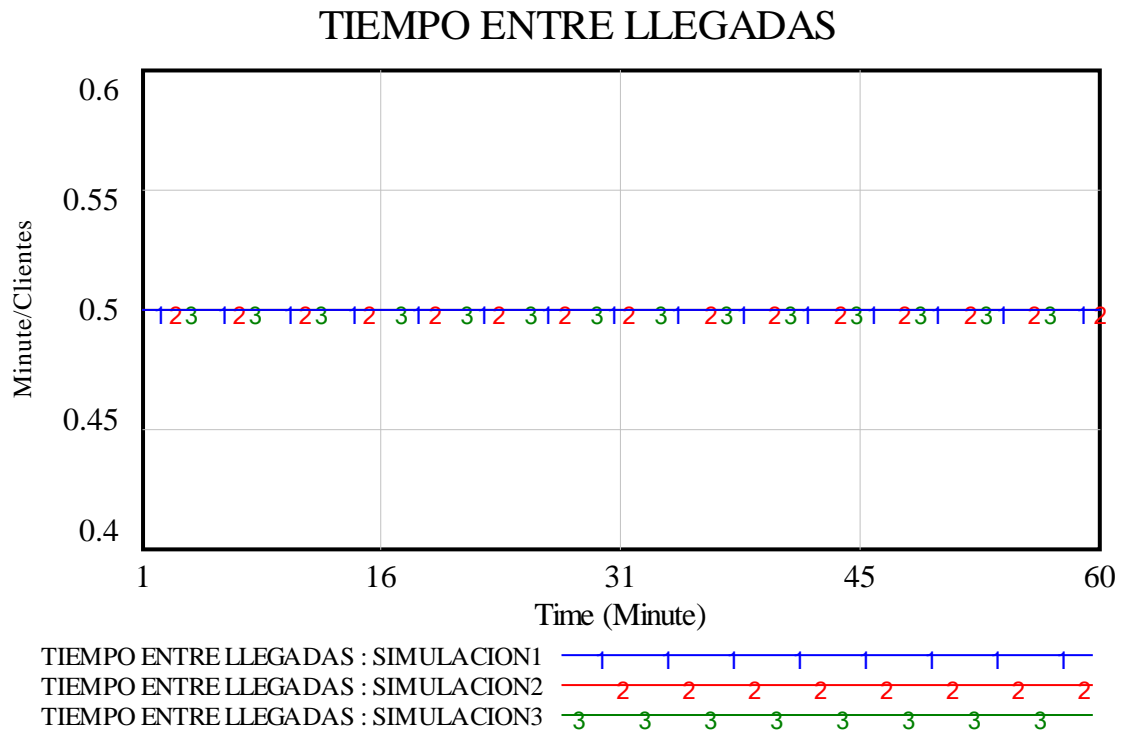
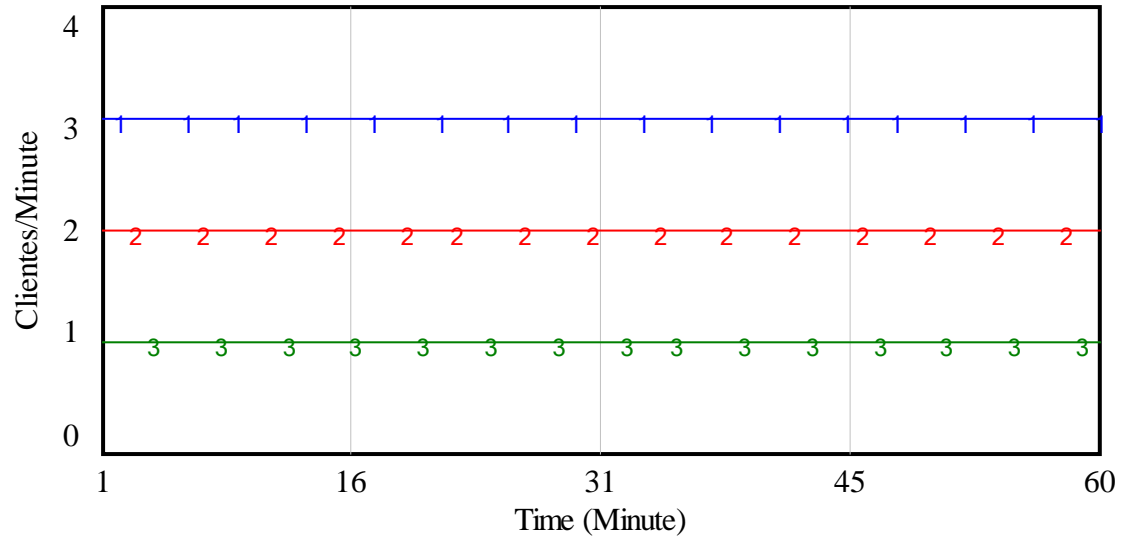


Grafico 7.7 Variable tiempo entre llegadas.

SALIDAS






SALIDAS : SIMULACION1 
SALIDAS : SIMULACION2 
SALIDAS : SIMULACION3 

Grafico 7.8 Salidas.