

01149



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS EN  
LA MEJORA DE PROCESOS DE  
MANUFACTURA Y SERVICIOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**(OPTIMACIÓN FINANCIERA)**

**P R E S E N T A:**

***BYRTHZEE RUBÉN AGUILAR BARONA***



**DIRECTOR DE TESIS: DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a todas las personas que han estado conmigo en cada etapa de mi vida, especialmente a Feliciano Mejía Ramírez, quien me impulso hacer una persona mejor cada día.

A mi mamá por su enorme amor, apoyo, confianza y sacrificio, el cual permitió que saliéramos adelante mi hermano y yo, además que sin ella no hubiera sido posible realizarme como una persona profesionista.

También dedico esta tesis a Iván Alberto Moran Cisneros y a su familia por todo el apoyo moral, así como el amor que me brindaron, al hacerme sentir como un miembro mas de su familia.

A Diana Mugica Bautista, Cesar Terol Focil, Aurelio Cervantes, Jair Gabriel Morales Camarena, Marcos Ramos González, Dulce María Hernández Barrera, Héctor D' Alba y a mis Hermanos Scouts, por su apoyo y su amistad.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México así como al Posgrado de Ingeniería, por todo el apoyo que me brindaron para hacer posible la realización de mi tan anhelado sueño, de realizar una maestría.

A CONACYT por el apoyo económico que me brindo en el ultimo año de estudios de maestría.

A la Dra. Idalia Flores de la Mota, por la atención brindada, su tiempo, recomendaciones y su ayuda.

Final mente, agradezco a los sinodales sus comentarios y correcciones.

Dr. José Jesús Acosta Flores

M. en I. Rubén Téllez Sánchez

Dr. Ricardo Aceves García

M. en I. Francisco Álvarez Caso

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO 1. SIMULACIÓN DIGITAL.....	4
1.1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.2. QUE ES LA SIMULACIÓN.....	6
1.3. USO DE LA SIMULACIÓN Y SUS APLICACIONES.....	7
1.4. CÓMO SE DESARROLLA LA SIMULACIÓN.....	11
1.5. CUÁNDO Y EN DÓNDE DEBERÍA USARSE LA SIMULACIÓN.....	13
1.6. DEFINICIÓN DE SISTEMA Y ELEMENTOS DE UN SISTEMA.....	14
1.7. VARIABLES DE UN SISTEMA.....	18
1.8. ENFOQUE DE SISTEMAS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS.....	20
1.9. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS.....	25
1.10. CONCLUSIONES.....	26
CAPITULO 2. ETAPAS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN.....	28
2.1. INTRODUCCIÓN.....	28
2.2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	30
2.3. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	34
2.3.1. ESTRATEGIAS EN EL MODELADO DE ENTRADAS.....	35
2.3.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN.....	36
2.3.3. ESTIMACIÓN DE PARAMETROS POR REGRESIÓN.....	40
2.3.4. EVALUACIÓN DEL AJUSTE.....	42
2.3.5. SELECCIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN DE DATOS.....	42
2.4. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	44
2.4.1. CLASIFICACIÓN DE MODELOS.....	47
2.4.2. MODELOS TEÓRICOS VS. EXPERIMENTALES.....	47
2.5. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	49
2.5.1. VERIFICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN.....	51
2.5.2. VALIDACIÓN, VERIFICACIÓN Y CREDIBILIDAD.....	53
2.6. DISEÑO DE EXPERIMENTACIÓN.....	57
2.6.1. EXPERIMENTACIÓN (EJECUCIÓN DE PRUEBAS).....	57
2.7. VALIDACIÓN DE PRUEBAS.....	57
2.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS (INTERPRETACIÓN).....	57
2.8.1. MEDIDAS DE DESEMPEÑO.....	59

2.8.2. SIMULACIÓN CON TERMINACIÓN.....	61
2.8.3. ANÁLISIS POR REPETICIÓN.....	62
2.8.4. INTERVALO DE CONFIANZA ESPECIFICADO.....	64
2.8.5. SIMULACIÓN SIN TERMINACIÓN.....	66
2.8.6. SESGO DEBIDO AL ESTADO INICIAL.....	68
2.8.7. ANÁLISIS POR REPETICIÓN PARA EL ESTADO ESTACIONARIO.....	70
2.8.8. HISTOGRAMA.....	70
2.9. IMPLANTACIÓN.....	72
2.10. DOCUMENTACIÓN.....	73
2.11. COSTOS.....	73
2.12. CONCLUSIONES.....	74
<b>CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA PROMODEL.....</b>	<b>76</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	76
3.2. MODELOS DESARROLLADOS EN ESTE PROGRAMA.....	78
3.3. HERRAMIENTAS DE PROMODEL.....	79
3.3.1. STAT:FIT.....	79
3.3.2. SIMRUNNER.....	80
3.4. PROGRAMANDO CON PROMODEL.....	81
3.4.1. PASOS PARA PROGRAMAR EN PROMODEL.....	81
3.5. CONCLUSIONES.....	84
<b>CAPITULO 4. ANÁLISIS, DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN</b>	
4.1. INTRODUCCIÓN.....	86
4.2. DESARROLLO DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN.....	88
4.2.1. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.....	88
4.2.2. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	92
4.2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	94
4.2.4. MODELO DE SIMULACIÓN A TRAVÉS DE UN SOFTWARE.....	113
4.2.5. EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE PRUEBAS.....	123
4.2.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	124
4.2.7. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	127
4.2.8. COSTOS.....	128
4.2.9. INFORME PARA EL USUARIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN REALIZADA.....	129
4.3. CONCLUSIONES.....	130

CONCLUSIONES GENERALES.....	131
ANEXO. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	133
REFERENCIA BIBLIOGRAFÍA.....	135

## INTRODUCCIÓN

A partir de 1950 se han desarrollado una gran cantidad de herramientas analíticas, las cuales han permitido el desarrollo de la Simulación en diferentes áreas, tales como económicas y financieras, así como en el ramo Industrial y de Servicios. La simulación es una herramienta que permite tomar decisiones antes de implantar alguna estrategia financiera o simplemente para realizar cambios en un proceso productivo o de servicios.

Por el lado financiero permite minimizar costos, maximizar procesos y analizar información, para la proyección de cifras económicas. Además en la Industria permite crear un ambiente simulado, el cual podrá mostrar los cambios productivos necesarios para mejorar el ciclo de producción, en el ahorro de tiempo, fuerza de trabajo, modelos logísticos y en dinero.

Actualmente las empresas líderes en el ramo financiero, industrial y de servicios han desarrollado áreas, las cuales les han permitido tomar decisiones tanto en las mejoras productivas, como para su crecimiento a nivel institucional. Dichas empresas han construido diversos modelos de simulación los cuales han sido muy útiles en su operación.

Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación. Al proceso de diseñar el plan de experimentación para adoptar la mejor decisión se denomina optimización. Si el plan de experimentación se lleva a cabo con el solo objeto de aprender a conducir el sistema, entonces se denomina entrenamiento o capacitación.

Por las razones antes mencionadas y aprovechando las ventajas de la simulación es necesario conocer la metodología necesaria para poder realizar una buena simulación.

Poner de manifiesto como la simulación permite aproximarse al análisis y evaluación del rendimiento de sistemas antes de que sean construidos, convirtiéndose así en una herramienta clave de diseño, en cualquiera de sus fases, o para estimar a priori el impacto de los cambios propuestos en sistema ya existentes. Como en ambos casos el estudio de simulación se realiza antes de la construcción del nuevo sistema o de la modificación del antiguo, ayudando así a eliminar o reducir el riesgo de cuellos de

botella no previstos, infra o extra utilización de recursos, no satisfacción de especificaciones de diseño, etc..

## OBJETIVO E HIPOTESIS

Considerando la trascendencia que posee la simulación en el Ramo Industrial y de Servicios en el crecimiento económico, productivo y mejora continua dentro de las empresas Mexicanas, se tiene la presente tesis, cuyo objetivo fundamental, será de formular una metodología que permita proporcionar los pasos necesarios para realizar simulaciones en procesos productivos y de servicio, el cual pretende poderse llevar a cabo con las mayores probabilidades de éxito.

La hipótesis planteada en el presente trabajo, es que la metodología propuesta, permita mejorar los procesos productivos a través de la simulación, en el sector industrial y de servicios.

El presente trabajo de tesis contempla los siguientes temas:

- **Capítulo 1.-** Simulación Digital. En este capítulo se dará una breve introducción de todo lo relacionado con la simulación, que es la simulación, sus aplicaciones, cuando y donde se puede utilizar, que son los sistemas y la optimización de sistemas.
- **Capítulo 2.-** Etapas para realizar un estudio de Simulación. En este Capítulo se contemplan todos los pasos que se deben de seguir para poder realizar una simulación.
- **Capítulo 3.-** Descripción general del programa Promodel. El Capítulo 3 describe las características que posee el *software* llamado Promodel, el cual permite poder simular proceso industriales y análisis de la información administrada.
- **Capítulo 4.-** Análisis, desarrollo y ejecución de un Modelo de Simulación. Este Capítulo muestra la aplicación de la metodología en un caso practico de simulación.

Podemos partir de la definición de sistema como conjunto de cosas que ordenadamente relacionadas entre si contribuyen a determinado objeto.

Cuando alguien tiene la responsabilidad de conducir un sistema dado, como por ejemplo: un banco, una ciudad, un sistema de transporte, etc., debe tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que ejecutará sobre el sistema. Estas decisiones deben ser tales que la conducta resultante del sistema satisfaga de la mejor manera posible los objetivos planteados.

Para poder decidir correctamente es necesario saber cómo responderá el sistema ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema mismo; pero factores de costos, seguridad y otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. Este último sistema es el modelo a utilizar para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente.

Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación. Al proceso de diseñar el plan de experimentación para adoptar la mejor decisión se denomina optimización. Si el plan de experimentación se lleva a cabo con el solo objeto de aprender a conducir el sistema, entonces se denomina entrenamiento o capacitación.

# CAPITULO 1

## SIMULACIÓN DIGITAL

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Después del advenimiento de la computadora digital a principios de los años 50's, surgieron elementos analíticos que han tenido un profundo impacto en el campo científico. Uno de dichos elementos es precisamente la simulación, cuyos usos y aplicaciones se han multiplicado en los últimos años.

Es por ello que, cuando alguien tiene la responsabilidad de conducir un sistema dado, como por ejemplo: un banco, una ciudad, un sistema de transporte, etc., debe tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que ejecutará sobre el sistema. Estas decisiones deben ser tales que la conducta resultante del sistema satisfaga de la mejor manera posible los objetivos planteados.

Para poder decidir correctamente es necesario saber cómo responderá el sistema ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema mismo; pero factores de costos, seguridad y otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. Este último sistema es el modelo a utilizar para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente.

Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación. Al proceso de diseñar el plan de experimentación para adoptar la mejor decisión se denomina optimización. Si el plan de experimentación se lleva a cabo con el solo objeto de aprender a conducir el sistema, entonces se denomina entrenamiento o capacitación.

La Simulación se lleva a cabo como parte de un proceso de diseño de sistemas o mejoramiento de un proceso. Un problema de diseño presenta, en sí mismo, una necesidad para mejorar el existente. Se calculan promedios y varianzas de las replicaciones para proporcionar estimaciones estadísticas del desempeño de un



modelo. A través de un proceso iterativo de modelación, simulación y análisis, las configuraciones alternativas y políticas de operación pueden probarse para determinar cuál solución es la mejor. Deberá ser evidente que la Simulación no es una herramienta de solución sino una herramienta de evaluación.

Las herramientas de análisis de sistemas, adicionales a la Simulación, incluyen cálculos simples, hojas de calculo, técnicas de investigación de operaciones, y herramientas de computo especiales para programación, layout, etcétera, son técnicas que proporcionan la información necesaria para implantar un buen modelo de simulación. Cuando estas herramientas proporcionan soluciones rápidas y aproximadas, tienden a sobre simplificar las cosas, y están limitadas a una estrecha clase de problemas.

## 1.2. QUE ES LA SIMULACIÓN.

La Simulación es la manera de reproducir las condiciones de una situación, a través de un modelo, para estudiar, probar, entrenar, etcétera. Para nuestros propósitos, estamos interesados en reproducir el comportamiento operacional de sistemas dinámicos. Los modelos que serán usados son modelos de computadoras. *La Simulación es la imitación de un sistema dinámico usando un modelo de computadora con objeto de evaluar y mejorar el desempeño de Sistemas.* La Simulación es "la modelación de un proceso o sistema de tal manera que el modelo describe la respuesta del sistema actual para eventos que tienen lugar a través del tiempo". A través del estudio del comportamiento del modelo, podemos obtener información respecto al comportamiento del sistema actual. En la práctica, la Simulación es desarrollada usando programas y paquetes de Simulación que han sido específicamente diseñados y construidos para capturar el comportamiento dinámico de sistemas. Durante la Simulación, son generadas estadísticas de desempeño y resumidas automáticamente para análisis.

Los programas modernos de Simulación proporcionan una descripción realista y animación gráfica de los Sistemas que se modelan. Durante la Simulación, el usuario puede interactuar ajustando la velocidad de la animación y haciendo cambios en los valores de los parámetros del modelo para desarrollar diferentes tipos de análisis y escenarios. El estado del arte de las tecnologías de la Simulación proporcionan capacidades de optimización (no que la Simulación por si mismo optimice), pero los escenarios que satisfacen restricciones de factibilidad definidas pueden ser "corridos" automáticamente y analizados usando algoritmos especiales de búsqueda de metas.

En principio se enfocará a la Simulación de eventos discretos, en cuyos modelos los efectos de los eventos en un Sistema pueden ocurrir a través del tiempo. La Simulación de eventos discretos emplean métodos estadísticos para generar el comportamiento aleatorio y estimar el desempeño de los modelos. Este método es referido como Método Monte Carlo por su semejanza con los resultados aleatorios de juegos de azar.

### 1.3. USO DE LA SIMULACIÓN Y SUS APLICACIONES.

La Simulación proporciona una manera de validar si se toman o no las mejores decisiones y evita costos, consumo de tiempo e interrupciones que se presentan al usar técnicas tradicionales de prueba y error. La potencia de la Simulación radica en el hecho de que proporciona un método de análisis, que no solamente es formal y predictivo, sino que es capaz de evaluar precisamente el desempeño de Sistemas muy complejos. Con la importancia actual de los mercados competitivos de "hacer lo correcto a la primera vez", la lección es clara: si a la primera vez no tuvo éxito, Usted probablemente debería haber simulado. Al usar una computadora para modelar un Sistema antes de ser construido o para probar políticas de operación antes de que se instrumenten, se pueden evitar errores y fallas que se encuentran a menudo en los nuevos sistemas cuando empiezan a operar o que dan lugar a modificaciones en sistemas existentes. Las mejoras que tradicionalmente toman meses, y aun años, se pueden alcanzar en días o aun en horas. Debido a que la Simulación corre en tiempo comprimido, pueden ser simuladas semanas de operación de sistemas en unos pocos minutos o aun segundos. Las características de la Simulación que la hacen tan poderosa en los procesos de planeación y toma de decisiones pueden resumirse como sigue:

- Captura interdependencia del Sistema.
- Toma en cuenta la variabilidad en el Sistema.
- Es bastante versátil para modelar cualquier Sistema.
- Muestra el comportamiento a través del tiempo.
- Es menos costoso, consume menor tiempo, y paros que la experimentación directa en el sistema actual.
- Proporciona información sobre múltiples medidas de desempeño.
- Es visualmente presentada a la gente involucrada e interesada.
- Proporciona resultados que son fáciles de entender y comunicar.
- Las corridas son desarrolladas en tiempo comprimido, real o aún retrasado.
- Enfoca la atención para detallar en un diseño.

Debido a que la Simulación toma en cuenta las interdependencias y las variaciones, proporciona información en la dinámica compleja de un sistema que no puede ser obtenida usando otras técnicas de análisis. La Simulación da a los planeadores de los

sistemas, libertad ilimitada para tratar diferentes ideas para mejorar, libres de riesgo, virtualmente sin costo o pérdida de tiempo, y sin interrupciones en el sistema corriente. Además, los resultados son tanto visuales como cuantitativos con estadísticas de desempeño que son automáticamente reportadas sobre todas las medidas de interés.

Aun si no se encuentran problemas cuando se analizan los resultados de la simulación, el ejercicio de desarrollar un modelo es por si mismo benéfico ya que fuerza a pensar en todos los detalles operacionales del proceso. La Simulación puede trabajar con información imprecisa, pero no puede trabajar con información incompleta. Es una tendencia humana común ignorar los detalles operacionales de un diseño o plan hasta la fase de implantación, cuando es tardío para que las decisiones tengan un impacto significativo "pensamos en generalidades; vivimos en detalles". Los planeadores de sistemas subestiman los detalles de cómo el sistema operará y durante la fase de implantación generan pérdidas o desviaciones respecto a las metas. La Simulación fuerza las decisiones en detalles críticos, de manera que no se deje al azar o al último minuto, cuando pueden ser inoportunos. La Simulación promueve una actitud de hágalo y vea, estimule innovación y pensamiento creativo. Ayuda a eliminar problemas y encontrar soluciones y permite poner fin a debates infructuosos sobre la solución que mejor trabaja. La Simulación elimina las emociones o aspectos emotivos del proceso de toma de decisiones al proporcionar evidencia objetiva que es difícil refutar.

La simulación se puede aplicar cuando:

- No existe una formulación matemática analíticamente resoluble. Muchos sistemas reales no pueden ser modelados matemáticamente con las herramientas actualmente disponibles, por ejemplo la conducta de un cliente de un banco.
- Existe una formulación matemática, pero es difícil obtener una solución analítica. Los modelos matemáticos utilizados para modelar un reactor nuclear o una planta química son imposibles de resolver en forma analítica sin realizar serias simplificaciones.
- No existe el sistema real. Es problema del ingeniero que tiene que diseñar un sistema nuevo. El diseño del sistema mejorará notablemente si se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos.

- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos. En este caso el sistema real esta disponible para realizar experimentos, pero la dificultad de los mismos hace que se descarte esta opción. Un ejemplo de esto es la imposibilidad de provocar fallas en un avión real para evaluar la conducta del piloto, tampoco se puede variar el valor de un impuesto para evaluar la reacción del mercado.
  
- El sistema evoluciona muy lentamente o muy rápidamente. Un ejemplo de dinámica lenta es el problema de los científicos que estudian la evolución del clima. Ellos deben predecir la conducta futura del clima dadas las condiciones actuales, no pueden esperar a que un tornado arrase una ciudad para luego dar el mensaje de alerta. Por el contrario, existen fenómenos muy rápidos que deben ser simulados para poder observarlos en detalles, por ejemplo una explosión.

Entre las posibles desventajas de la simulación se pueden citar:

- El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento.
  
- Existe la posibilidad de cometer errores. No se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces, si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.
  
- No se puede conocer el grado de imprecisión de los resultados. Por lo general el modelo se utiliza para experimentar situaciones nunca planteadas en el sistema real, por lo tanto no existe información previa para estimar el grado de correspondencia entre la respuesta del modelo y la del sistema real.

Actualmente la simulación presta un invaluable servicio en casi todas las áreas posibles, algunas de ellas son:

**Procesos de manufacturas:** Ayuda a detectar cuellos de botellas, a distribuir personal, determinar la política de producción.

**Plantas industriales:** Brinda información para establecer las condiciones óptimas de operación, y para la elaboración de procedimientos de operación y de emergencias.

**Sistemas públicos:** Predice la demanda de energía durante las diferentes épocas del año, anticipa el comportamiento del clima, predice la forma de propagación de enfermedades.

**Sistemas de transportes:** Detecta zonas de posible congestionamiento, zonas con mayor riesgo de accidentes, predice la demanda para cada hora del día.

**Construcción:** Predice el efecto de los vientos y temblores sobre la estabilidad de los edificios, provee información sobre las condiciones de iluminación y condiciones ambientales en el interior de los mismos, detecta las partes de las estructuras que deben ser reforzadas.

**Diseño:** Permite la selección adecuada de materiales y formas. Posibilita estudiar la sensibilidad del diseño con respecto a parámetros no controlables.

**Educación:** Es una excelente herramienta para ayudar a comprender un sistema real debido a que puede expandir, comprimir o detener el tiempo, y además es capaz de brindar información sobre variables que no pueden ser medidas en el sistema real.

**Capacitación:** Dado que el riesgo y los costos son casi nulos, una persona puede utilizar el simulador para aprender por sí misma utilizando el método más natural para aprender: el de prueba y error.

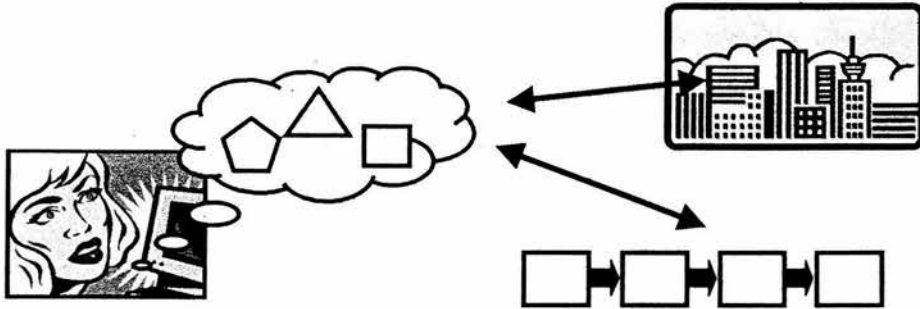
#### 1.4. CÓMO SE DESARROLLA SIMULACIÓN.

La Simulación se lleva a cabo como parte de un proceso de diseño de sistemas o mejoramiento de un proceso. Un problema de diseño presenta, en sí mismo, una necesidad para mejorar el existente. Se generan soluciones alternativas, que son evaluadas y la mejor solución es elegida e implantada. La Simulación juega un papel determinante durante la fase de evaluación. Primero, se desarrolla un modelo para una solución alternativa. Cuando el modelo es corrido, es puesto en operación para un periodo de tiempo de interés. Se generan estadísticas de desempeño (utilización, tiempo de procesamiento, etcétera) y son reportadas al final de la corrida; usualmente se llevan a cabo varias replicas, o corridas independientes de la Simulación. Se calculan promedios y varianzas de las replicaciones para proporcionar estimaciones estadísticas del desempeño del modelo. A través de un proceso iterativo de modelación, simulación y análisis, las configuraciones alternativas y políticas de operación pueden probarse para determinar cuál solución es la mejor.

La Simulación es esencialmente una herramienta de experimentación, en la cual un modelo de computadora de un sistema nuevo o existente, es creado con el propósito de llevar a cabo experimentos. El modelo actúa como una representación del sistema actual o del mundo real. Se genera conocimiento a través de la experimentación sobre el modelo que puede ser transferida al sistema real (figura 1.1).

Cuando hablamos de hacer Simulación, estamos considerando el proceso de diseño de un modelo de un sistema real y el llevar a cabo experimentos con este modelo. Estos experimentos sobre el modelo reducen tiempo, costo e interrupciones de experimentación sobre el sistema actual. En este aspecto, la Simulación puede ser considerada como una herramienta prototipo virtual para pruebas demostrativas de conceptos.

Figura 1.1 Simulación: Forma Virtual de Hacer Experimentación en un Sistema



El procedimiento de hacer Simulación sigue las etapas del método Científico de: (1) Formulación de una hipótesis, (2) Desarrollo de un experimento, (3) Prueba de hipótesis a través del experimento, y (4) Obtener conclusiones respecto a la validez de la hipótesis. Con el modelo, llevamos a cabo múltiples replicaciones del experimento o Simulación. Finalmente se analizan los resultados de la simulación y se extraen conclusiones respecto a la hipótesis. Si la hipótesis fue correcta, se puede ir hacia el diseño de los cambios operacionales, suponiendo que las restricciones de tiempo y de implantación son satisfechas.

Deberá ser evidente que la Simulación no es una herramienta de solución sino una herramienta de evaluación. Describe cómo se comportará un sistema; no prescribe cómo debería ser diseñado. La Simulación no compensa la ignorancia de cómo es propuesto para operar un sistema. No excusa de ser cuidadoso y responsable en el manejo de datos de entrada y la interpretación de datos de salida. Más que ser percibida como un sustituto para el pensamiento, la Simulación debería ser considerada como una extensión de la mente que nos permite entender la dinámica compleja de un sistema.



## 1.5. CUÁNDO Y EN DÓNDE DEBERÍA USARSE LA SIMULACIÓN.

No todos los problemas de un sistema que podrían ser resueltos con la ayuda de la Simulación deberían ser resueltos usando la Simulación. Es importante elegir la herramienta correcta para las tareas. Para algunos problemas la Simulación puede ser inapropiada. La Simulación tiene ciertas limitaciones que deberían de ser consideradas antes de decidir aplicarla a una situación dada. No es un remedio para todos los problemas de un sistema y deberá ser usada sólo si es apropiada a situaciones específicas. Como una guía general, la Simulación es apropiada si los siguientes criterios son verdaderos:

- Una decisión operacional (lógica o cuantitativa) esta siendo hecha.
- El proceso que está siendo analizado es bien definido y es repetitivo.
- Las actividades y eventos exhiben alguna interdependencia y variabilidad.
- El impacto del costo de las decisiones es mayor que el costo de hacer Simulación.
- El costo de la experimentación sobre el sistema actual es mayor que el costo de hacer una Simulación.

Hay otras situaciones donde la Simulación es apropiada independientemente de los estados arriba. Esto es verdadero en el caso de construcción de modelos para propósitos de visualización. Si se trata de vender un diseño de sistema o simplemente comunicar cómo trabaja un sistema, una animación realista creada usando Simulación puede ser muy útil.

## 1.6. DEFINICIÓN DE SISTEMA Y ELEMENTOS DE UN SISTEMA.

Vivimos en una sociedad que está compuesta de sistemas complejos de los cuales depende nuestra seguridad, bienestar y nivel de vida. Rutinariamente usamos los sistemas de transporte, de servicios de salud, de producción y sistemas de distribución para satisfacer necesidades de bienes y servicios. Además, se demanda calidad, conveniencia, costos y duración de los bienes y servicios que son proporcionados por estos sistemas.

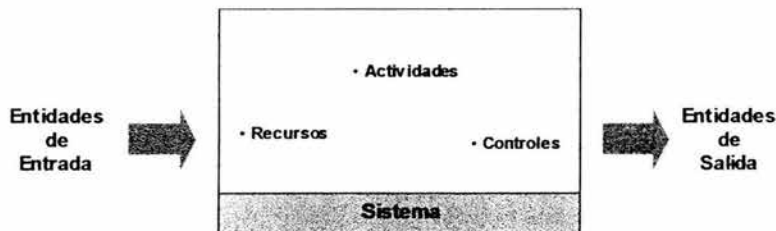
Un sistema, es definido como una conjunto de elementos que funcionan conjuntamente para alcanzar una meta deseada. Los puntos claves en esta definición incluyen el hecho de que (1) un sistema consiste de múltiples elementos, (2) estos elementos están interrelacionados y trabajan en cooperación, (3) un sistema existe con el propósito de alcanzar objetivos específicos. Ejemplos de sistemas son: sistemas de tráfico, sistemas políticos, sistemas económicos, sistemas de manufactura y sistemas de servicio. Nuestra principal atención será sobre los sistemas de manufactura y servicios que procesan materiales, información y personas. Los sistemas de manufactura pueden ser desde pequeñas empresas hasta grandes fábricas de producción de bienes. El almacenamiento y distribución, así como los sistemas de proveedores, serán incluidos en el análisis de los sistemas de manufactura.

Los sistemas de servicio cubren una alta variedad de sistemas incluyendo salud, centros de comunicación, parques recreativos, sistemas de transporte público, restaurantes, bancos, etc. Tanto los sistemas de manufactura como los de servicios pueden ser denominados sistemas de procesamiento porque ellos procesan elementos a través de una serie de actividades. En un sistema de manufactura, las materias primas son transformadas en productos finales. En un sistema de servicios, los clientes entran con alguna necesidad de servicio y salen del sistema como clientes atendidos. Los sistemas de procesamiento son artificiales, ellos están hechos por el hombre; son dinámicos, esto es, los elementos interactúan a través del tiempo y usualmente estocásticos, además exhiben un comportamiento aleatorio.

En la simulación, un sistema consiste de entidades, actividades, recursos y controles (Figura 1.2). Estos elementos definen el quién, qué, dónde, cuándo y cómo del proceso

de la entidad. El paradigma de modelación considera que un sistema consiste de insumos, productos, actividades, mecanismos (recursos) y controles.

Figura 1.2. Elementos de un Sistema



## Entidades

Las entidades son los elementos procesados a través del sistema, tales como: productos, clientes y documentos. Entidades diferentes pueden tener características únicas tales como costo, prioridad, calidad o condición. Las entidades pueden ser además subdivididas en los siguientes tipos:

- Humanas o animadas: clientes, pacientes, etc.
- Inanimadas: partes, documentos, etc.
- Intangibles: llamadas, correo electrónico, etc.

Para los sistemas de manufactura y servicio, las entidades son elementos discretos. Este es el caso para manufacturar partes discretas y de los sistemas de servicios que procesan clientes, documentos, y otros. Para algunos sistemas de producción llamados sistemas continuos, una sustancia no discreta es procesada; por ejemplo, el sistema de una refinería o de una petroquímica.

## **Actividades**

Las actividades son las tareas desarrolladas en el sistema que directa o indirectamente involucran el procesamiento de las entidades. Ejemplos de actividades incluyen servicio a clientes, corte de partes, reparación de una pieza. Las actividades usualmente consumen tiempo y a menudo involucran el uso de recursos. Pueden ser clasificadas como:

- Proceso de entidad: verificación, tratamiento, inspección, fabricación, etc.
- Movimiento de recursos y entidad: viaje, ascenso de un elevador, etc.
- Ajuste de recursos, mantenimiento y reparaciones: arranque de máquinas, reparación de máquinas, etc.

## **Recursos.**

Los recursos son los medios por los cuales las actividades se desarrollan. Ellos proporcionan las facilidades de apoyo, equipo y personal para llevar a cabo las actividades. Mientras algunos recursos facilitan el proceso de la entidad, otros recursos inadecuados pueden restringir el procesamiento limitando la tasa a la cual el proceso tiene lugar. Los recursos tienen características como capacidad, velocidad, tiempo de ciclo, y confiabilidad. Análogamente a las entidades, los recursos pueden ser clasificados como:

- Humanos o animados: operadores, doctores, personal de mantenimiento, etc.
- Inanimados: equipo, herramienta, espacio, etc.
- Intangibles: información, potencia eléctrica, etc.

Los recursos pueden también ser clasificados como dedicados o de participación, permanente o consumibles, y móviles o estacionarios.

## **Controles**

Los controles dictan cómo, cuándo, y dónde son desarrolladas las actividades. Los controles imponen orden en el sistema. Al nivel más alto, los controles consisten de programas, planes, y políticas. En su nivel más bajo, los controles toman la forma de

procesos escritos y máquinas de control lógico. En todos los niveles, los controles proporcionan la información y lógica de decisión para cómo deberá ser operado el sistema. Ejemplos de controles incluyen:

- Secuencias de rutas.
- Planes de producción.
- Programas de trabajo.
- Priorizar de tareas.
- Programas de control.
- Hojas de instrucción.

## **1.7. VARIABLES DE UN SISTEMA.**

Diseñar un nuevo sistema o hacer mejoras en un sistema existente, requiere más que la simple identificación de los elementos y metas de desempeño del sistema. Requiere de un entendimiento de cómo los elementos del sistema se afectan unos con otros e influyen en los objetivos de desempeño global. Para entender estas relaciones, se necesitan entender tres tipos de variables del sistema: variables de decisión, variables de respuesta y variables de estado.

### **Variables de Decisión**

Cuando se conduce un experimento, las variables de decisión, llamadas también insumos, son referidas como variables independientes en el experimento. Cambiando los valores de las variables independientes se afecta el comportamiento del sistema. Las variables independientes pueden ser controlables o no, dependiendo de si el experimentador está capacitado para manipular la variable o no. Las variables controlables pueden ser llamadas variables de decisión porque el decisor o experimentador controla los valores de las variables. Cuando se define el sistema, las variables controlables son la información respecto al sistema que es más prescriptivo que descriptivo.

### **Variables de Respuesta**

Las variables de respuesta, llamadas también de desempeño o variables de salida, son variables que miden el desempeño del sistema en respuesta a una variable de decisión particular. Una variable de respuesta puede ser el número de entidades procesadas para un periodo dado, la utilización por medio de un recurso, o cualquiera de las otras métricas de desempeño del sistema.

En un experimento, la variable de respuesta es la variable dependiente, la cual depende del valor particular asignado a las variables independientes. El experimentador no manipula variables dependientes, únicamente variables independientes o de decisión. La meta es encontrar los valores correctos o la asignación de las variables de decisión que generan los valores de respuesta deseados.

## **Variables de Estado**

Las variables de estado son variables que indican el estado del sistema en un tiempo específico. Ejemplos de estas variables de estado son el número de entidades esperando a ser procesadas o el estado corriente de un recurso particular (ocupado, vacío, apagado, etc.) las variables de respuesta pueden ser resumen de los cambios de las variables de estado sobre el tiempo. Por ejemplo, el tiempo individual que una máquina está ocupada, puede ser sumado sobre un periodo particular y dividido por el tiempo total disponible para reportar la utilización de la máquina en ese periodo de tiempo.

Las variables de estado son variables dependientes como las variables de respuesta, ya que dependen de valores asignados a las variables independientes. Las variables de estado se ignoran en experimentos dado que no son directamente controladas como las variables de decisión y no son de mucho interés para resumir el comportamiento reportado por las variables de respuesta.

## **1.8. ENFOQUE DE SISTEMAS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS.**

Debido a la departamentalización y especialización, las decisiones en el mundo real se dan sin considerar el desempeño global del sistema. Se estima que el 99% de las recomendaciones de mejora de una empresa carecen de una visión global del sistema; cerca del 80% de las sugerencias no se traducen en mejoras y muchas de las sugerencias disminuyen el desempeño global. Alcanzar un óptimo local resulta en un sub óptimo global.

Es bueno actuar localmente, tanto como pensar globalmente. El enfoque de sistemas diseña con los objetivos globales en mente y considerando cómo cada elemento se relaciona con los otros y en su totalidad, lo que constituye un enfoque sistémico o global. Debido a que los sistemas son compuestos de elementos interdependientes, no es posible predecir precisamente cómo el sistema se desempeñará simplemente examinando cada uno de los elementos aisladamente del total. Mientras estructuralmente un sistema puede ser divisible, funcionalmente es indivisible y en consecuencia requiere de un enfoque global o un pensamiento sistémico.

Siempre que se diseña un nuevo sistema o mejora un sistema existente es importante seguir los principios de diseño que toman en cuenta todas las variables relevantes. La actividad del diseño de sistemas y mejora de procesos, también llamada ingeniería de sistemas, ha sido definida como:

La aplicación efectiva del esfuerzo científico y de ingeniería, para transformar las necesidades operacionales en una configuración definida de sistema, a través de un proceso iterativo de arriba hacia abajo de definición de requerimientos, análisis funcional, síntesis, optimización, diseño, prueba y evaluación.

Para establecerlo simplemente, la ingeniería de sistemas es el proceso de identificar problemas y oportunidades de mejora, desarrollar soluciones alternativas, evaluar las soluciones, y elegir e implantar la mejor solución (figura 1.3).



Figura 1.3 Pasos Iterativos para Generar Mejoras en un Sistema



Mientras que la simulación es tal vez la más versátil y poderosa herramienta del análisis de sistemas, otras técnicas están disponibles para ser usadas en la planeación de sistemas. Estas técnicas alternativas son usualmente métodos computacionales que funcionan bien para sistemas simples con poca interdependencia y variabilidad. Para sistemas más complejos, estas técnicas pueden proporcionar estimaciones gruesas, pero falla en producir respuestas precisas que la Simulación proporciona. Los sistemas implantados usando estas técnicas usualmente requieren más ajuste después de su implantación para compensar los cálculos imprecisos. Estos ajustes pueden crear retrasos grandes y modificaciones costosas. Como una medida de precaución, se agrega un factor de seguridad al cálculo de recursos y espacio. El sobre diseño de un sistema, sin embargo, también puede ser costoso y con desperdicio.

Conforme la interdependencia y variabilidad aumentan en un sistema, no sólo disminuye el desempeño del sistema, sino la habilidad para predecir adecuadamente el desempeño del sistema. La Simulación permite predecir adecuadamente el desempeño esperado de un sistema diseñado y hacer mejores decisiones de diseño.

Las herramientas de análisis de sistemas, adicionales a la Simulación, incluyen cálculos simples, hojas de cálculo, técnicas de investigación de operaciones, y herramientas de computo especiales para programación, layout, etcétera.

Cuando estas herramientas proporcionan soluciones rápidas y aproximadas, tienden a

sobre simplificar las cosas, y están limitadas a una estrecha clase de problemas.

Adicionalmente, fallan en tomar en cuenta las interdependencias y variabilidad de sistemas complejos y en consecuencia carecen de la precisión que ofrece la simulación en la predicción del desempeño de sistemas complejos (figura 1.4.). Las técnicas de análisis de sistemas mencionadas, además de proporcionar algunas ocasiones una buena alternativa para la Simulación, también la pueden complementar a través de proporcionar estimaciones de diseño iniciales como insumos para el modelo de simulación. Ellas también pueden ser útiles para ayudar a validar los resultados de una simulación comparándolos con los resultados obtenidos usando modelos analíticos.



## **Cálculos Manuales**

Los Cálculos Manuales pueden ser útiles en el entendimiento de los requerimientos básicos de un sistema. Muchas decisiones importantes han sido resultado de dibujos y cálculos sencillos. Algunas decisiones pueden ser tan básicas que el cálculo mental conduce al resultado requerido. Son obvias las limitaciones de los cálculos manuales en los sistemas complejos en donde se requiere tomar simultáneamente en cuenta cientos de relaciones complejas.

## **Hojas de Cálculo**

Los programas de Hojas de Cálculo son valiosos cuando se involucran cientos de valores y cálculos y permiten desarrollar análisis y estimaciones de requerimientos preliminares; sin embargo, no son apropiados para incluir variabilidad en los tiempos de actividades, tasas de llegada y no toman en cuenta las interdependencias.

## **Técnicas de Investigación de Operaciones**

Tradicionalmente, las Técnicas de Investigación de Operaciones, utilizan métodos y modelos matemáticos para resolver relaciones simples o moderadamente complejas.

Estos modelos matemáticos incluyen, tanto modelos determinísticos, como probabilísticos y proporcionan respuestas cuantitativas que pueden ser de dos clases: (1) prescriptivas y (2) descriptivas.

### **Técnicas prescriptivas**

Las Técnicas Prescriptivas de la Investigación de Operaciones proporcionan una solución óptima a un problema, tal como el monto óptimo de capacidad de recursos que minimiza costos con la mezcla óptima de recursos que maximiza beneficios. Ejemplos de Técnicas Prescriptivas son la programación lineal y la programación dinámica, las cuales se aplican para la determinación de una máximo o un mínimo de una función objetivo como beneficios o costos. Adicionalmente, estas técnicas no incluyen variables aleatorias y fuerzan al analista a usar tiempos promedios de proceso y tasas de llegada que

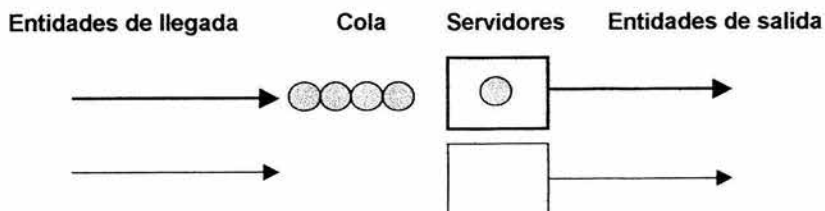
producen resultados aproximados. En contraste, la simulación es capaz de analizar muchas relaciones complejas y circunstancias que varían con el tiempo. Con las capacidades de optimización que actualmente proporciona la Simulación, las técnicas de Simulación han tomado un papel prescriptivo.

### Técnicas descriptivas

Las Técnicas Descriptivas, como la Teoría de Colas, son técnicas de análisis estático que proporcionan buenas estimaciones para problemas básicos tales como determinar el número promedio de entidades en cola o en tiempo promedio de espera para entidades en un sistema de colas. La Teoría de Colas es de interés particular, desde la perspectiva de la Simulación, porque considera muchas características comunes de los sistemas y orienta su utilización en la Simulación.

Un sistema de espera consiste de una o más Colas y uno o más servidores (figura 1.5.). Las entidades referidas en la Teoría de Colas como población de llegadas, entran al sistema de espera y son inmediatamente servidas si esta desocupado un servidor, o esperan en cola hasta que el servidor esté disponible. Las entidades pueden ser atendidas usando una o varias disciplinas de cola: primero que entra, primero que sale (FIFO); último que entra, primero que sale (LIFO); prioridad, y otras. La capacidad del sistema o número de entidades permitidas en el sistema, en cualquier tiempo, puede ser finita o infinita. Varias entidades diferentes en espera pueden ser analizadas como entrada rechazada, abandono de cola o interrupción de cola. Pueden ser consideradas diferentes distribuciones de tiempo entre llegadas. Los tiempos de servicio también pueden seguir una o varias distribuciones.

Figura 1.5. Configuración de un Sistema de Espera

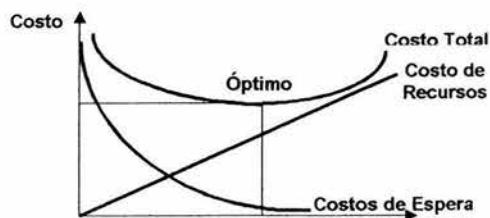


## 1.9. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS

Optimización es encontrar los valores de las variables de decisión que satisfacen mejor los objetivos de desempeño. Específicamente, la optimización busca encontrar la mejor combinación de variables de decisión que, minimicen o maximicen alguna función objetivo, tales como costos o beneficios. Una función objetivo, es simplemente una variable de respuesta de un sistema. Un objetivo típico en un problema de optimización para un sistema de manufactura o servicio, puede ser para minimizar costos o maximizar tasa de flujo. Los problemas de optimización incluyen restricciones y límites para los valores que las variables de decisión pueden tomar. Las restricciones pueden también aplicarse a variables de respuesta. En algunos casos, se busca alcanzar objetivos en conflicto. Por ejemplo, minimizar producción o costos de servicio está en conflicto con minimizar costos de espera. En la optimización del sistema, se debe ser cuidadoso para priorizar ponderadamente y estar seguro que la función objetivo correcta es manejada por las decisiones. La mejor estrategia para encontrar un balance apropiado entre el número de recursos y los tiempos de espera en un sistema de servicios se da cuando el costo total es minimizado.

Como se muestra en la figura 1.6, el número de recursos para el cual la suma de los costos de recursos y los costos de espera son mínimos, es el número óptimo de recursos a tener. También viene a ser aceptable el tiempo de espera. En el diseño de sistemas, llegar al diseño de sistema óptimo, no siempre es realista dado el número de configuraciones que son posibles y el tiempo limitado de que se disponen. Para un punto de vista práctico lo mejor que puede esperarse es una solución cercana a la óptima que sea bastante próximo con el objetivo, dadas las restricciones de tiempo para tomar la decisión.

Figura 1.6 Curvas de Costo Mostrando el Número Óptimo de Recursos para Minimizar Costo Total



## 1.10. CONCLUSIONES

Un entendimiento de la dinámica de sistemas es esencial para usar cualquier herramienta para la planeación de sistemas. Los sistemas de manufactura y servicios consisten de elementos interrelacionados (personal, equipo, etcétera) que funcionan interactivamente para producir un resultado específico (producto terminado, cliente satisfecho, etcétera).

Los sistemas son hechos de entidades (el objeto que es procesado), recursos (el personal, equipo, y facilidades usadas para procesar las entidades), actividades, los pasos del proceso y controles (las reglas que especifican quién, qué, dónde, cuándo, y cuánto de procesamiento de una entidad).

Las dos características de sistemas que los hacen difíciles de analizar son las interdependencias y la variabilidad. Las interdependencias provocan que el comportamiento de un elemento afecte a otros elementos en el sistema ya sea directa o indirectamente. La variabilidad compone el efecto de interdependencias en el sistema, haciendo que sea imposible predecir el comportamiento del sistema sin el uso de la Simulación.

Las variables de interés en el análisis de sistema, son variables de decisión, de respuesta y de estado. Las variables de decisión definen cómo opera el sistema; las variables de respuesta indican como se desempeña el sistema; y las variables de estado indican las condiciones del sistema en puntos específicos del tiempo. Las métricas de desempeño o variables de respuesta son generalmente el tiempo, la utilización, inventarios, calidad, o costos relacionados. Para mejorar el desempeño del sistema se requiere la manipulación correcta de las variables de decisión. La optimización del sistema busca encontrar los mejores valores de las variables de decisión que maximizan o minimizan un valor de la variable de respuesta.

Dada la naturaleza compleja de los elementos de un sistema y los requerimientos para hacer buenas decisiones de diseño en el tiempo más corto posible, es evidente que la simulación puede jugar un papel vital en la planeación de sistemas. Las técnicas tradicionales de análisis de sistemas son efectivas al proporcionar soluciones rápidas, pero a menudo aproximadas a los problemas de sistemas dinámicos. Generalmente

fallan en su habilidad para tratar con la complejidad y las condiciones que cambian dinámicamente en los sistemas de manufactura y servicio. La Simulación es capaz de imitar sistemas complejos de cualquier tamaño y a cualquier nivel de detalle. Esto da estimaciones de múltiples métricas de desempeño y conduce a los diseñadores hacia buenas decisiones de diseño.

Siempre que se diseña un nuevo sistema o mejora un sistema existente es importante seguir los principios de diseño que toman en cuenta todas las variables relevantes. La actividad del diseño de sistemas y mejora de procesos, también llamada ingeniería de sistemas, ha sido definida como la aplicación efectiva del esfuerzo científico y de ingeniería, para transformar las necesidades operacionales en una configuración definida de sistema, a través de un proceso iterativo de arriba hacia abajo de definición de requerimientos, análisis funcional, síntesis, optimización, diseño, prueba y evaluación; Para establecerlo simplemente, la ingeniería de sistemas es el proceso de identificar problemas y oportunidades de mejora, desarrollar soluciones alternativas, evaluar las soluciones, y elegir e implantar la mejor solución

## **CAPITULO 2**

### **ETAPAS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Para poder realizar un estudio de simulación es necesario cumplir con ciertos pasos que permitan el óptimo desarrollo de la duplicación de procesos tal y como se encuentran en la realidad, permitiendo con esto tener una simulación eficiente. De acuerdo con el modelo de simulación que se desee realizar, se debe de considerar todos los elementos necesarios, que permita sostener las bases de la reproducción de los procesos productivos. Cada uno de los pasos que se mencionaran a continuación, trae consigo una parte importante en el desarrollo de la simulación, trayendo consigo una metodología más eficiente.

Los pasos considerados para realizar una buena simulación son:

- Definición del Sistema
- Recolección de Datos o Información
  - Estrategias en el modelado de entradas
  - Identificación de la distribución
  - Estimación de parámetros por regresión
  - Evaluación del ajuste
  - Selección de una distribución de datos
- Formulación del modelo de simulación
  - Clasificación de modelos
  - Modelos teóricos vs. Experimentales
- Validación del modelo
- Verificación de modelos de simulación
  - Validación, verificación y credibilidad
- Diseño de experimentación
- Experimentación (ejecución de pruebas)
- Validación de las pruebas
- Análisis de resultados (análisis de salida)



- Medidas de desempeño
- Simulación con terminación
- Análisis por repetición
- Intervalo de confianza especificado
- Simulación sin terminación
- Sesgo debido al estado inicial
- Análisis por repetición para el estado estacionario
- Histograma
- Implementación
- Documentación
- Costos

Cada uno de los pasos de la metodología mencionada, trae consigo una parte fundamental y al mismo tiempo muy importante en la planeación, desarrollo e implementación del modelo de simulación. Se considera que aplicando esta metodología, permitirá tener un control mas claro en la generación proyectos de simulación.

## 2.2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

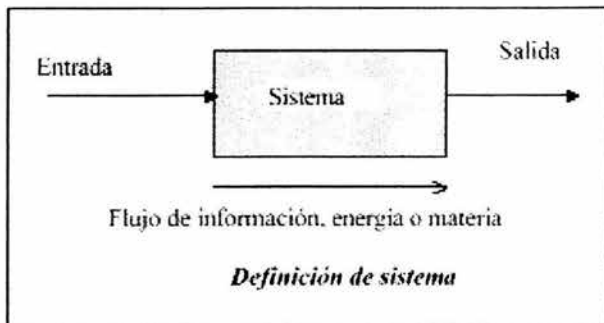
Un sistema es un conjunto de objetos con relaciones internas entre los propios objetos y entre sus atributos. Los atributos son las propiedades de los objetos. Una propiedad es una manifestación externa del modo que un objeto es conocido, observado. Un sistema puede definirse también como un conjunto de reglas o principios sobre una materia enlazados entre sí.

O un conjunto de cosas o elementos, que ordenadamente relacionadas entre sí contribuyen a un determinado objetivo. Un conjunto de relaciones identificadas no es todavía un sistema hasta que no se establezca algún objetivo unificado del mismo. Un sistema, entonces, debe contar con:

- 1) un objetivo o meta,
- 2) una organización definida de partes o elementos.

Un sistema no está limitado a objetos reales o físicos, sino que puede aplicarse a fenómenos abstractos, como por ejemplo la economía, la sociología. El concepto de sistema puede aplicarse a la física, biología, medicina, economía, sociología, etc.

Todos los sistemas son, de alguna manera, sistemas de flujo de información, energía o materia. Este intercambio constituye las relaciones de todo sistema.



**Definición de entorno:** Es el conjunto de todos los objetos exteriores al sistema, y pueden ser:

- 1) aquellos objetos cuyas alteraciones modifican al sistema (entrada).
- 2) aquellos objetos cuyos atributos son modificados por el sistema (salida).

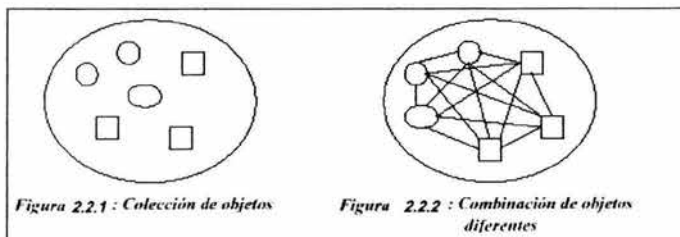
Debe limitarse el entorno a aquellos objetos que afectan significativamente al sistema.

**Teoría de la caja negra:** Se aplica a los trabajos o procesos que se refieren a las relaciones entre las entradas y salidas del sistema, sin importar conocer en detalle el sistema. Interesa poder establecer relaciones estadísticas o analíticas entre las entradas y las salidas. Esto se realiza ensayando distintas entradas y estudiando el comportamiento del sistema a través de sus salidas. Se supone o asume que las características del sistema no cambian durante el ensayo o estudio del sistema.

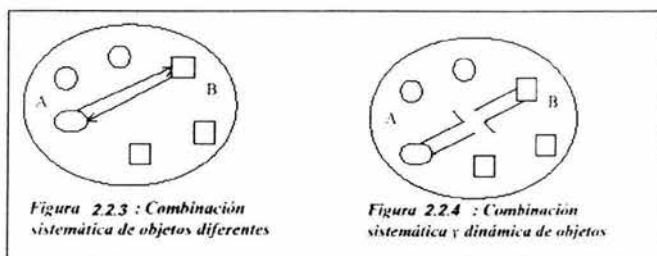
**Identificación de un sistema:** Se pueden encontrar cuatro fases en el proceso de identificación y definición del sistema.

1. **Es una colección de objetos diferentes:** Del universo de elementos, se han distinguido o separado  $n$  cantidad de elementos. El número de elementos elegidos o distinguidos suministra una primera medida de la complejidad del sistema. (Figura 2.2.1)

2. **Es una combinación de objetos diferentes:** El próximo paso es distinguir las relaciones existentes entre los objetos o elementos seleccionados. Estas relaciones se dibujan como líneas entre los elementos en la figura 2.2.2. La variedad de relaciones es la combinación de  $n$  elementos en grupos de 2:  $n(n-1)/2$ . Las relaciones son más importantes que los elementos propiamente dichos.



3. **Una combinación sistemática de objetos diferentes:** Al conocer más sobre las relaciones, se puede descubrir, que por ejemplo, la relación entre un objeto A y otro B, no es igual que la relación entre B y A. Aquí hay un incremento de información. Esto duplica la cantidad de conexiones posibles entre los elementos:  $n(n-1)$ . Podríamos dibujar dos flechas entre cada elemento, identificando estas relaciones (figura 2.2.3)



4. **Un sistema dinámico:** Si se descubre que esta combinación sistemática de objetos diferentes está unificada por una finalidad, se habrá identificado al sistema. Una condición adicional importante, es que estas relaciones entre los elementos puedan cambiar. Por ejemplo se podría identificar dos estados o posibilidades de cambio en cada relación (o conexión) (on y off). (Figura 2.2.4). Esto ahora incrementa los posibles estados del sistema a  $2(n(n-1))$ .

Así a medida que se conoce el sistema, se reduce la incertidumbre pero aumenta la variedad de posibles estados o relaciones.

Los sistemas pueden clasificarse de acuerdo a distintas categorías. Por ejemplo se pueden distinguir sistemas:

1. **Naturales o artificiales:** Dependiendo de la intervención del hombre en estos sistemas, por ejemplo, ecosistemas, sistema solar, o sistemas eléctricos, sistemas mecánicos.
2. **Determinísticos o probabilísticos:** Dependiendo si se puede predecir las salidas con exactitud o sólo a través de medidas estadísticas, como el valor medio, la varianza, etc.
3. **Abiertos o cerrados:** Dependiendo si tiene relación con el entorno o no.
4. **Simple o complejos:** De acuerdo al nivel de complejidad, o número de posibles estados o relaciones.

5. **Con o sin realimentación:** Dependiendo si la entrada tiene conocimiento de la salida.
6. **Lineales o no lineales:** Si las relaciones entre las entradas y las salidas varían proporcionalmente o no.

### 2.3. RECOLECCIÓN DE DATOS

Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados.

Si la etapa de recolección de datos no se realiza correctamente, de nada vale el esfuerzo que se dedique a las etapas de modelado, simulación y análisis de resultados; las conclusiones serán inevitablemente erróneas. A modo de guía, las siguientes sugerencias deberán ser tenidas en cuenta cuando se lleva a cabo esta etapa:

1. **Elabore un plan.** Éste puede comenzar con un ensayo en el sistema real. Realice las modificaciones que sean necesarias antes de iniciar la recolección de datos real. Observe las circunstancias inusuales y determine cómo serán manejadas.
2. **Analice los datos a medida que son recolectados.** Determine si los datos son útiles para la simulación; de lo contrario, elimínelos.
3. **Combine conjunto de datos homogéneos** (conjuntos de datos con la misma distribución).
4. **Detecte variables dependientes** (con un diagrama de dispersión).
5. **Detecte variables autocorrelacionadas.**

Las mediciones más comunes involucran la distancia entre eventos; por ejemplo, tiempos entre fallas de un equipo, entre arribos de clientes, entre el inicio y el final de alguna actividad.

### 2.3.1. ESTRATEGIAS EN EL MODELADO DE ENTRADAS

Existen cuatro pasos en el modelado de las entradas, a saber:

1. Recolección de datos del sistema real. Esta etapa requiere de bastante tiempo y esfuerzo. Desafortunadamente, no siempre es posible llevar a cabo esta etapa (el sistema aún no existe, las mediciones son costosas o peligrosas, etc.); entonces, se deberá recurrir al conocimiento de expertos o a registros históricos del sistema en estudio o sistemas similares.
2. Identificación de la distribución de probabilidad que mejor representa a la entrada. Cuando los datos están disponibles, esta etapa se inicia con la construcción de una tabla de frecuencias o un histograma. Basado en estos datos y en la naturaleza del proceso se selecciona una familia de distribuciones.
3. Determinación de parámetros. Una vez que se seleccionó la familia de distribuciones, se deben determinar los valores de los correspondientes parámetros que optimizan el ajuste de la distribución a los datos.
4. Evaluación de la distribución y de los parámetros. En esta etapa se evalúa la distribución y sus parámetros que representan a los datos. Esta evaluación se puede hacer gráficamente, o utilizando pruebas estadísticas; las pruebas chi-cuadrada y Kolmogorov-Smirnov son las más utilizadas. Si esta prueba falla, se repite el proceso desde el punto 2 con otra distribución. Si no se puede encontrar una distribución teórica adecuada, será necesario utilizar una distribución empírica.

Existen softwares que realizan estos pasos en forma automática, pero siempre es conveniente conocer los fundamentos teóricos a fin de utilizar apropiadamente estas herramientas.

### 2.3.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

Cuando los datos ya están disponibles, el primer paso en su procesamiento es la construcción de un histograma para cada variable  $X$ . Para ello, se deben determinar:

- El tamaño de la muestra  $n$ .
- Valor mínimo  $X_{\min}$ .
- Valor máximo  $X_{\max}$ .
- El rango  $R$ : igual a  $X_{\max} - X_{\min}$ .
- La cantidad de intervalos o clases  $C$ : la cantidad aconsejable es  $n^{1/2}$ , una cantidad menor o mayor puede distorsionar la forma del histograma.
- El ancho de los intervalos  $B$ : es igual a  $R/C$ .
- La frecuencia absoluta de los datos  $f_k$  en cada intervalo  $k$ : se obtiene contando cuántos datos están dentro del intervalo considerado.

Determinados estos parámetros, el histograma surge de graficar columnas con alturas  $f_k$  y ancho  $B$  para cada intervalo. A modo de ejemplo considere la Tabla 1 que fue obtenida con un generador exponencial con tiempo medio igual a 1.

Tabla 1: Datos de un generador exponencial con  $\lambda = 1$ .

$i$	$X_i$
1	0.684
2	0.408
3	1.568
4	0.633
5	0.328
6	1.199
7	0.014
8	1.433
9	0.343
10	1.183

Los valores del histograma para esos datos son:

$$X_{\min} = 0.014$$

$$X_{\max} = 1.568$$

$$R = 1.568 - 0.014 = 1.554$$

$$C = 3$$

$$B = 1.554/3 = 0.518$$

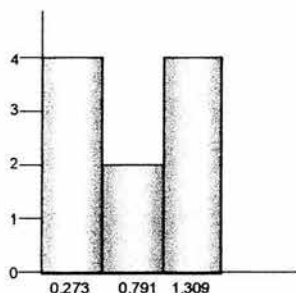


La Tabla 2 muestra las frecuencias absolutas correspondientes y la Figura 1 muestra el histograma.

Tabla 2: Tabla de frecuencias absolutas.

k	Intervalo	fk
1	[0.014, 0.532]	4
2	(0.532, 1.05]	2
3	(1.05, 1.568]	4

Figura 1: Histograma.



El siguiente paso es determinar la familia de distribuciones que se probará para representar el conjunto de datos en estudio. Para ello se cuenta con la forma del histograma y también se cuenta con la naturaleza del proceso. En efecto, se han desarrollado numerosas distribuciones teóricas para procesos determinados, por ejemplo:

- **Binomial:** Modela el número de éxitos en  $n$  pruebas independientes con probabilidad de éxito  $p$ ; por ejemplo, el número de disquetes defectuosos en un lote de  $n$ .
- **Binomial negativa:** Modela el número de pruebas requeridas para lograr  $k$  éxitos; por ejemplo, el número de disquetes que deberían ser revisados para encontrar  $k$  defectuosos.
- **Poisson:** Modela el número de eventos independientes que ocurren en una cantidad fija de tiempo o espacio; por ejemplo, el número de clientes que llegan a

un centro comercial durante una hora, o el número de defectos encontrados en 30 m<sup>2</sup> de una lámina de metal.

- **Normal:** Modela la distribución de un proceso que puede representarse como la suma de varios procesos; por ejemplo, el tiempo de ensamblaje de un automóvil puede representarse como la suma de los tiempos de ensamblaje de las distintas partes.
- **Lognormal:** Modela la distribución de un proceso que puede representarse como el producto de varios procesos; por ejemplo, la velocidad de retorno de una inversión con interés compuesto es igual al producto de los retornos de todos los periodos considerados.
- **Exponencial:** Modela el tiempo entre eventos independientes, o tiempos de procesos sin memoria donde no se puede inferir el tiempo final del proceso a partir del tiempo transcurrido; por ejemplo, tiempos entre arribos de clientes. Cuando el tiempo entre eventos sigue una distribución exponencial, el número de eventos en un intervalo fijo e tiempo sigue la distribución Poisson.
- **Gamma:** Se utiliza para modelar variables no negativas.
- **Beta:** Se utiliza para modelar variables limitadas a un intervalo.
- **Erlang:** Modela procesos que pueden representarse como la suma de varios procesos con distribución exponencial; por ejemplo, una red de computadora falla cuando una computadora y dos computadoras de respaldo fallan sucesivamente, y cada una de ellas tiene tiempos entre fallas exponencialmente distribuidos. La distribución Erlang es un caso especial de la distribución gamma.
- **Weibull:** Modela los tiempos entre fallas de un componente; por ejemplo, los tiempos entre fallas de un disco rígido. La distribución exponencial es un caso particular de la distribución Weibull.
- **Uniforme continua y discreta:** Modelan procesos completamente inciertos, ya que todos son igualmente probables.
- **Triangular:** Modela procesos de los cuáles sólo se conocen los valores mínimos, máximos y más probables; por ejemplo, cuando se conoce la duración mínima, máxima y más probable de la prueba de un producto.
- **Empírica:** Modela los procesos para los cuales no se pudo encontrar una distribución teórica apropiada.

Retomando el ejemplo anterior, si se supone que los datos son tiempos entre arribos de clientes, la distribución a probar es la exponencial.

Después de haber seleccionado una familia de distribuciones, el próximo paso es la estimación de los parámetros correspondientes. El método más básico emplea el valor medio ( $X_m$ ) y la varianza ( $S^2$ ) de la muestra, valores que son calculados de la siguiente forma:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n-1} = \frac{\sum X_i^2 - n X_m^2}{n-1} \quad (2)$$

A continuación se listan los estimadores sugeridos para las distribuciones más empleadas:

- Poisson  $\alpha \approx X_m$ .
- Exponencial:  $\lambda \approx 1/X_m$ .
- Uniforme[0, b]:  $b \approx X_{\max} \cdot (n + 1)/n$ .
- Normal:  $\mu \approx X_m$ ,  $\sigma^2 \approx S^2$ .

Para el conjunto de datos de la Tabla 1,  $X_m$  es igual a 0.7793; por lo tanto,  $\lambda \approx 1.2832$ , algo alejado del verdadero valor 1.

### 2.3.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR REGRESIÓN

Para poder estimar parámetros por regresión, primero se debe construir el histograma correspondiente, y luego se debe proponer una familia de distribuciones  $f(x)$ . Los valores de los parámetros serán determinados a través de un ajuste de la distribución al histograma.

Antes de proceder a realizar el ajuste, es necesario normalizar el histograma. En efecto, como la curva  $f(x)$  que se utilizará para el ajuste es una distribución probabilística la misma cumple con la condición de tener área unidad por debajo de ella. Sería una casualidad que el histograma construido cumpla con dicha condición; entonces, es necesario calcular las frecuencias normales  $fn$  que hacen que el histograma posea área unidad. Se puede demostrar que las frecuencias normales son:

$$fn_k = \frac{f_k}{nB} \quad (3)$$

El paso siguiente es transformar el histograma en puntos de ajustes. Para ello, se determina la marca  $M$  de cada intervalo (valor medio) y se le asocia la  $fn$  correspondiente. La Tabla 3 muestra los puntos de ajuste correspondientes al ejemplo de la Tabla 1.

Tabla 3: Puntos de ajuste.

<b>Mk</b>	<b>fnk</b>
0.273	0.7722
0.791	0.3861
1.309	0.7722

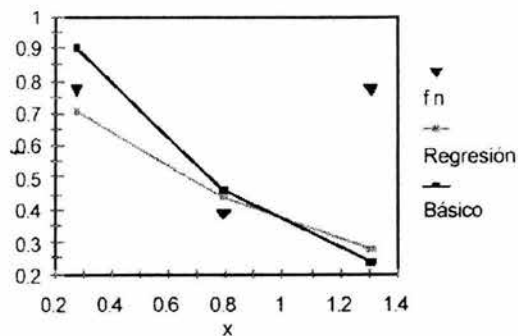
Ahora el problema se reduce a determinar los valores de los parámetros que hacen mínima la suma de los errores al cuadrado. Para este ejemplo, el problema a resolver es:

$$\text{Min}_{\lambda} \sum_{k=1}^c (fn_k - f(M_k))^2 \quad (4)$$

Este problema se resuelve fácilmente con una planilla de cálculo, y el resultado es  $\lambda \approx 0.91$ ; el cual es un valor mucho mejor que el obtenido por el método básico. La Figura 2

muestra el ajuste realizado por el método básico y el realizado por regresión. Observe el mejor ajuste a los puntos experimentales de esta última. Una ventaja adicional del método de regresión es que se puede aplicar sin modificaciones para estimar los parámetros de cualquier familia de distribuciones.

Figura2: Ajuste de parámetros.



### 2.3.4. EVALUACIÓN DEL AJUSTE

Para evaluar si realmente la distribución propuesta representa al conjunto de datos se pueden utilizar métodos estadísticos como por ejemplo:

- **Kolmogorov-Smirnov:** Decide en base a la máxima desviación entre la distribución acumulada teórica y la experimental.
- **Chi-cuadrado:** Decide en base a la suma de errores al cuadrado que surgen de comparar el histograma con la distribución teórica.

Estas pruebas son una buena guía para evaluar una distribución. Sin embargo, ya que no existe una distribución teórica que ajuste perfectamente a los datos del mundo real, no se deberían tomar los resultados de estas pruebas en forma categórica. Es muy importante comprender el efecto del tamaño de la muestra. Si la muestra es pequeña, las pruebas aceptarán cualquier distribución. Por el contrario, si la muestra es grande, las pruebas rechazarán a todas las distribuciones propuestas. Por lo tanto, estas pruebas son sólo un elemento más a tener en cuenta durante la evaluación.

### 2.3.5. SELECCIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN SIN DATOS

Cuando el sistema no existe aún o el proceso de medición no puede realizarse por algún motivo, será necesario seleccionar una distribución sin contar con los datos del sistema. La información necesaria para ello puede obtenerse de distintas fuentes, estas pueden ser:

**Especificaciones técnicas:** Generalmente se cuenta con datos técnicos de un producto o proceso; por ejemplo, tiempo medio entre fallas, velocidad de impresión, consumo promedio, etc.

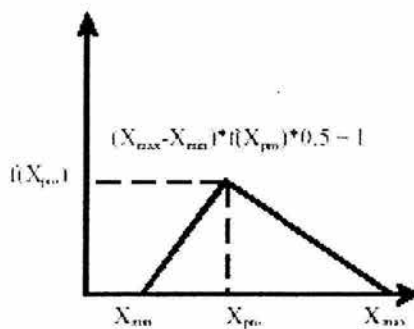
- **Opinión de expertos:** Las personas que conocen el sistema pueden hacer estimaciones cerca de los valores mínimos, máximos y probables de las variables. Con estos datos es posible construir una distribución triangular (Figura 8).
- **Limitaciones físicas o de diseño:** Dada la naturaleza del sistema, los valores de las variables están limitados a ciertos intervalos; por ejemplo, la luz roja de un

semáforo no puede durar menos de 10 s.

- La naturaleza del proceso: Este es un dato importante debido a que varias
- distribuciones teóricas fueron desarrolladas para procesos determinados.

Sea cual fuera la fuente, es necesario evaluar la sensibilidad de los resultados con respecto a la distribución propuesta de esta manera. Si la sensibilidad es alta, será necesario refinar las estimaciones.

Figura 8: Distribución triangular.



## 2.4. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Modelado es el proceso de construcción de un modelo. Un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea. Usualmente, su propósito es ayudar, explicar, entender o mejorar un sistema (Shannon, 1988). Los modelos son útiles para:

- El pensamiento: Al construir un modelo necesariamente se debe ordenar y completar el conocimiento que del sistema real se posee.
- La comunicación: Un modelo elimina la ambigüedad del lenguaje para comunicarse con expertos.
- El entrenamiento y la instrucción: Un modelo puede ser utilizado para entrenar con costo y riesgo casi nulos. Por ejemplo, los submarinos a escala utilizados por la marina alemana para entrenar en secreto antes de la segunda guerra mundial; o también, el sistema de barcos a escalas utilizados actualmente en Francia para entrenar a los capitanes de barcos petroleros.
- La predicción: Un modelo sirve para predecir la conducta del sistema real. Es el caso de los modelos utilizados para predecir, mediante simulación, la evolución del clima mundial. El modelo de la teoría de la relatividad predice, sin hacer una simulación, que no es posible superar la velocidad de la luz.
- La experimentación: La experimentación con un modelo es barata y segura. Se emplea frecuentemente en el diseño de un sistema; por ejemplo, las pruebas que se realizan en un túnel de viento con un modelo a escala de un avión o de un automóvil.

El modelado es un arte. Cualquier conjunto de reglas para desarrollar modelos tiene una utilidad limitada y sólo puede servir como una guía sugerida. El arte de modelar consiste en la habilidad para analizar un problema, resumir sus características esenciales, seleccionar y modificar las suposiciones básicas que caracterizan al sistema, y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta obtener una aproximación útil. Los pasos sugeridos para este proceso son:

1. Establecer una definición clara de los objetivos.
2. Analizar el sistema real.
3. Dividir el problema del sistema en problemas simples.



4. Buscar analogías.
5. Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
6. Determinar las variables de interés.
7. Escribir los datos obvios.
8. Escribir las ecuaciones teóricas o empíricas que describen los fenómenos presentes y relacionan las variables de interés.
9. Si se tiene un modelo manejable, enriquecerlo. De otra manera, simplificarlo.

Generalmente, simplificar un modelo implica:

- Convertir variables en constantes.
- Eliminar o combinar variables.
- Suponer linealidad.
- Agregar suposiciones más potentes y restricciones.
- Restringir los límites del sistema.

Para enriquecerlo se procede de la forma contraria. Durante el proceso de modelado se debe alcanzar un equilibrio entre el grado de detalle y el riesgo de falta de exactitud. El mejor modelo, es el modelo más simple que puede resolver el problema con el grado de exactitud requerido.

Un modelo debe ser:

- Fácil de entender por parte del usuario.
- Dirigido a metas u objetivos.
- Sensato, en cuanto no de respuestas absurdas.
- Fácil de manipular y controlar por parte del usuario. Es decir, debe ser sencillo comunicarse con el modelo.
- Completo, en lo referente a asuntos importantes.
- Adaptable, con un sencillo procedimiento para modificar o actualizar el modelo.
- Evolutivo, debe ser sencillo al principio y volverse más complejo en el tiempo.

A modo de ejemplo de lo planteado, considere que se desea construir un modelo para determinar el tiempo y la velocidad de contacto con el suelo de un paracaidista. El objetivo ya está planteado. El sistema será el paracaidista. Las características esenciales serán la velocidad de descenso, la fuerza de fricción, la altura inicial, etc. A fin de mantener el modelo en la forma más simple posible se supondrá despreciable la variación de la

aceleración de la gravedad con respecto a la altura, se supondrá despreciable también la elevación de la temperatura provocada por la fricción, se supondrá un cuerpo estándar para el paracaidista, etc. Luego, se determinarán las variables que representan a las características esenciales:  $v, Fr, h_0$ , etc.

El paso siguiente será formular las ecuaciones que vinculen dichas variables, como por ejemplo:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= -g + \frac{Fr}{m} \\ \frac{dh}{dt} &= v \\ Fr &= Crv^2 \end{aligned} \tag{12}$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h$  es la altura,  $m$  es la masa del paracaidista,  $t$  es el tiempo, y  $Cr$  es el coeficiente de fricción.

El modelo es manejable, pero se puede simplificar si es que se determina que la velocidad terminal (la que equilibra el peso con la fuerza de fricción) se alcanza pronto. Si esto es así, se podrá utilizar un modelo más simple considerando que la velocidad es constante.

### **2.4.1. CLASIFICACIÓN DE MODELOS**

Como ya fue planteado, un modelo es también un sistema; por lo tanto valen todas las definiciones y clasificaciones que se establecieron anteriormente. Debido a que un modelo es una simplificación o abstracción de un sistema real, no es necesario, salvo en los aspectos relevantes, que el modelo guarde una total correspondencia con el sistema real. Entonces, habrá casos en que será conveniente utilizar un modelo discreto para modelar un sistema continuo (por ejemplo, la integración numérica de una función utilizando la regla del trapecio), o utilizar un modelo estocástico para modelar un sistema determinístico (por ejemplo, la determinación del área de un figura utilizando la simulación de Monte Carlo), y todas las combinaciones posibles.

### **2.4.2. MODELOS TEÓRICOS VS. EXPERIMENTALES**

Si el modelo que se construye sólo se orienta a reproducir las salidas del sistema real sin intentar modelar su comportamiento interno; entonces, será un modelo experimental o de caja negra. En cambio, si el modelo también intenta reproducir las relaciones funcionales del sistema será un modelo con base teórica. Un modelo experimental requiere una gran cantidad de datos para poder calibrarlo o ajustarlo correctamente, y su rango de validez está limitado a este conjunto de datos. En contraposición, un modelo teórico requiere una cantidad menor de datos y puede ser utilizado fuera del rango de los mismos ya que el rango de validez del modelo está dado por la teoría utilizada y no por los datos.

Un ejemplo simple se presenta cuando se desea determinar el espacio recorrido por un cuerpo móvil a velocidad constante en función del tiempo. Para una velocidad dada, se puede construir una gráfica de espacio vs. tiempo a partir de medidas experimentales.

Esta gráfica sólo podrá emplearse para el caso en que la velocidad del móvil sea idéntica a aquella que se utilizó en los experimentos. Además, sólo proveerá información para los tiempos que pertenezcan al intervalo de experimentación. Estos problemas no se presentan si se utiliza un modelo teórico simple:  $e = v.t$ ; ni siquiera son necesarios los datos experimentales.

Para el calentador de agua se puede construir un modelo experimental que permita estimar el tiempo de calentamiento requerido para calentar una cantidad dada de agua hasta una temperatura deseada. Para ello será necesario medir la temperatura  $T_{mi}$  en  $N$  determinados instantes  $t_i$  y luego ajustar gráficamente una curva  $t$  vs.  $T_m$ , o ajustar matemáticamente con el criterio de mínimos cuadrados los coeficientes  $a$  de un polinomio  $P(a, t)$  resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N (P(a, T_{mi}) - t_i)^2 \quad (13)$$

Luego, el tiempo requerido para alcanzar una temperatura especificada será dado por este polinomio ya ajustado.

Un problema del modelo anterior es que se toma totalmente inútil cuando se cambia la cantidad de agua en el recipiente. Este problema puede ser resuelto incorporando la variable  $M$  al modelo; pero serán necesarios nuevos datos experimentales para distintos valores de  $M$ .

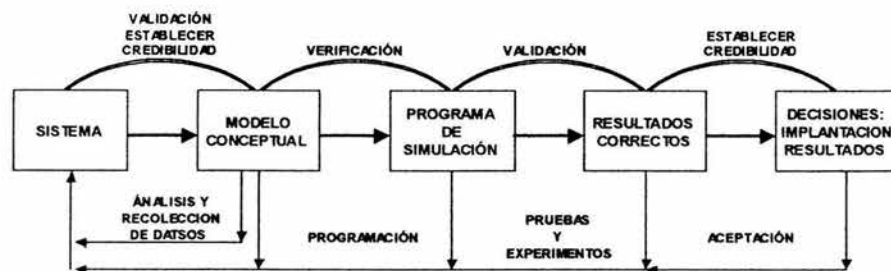
La incorporación de más variables puede llegar a hacer necesario que se reemplace el polinomio por un modelo más potente como por ejemplo una red neuronal. Otro problema es que el modelo no puede ser utilizado para temperaturas que estén fuera del intervalo de las temperaturas de los datos experimentales. Un modelo con base teórica requeriría mucho menos experimentos, o quizás ninguno, y el rango de temperatura posibles sería mayor.

## 2.5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Por definición un modelo válido es aquel que proporciona una representación adecuada de los aspectos de la realidad relevantes para el analista.

La primera fase de validación implica, en consecuencia, determinar si de todos los aspectos del sistema hemos incorporado al modelo aquellos que son de real interés para el estudio que nos ocupa, y hemos dejado fuera aquellos que podemos ignorar sin consecuencias para nuestro estudio, o no hemos considerado alguno que puede influir en el comportamiento del sistema cuyo estudio pretendemos.

Figura 28: RELACIONES ENTRE VALIDACIÓN, VERIFICACIÓN Y CREDIBILIDAD DEL MODELO DE SIMULACIÓN



Las respuestas a nuestras preguntas sobre el sistema las intentaremos obtener mediante los experimentos de simulación, en este sentido no debemos olvidar que experimentar con el modelo de simulación es experimentar con un sustituto del modelo real o propuesto, de manera que hemos de asegurarnos de que el modelo es válido, al menos hasta el punto de que las respuestas que proporciona a nuestras preguntas puedan considerarse aceptablemente válidas, sobre todo si han de servir de base a una toma de decisiones.

En sistemas grandes y complejos difícilmente será de interés tener en cuenta todas sus componentes y toda las posibles relaciones entre ellas, de ahí que el primer paso del analista sea hacer operativo su conocimiento del sistema, definir claramente cuales son los aspectos que le interesa investigar, cuales son las leyes que gobiernan tales aspectos del sistema, qué medidas del rendimiento son las apropiadas para cuantificar el

fenómeno, cuál es el entorno en que opera el sistema y cuales sus relaciones con el mismo y como lo determinan.

No olvidemos que según nuestra metodología no nos planteamos construir modelos de validez universal (cuya existencia podría, además, ser cuestionable), sino modelos diseñados y contruidos para satisfacer propósitos, particulares y concretos que deben estar bien definidos.

Será por lo tanto difícil, si no imposible, determinar que aspectos del sistema hemos de tener en cuenta, qué datos hemos de recoger, que variantes posibles hemos de analizar, etc., si no hemos definido previamente con claridad los objetivos del estudio, y en esta definición no hemos de olvidar que nuestro modelo no solo ha de ser válido sino también creíble, lo cual significa que el responsable de la toma de decisiones ha de estar implicado en el establecimiento de las objetivos.

Una regla sencilla, pero clave, es intentar conseguir un punto de equilibrio entre el grado de realismo, o complejidad, del modelo y los objetivos del mismo, no incluyendo detalles innecesarios, o que no sean consistentes con los datos de que disponemos, observables o inferidos. No hay que olvidar que, a pesar de nuestros esfuerzos, el modelo de simulación de un sistema, especialmente si es complejo, solo será una aproximación del sistema real, y que no podemos olvidar los aspectos coste-eficiencia en la práctica de la simulación, que pueden hacer que se descarte llevar la validez más allá de un cierto grado por los costes de obtención de la información suficiente.

Desde el punto de vista metodológico es muy distinto el tratamiento de sistemas observables para los cuales al definir los parámetros de interés podemos obtener medidas empíricas de los mismos, que sistemas para los cuales tales observaciones son imposibles, como por ejemplo los que intentan inferir panoramas de la evoluciones tecnológicas, económicas o sociales en el futuro. Para sistemas muy complejos es recomendable seguir un procedimiento jerárquico en su modelización. Es decir en lugar de intentar abarcar de golpe toda su complejidad empezar por construir un modelo rudimentario que nos ayude a entender mejor el sistema y a identificar los factores relevantes para, a partir de este mejor entendimiento ir complicando gradualmente el primer modelo.

### **2.5.1. VERIFICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN ( A través de un Software)**

Se trata, de determinar si el programa de computador tiene errores o si, por el contrario, trabaja correctamente, en consecuencia las primeras reglas a observar en el proceso de verificación son, en esencia las mismas que tienden a asegurar la corrección de un programa de computador, y hacen referencia a la manera en que se estructura el programa, recomendando para programas largos y complejos organizarlos en módulos o subprogramas con una clara estructura de interrelaciones, de manera que cada uno de ellos pueda verificarse por separado, y la verificación del programa final resultante pueda realizarse paso a paso, añadiendo en cada uno subprogramas previamente verificados. Para modelos de sistemas complejos es recomendable utilizar lenguajes de simulación, en lugar de lenguajes de programación de propósito general, para reducir la longitud del programa y simplificar su estructura.

Una vez comprobado que el programa de computador esta libre de errores de programación hay que establecer si trabaja correctamente o no. Una primera posibilidad puede consistir en ejecutar el programa bajo hipótesis simplificadoras para las cuales sea conocido, o se pueda calcular fácilmente por otros medios, como se comporta el sistema modelizado. Es recomendable ejecutar el programa con diferentes conjuntos de valores de los parámetros del modelo y comprobar si los resultados son razonables o no. Por ejemplo, en muchos casos, los modelos teóricos subyacentes, son modelos de colas que pueden ser colas simples para los submodelos, o redes de colas para el modelo global, bajo hipótesis simplificadoras se pueden obtener soluciones analíticas para los modelos teóricos, soluciones que se pueden contrastar con las del modelo de simulación para determinar hasta que punto los resultados del modelo son razonables. En la referencia ya citada de Kobayashi [12] puede encontrarse una amplia variedad de modelos teóricos del tipo citado.

Uno de los aspectos más importantes de un modelo de simulación es comprobar si reproduce adecuadamente la lógica de los procesos que tienen lugar en el sistema, verificar la corrección con que el programa de computador emula esa lógica es pues otro punto clave de la verificación. Una manera de realizarlo es seguir una traza de la

ejecución del programa. En el caso de los programas de simulación de sucesos discretos una traza de la ejecución del programa consiste en un seguimiento de los estados del sistema simulado, es decir el contenido de la lista de sucesos, los valores de las variables de estado, etc. Tener acceso a esta información después de que ocurra cada uno de los sucesos para compararlo con nuestras previsiones de lo que tenía que ocurrir es una manera de comprobar si el programa, y en consecuencia el modelo del que este es una traducción, opera como es debido o no. La tendencia actual en la mayoría de los lenguajes avanzados para simulación es incluir un «debugger» interactivo que permite al analista parar la simulación en cualquier instante y examinar el estado del sistema, para proceder al seguimiento paso a paso de los cambios de estado.

Finalmente es importante señalar que el desarrollo tecnológico de los computadores, especialmente en lo que se refiere a las técnicas de computación gráfica, ha hecho posible en muchos casos una animación gráfica del proceso de simulación.



## 2.5.2. VALIDACIÓN, VERIFICACIÓN Y CREDIBILIDAD

Un trabajo clásico en la literatura sobre la validación y credibilidad de los modelos de simulación es el debido a Naylor y Finger [53], que plantea una metodología basada en un proceso de tres pasos, aceptada por la mayoría de autores, cuyos ingredientes principales vamos a glosar a continuación.

El primer paso es intentar desarrollar desde el principio un modelo que, de acuerdo con la metodología de la modelización, se enfrente explícitamente al objetivo de ser bueno, es decir válido, y que por lo tanto pueda resultar creíble, es decir razonable, a aquellos que lo han de utilizar. Ello comporta necesariamente involucrar a los usuarios desde el principio, es decir a aquellos que están familiarizados con el sistema y que posteriormente se supone que han de convertir el modelo en el soporte de su proceso racional de toma de decisiones, y mantener esta relación durante todo el proceso de construcción y validación del modelo.

Cuando se trate de construir modelos de sistemas existentes, o similares a los existentes, hay que proceder a la obtención de los datos necesarios para la construcción del modelo. Bien utilizando datos históricos existentes, o datos recogidos durante el proceso de construcción del modelo, cuidando de verificar la corrección de los mismos, es decir la supresión de los posibles errores de recogida.

Siempre que sea posible intentar basar aspectos del modelo en teorías bien establecidas, como por ejemplo las referentes a la independencia de distribuciones de probabilidad, tipos de distribuciones para procesos de llegada o de servicio, etc. Aunque en muchos otros casos será la experiencia o la intuición del analista las que le indicarán que tipo de hipótesis son las más plausibles para describir la operación del sistema, especialmente cuando se trata de un sistema no existente.

El segundo paso consiste en verificar empíricamente las hipótesis en que se basa el modelo. Así, por ejemplo, si de los datos empíricos inferimos un determinado tipo de comportamiento probabilístico para un proceso de llegadas o de servicios, y ajustamos una distribución teórica a dichos datos, hay que verificar adecuadamente la bondad de tal ajuste.

Hay que recordar aquí los comentarios sobre la utilización de distribuciones teóricas y distribuciones empíricas, sin olvidar los errores a que un muestreo incorrecto puede inducirnos, que podría llevarnos a situaciones en que nuestras hipótesis son correctas, las distribuciones correspondientes son consistentes con los datos empíricos, y sin embargo el proceso queda desvirtuado por un procedimiento de muestreo incorrecto.

Un aspecto complementario de este paso es la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad, es decir determinar si los resultados de la simulación cambian significativamente cuando se cambia el valor de un parámetro, una distribución de probabilidad o el grado de detalle de un subsistema.

En caso de identificar que el resultado de la simulación es especialmente sensible a algún aspecto del modelo habrá que tener especial cuidado en la modelización de ese aspecto. Los métodos de diseño de experimentos son especialmente relevantes a la hora de realizar este análisis de sensibilidad.

El último paso del proceso propuesto por Naylor y Finger consiste en determinar cuán representativos son los resultados de la simulación.

En el caso de la simulación de sistemas existentes, o similares a los existentes, este ejercicio puede consistir en la comparación de dos conjuntos de datos, uno procedente del sistema real y otro del modelo que lo simula. Si la comparación de los dos conjuntos de datos resulta ser «aceptable» entonces se puede considerar «válido» al modelo del sistema.

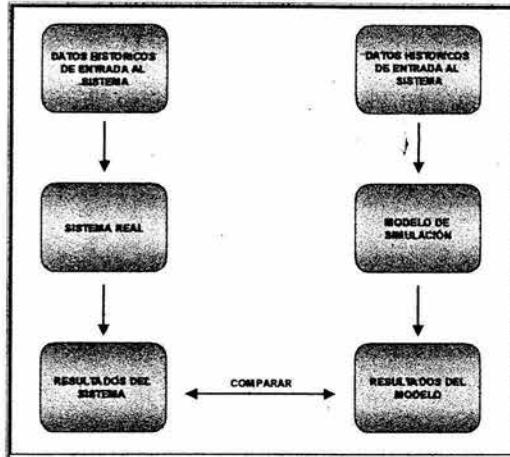
Cuanto mayor sea el grado de aceptabilidad de la comparación, mayor será la confianza que podremos depositar en el modelo. Suele haber una resistencia a construir un modelo de un sistema existente por considerarlo un coste inútil, sin embargo, como Law y Kelton subrayan, los resultados de un modelo no validado pueden ser muy dudosos, especialmente cuando se pretenden extrapolar, y por otra parte, un modelo de un sistema existente puede sugerir maneras de mejorarlo, especialmente cuando se pueden realizar experimentos sobre el modelo de difícil, o imposible, realización sobre el sistema real; el éxito en el esfuerzo de modelar incrementa la credibilidad del estudio, y finalmente no hay que olvidar que un modelo del sistema existente puede ser necesario a la hora de compararlo con las alternativas propuestas. Cuando no existen sistemas similares al propuesto la única manera es recurrir al juicio de los expertos para establecer la

aceptabilidad de los resultados de la simulación. En estos casos el recurso a la animación gráfica suele ser crucial para determinar cuán razonables son.

La comparación entre los datos reales y los simulados no es un proceso sencillo. Law y Kelton proponen varias alternativas: Inspección, Análisis de Intervalos de Confianza basados en datos independientes, y Análisis de Series Cronológicas. Suponiendo que  $\{R_1, R_2, \dots, R_k\}$  son las observaciones del mundo real y  $\{M_1, M_2, \dots, M_k\}$  las procedentes del modelo de simulación, la primera idea a la hora de determinar si el modelo es una representación suficientemente aproximada del mundo real es utilizar alguno de los tests estadísticos clásicos (Mann-Whitney, Chi cuadrada, Kolmogorov-Smirnov, etc.) para determinar si se puede considerar que las dos muestras proceden de la misma distribución, sin embargo, como hemos puesto de manifiesto en el Capítulo 4, la mayor parte de los resultados de una simulación, y podemos añadir, del mundo real, están autocorrelacionados y no son estacionarios, lo que impide la aplicación directa de cualquiera de los tests mencionados.

En su lugar la práctica de la simulación ha llevado a proponer comparaciones directas de las medias, variancias, funciones de correlación, etc., sin recurrir a ningún procedimiento estadístico formal. Este procedimiento es peligroso porque es particularmente vulnerable a la aleatoriedad inherente de los dos sistemas, el real y el simulado. Law y Kelton proporcionan contra ejemplos que ponen de manifiesto las incorrecciones en que se puede incurrir, y proponen una alternativa, la que denominan inspección correlacionada, que permite apreciar mejor la adecuación entre el modelo de simulación y el sistema modelizado. El procedimiento, ilustrado gráficamente en la Figura 5, consiste en esencia en establecer las comparaciones entre el modelo y el sistema alimentando el modelo con los datos históricos en vez de con los generados a partir de las muestras de las distribuciones de probabilidad de entrada.

Figura 5: PROCEDIMIENTO DE INSPECCION CORRELACIONADO



En este caso el sistema y el modelo están sometidos exactamente a las mismas observaciones con respecto a los datos de entrada, lo que debe derivar en una comparación estadísticamente más precisa.

La denominación de inspección correlacionada proviene de que en general los resultados de las estadísticas comparables para el modelo y el sistema estarán correlacionadas positivamente.

## **2.6. DISEÑO DE EXPERIMENTACIÓN**

En general las respuestas que buscamos mediante los experimentos servirán de soporte a una decisión racional sobre el sistema, por lo que nos interesará que las respuestas queden expresadas numéricamente, en términos de los valores de las variables de respuesta que representen las medidas de la utilidad, o del rendimiento esperado, para la alternativa que nos ocupa de diseño o de cambio del sistema.

Es por ello que las pruebas que se apliquen al modelo deben de arrojar información, la cual pueda ser validada con datos conocidos, de tal forma esto se aplica, a pequeñas pruebas, de las cuales serán útiles para que posteriormente, se realicen script de pruebas, las cuales contengan una mayor cantidad de datos.

### **2.6.1 EXPERIMENTACIÓN (EJECUCIÓN DE PRUEBAS)**

En esta etapa se realizan las simulaciones de acuerdo a un diseño previo. Los resultados obtenidos son debidamente recolectados y procesados.

## **2.7. VALIDACIÓN DE LAS PRUEBAS**

En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.

## **2.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS (INTERPRETACIÓN)**

El propósito del análisis de las salidas de un sistema es predecir el desempeño del sistema o comparar entre dos o más alternativas. Debido a la naturaleza estocástica del sistema, las salidas serán aleatorias; esto requiere que los resultados sean tratados estadísticamente. Si el desempeño del sistema se mide en base un parámetro  $q$ , el procesamiento de los resultados de varias simulaciones producirá una estimación  $q_m$  de dicho parámetro. El objetivo del análisis estadístico es determinar la varianza, una

medida del error, de la estimación; o bien, determinar la cantidad de observaciones requeridas para lograr una precisión deseada.

Las técnicas tradicionales de análisis estadísticos se basan en la independencia de los datos.

Sin embargo, para la mayoría de los sistemas los resultados de las simulaciones están correlacionados; por ejemplo, el costo de inventario en una semana dada depende del inventario correspondiente a la semana anterior; el tiempo de espera de una persona en una fila afectará al tiempo de espera de la persona que le sigue.

### 2.8.1. MEDIDAS DE DESEMPEÑO

Considere que para una variable de salida o estado dada (por ejemplo: costos de inventario, longitudes de fila, clientes servidos, tiempos de espera de cada cliente en la fila, etc.), el simulador genera la siguiente secuencia de valores  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ . Antes de tomar una decisión, es necesario procesar estos valores para obtener una estimación del valor medio y una medida del error de esta estimación.

La estimación puntual del valor medio  $\mu_Y$  se hace calculando la media muestral  $Y_m$ ; ésta última, como se planteó en un capítulo anterior, puede ser basada en observaciones o basada en tiempo. Para una muestra compuesta por  $n$  elementos, el promedio basado en observaciones se calcula como sigue:

$$Y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (1)$$

El promedio basado en tiempo, considerando que cada valor  $Y_i$  tiene una duración  $t_i$ , se calcula de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n Y_i t_i \quad (3)$$

En el caso ideal, el estimador  $Y_m$  será no sesgado; es decir, se cumplirá:

$$E(Y_m) = \mu_Y \quad (4)$$

Sin embargo, por lo general el estimador tendrá cierto sesgo  $b$ :

$$E(Y_m) = \mu_Y + b \quad (5)$$

Lo deseable es contar con un estimador sin sesgo, o por lo menos con un sesgo pequeño.

Para la estimación del intervalo de validez se requiere estimar la varianza del estimador

puntual. La varianza real del estimador puntual  $\sigma^2_{Y_m}$  es estimada con el estimador  $S^2_{Y_m}$ .

En el caso ideal, se cumplirá:

$$E(S^2_{Y_m}) = \sigma^2_{Y_m} \quad (6)$$

Sin embargo, por lo general el estimador tendrá cierto sesgo B:

$$E(S^2_{Y_m}) = B\sigma^2_{Y_m} \quad (7)$$

Lo deseable es que B sea igual a 1. Si ambos estimadores ( $Y_m, S^2_{Y_m}$ ) son no sesgados, el siguiente parámetro cumple con la distribución *t* para cierto número de grados de libertad *f*.

$$t_f = \frac{Y_m - \mu_Y}{S_{Y_m}} \quad (8)$$

Por lo tanto, el siguiente intervalo contendrá a  $\mu_Y$  con un nivel de confianza 100 (1- $\alpha$ )%:

$$Y_m - t_{\alpha/2, f} S_{Y_m} \leq \mu_Y \leq Y_m + t_{\alpha/2, f} S_{Y_m} \quad (9)$$

Cuando el tamaño de la muestra *n* es mayor que 30, el siguiente parámetro cumple con la distribución normal:

$$z = \frac{Y_m - \mu_Y}{S_{Y_m}} \quad (10)$$

En este caso, el intervalo de confianza es:

$$Y_m - z_{\alpha/2} S_{Y_m} \leq \mu_Y \leq Y_m + z_{\alpha/2} S_{Y_m} \quad (11)$$

Tanto los valores de *t* y *z* están disponibles en tablas en función de *f* y  $\alpha$ . El mayor problema es obtener un estimador  $S^2_{Y_m}$  no sesgado ya que los valores *Y* están correlacionados.



## 2.8.2. SIMULACIÓN CON TERMINACIÓN

La simulación con terminación, o simulación de estado transitorio, se lleva a cabo hasta un tiempo  $t_F$ , donde F es un evento especificado que detiene la simulación. El sistema simulado "abre" en el tiempo  $t_0$  bajo condiciones iniciales perfectamente especificadas y "cierra" en el tiempo de parada  $t_F$ .

Algunos ejemplos de este tipo de simulación son:

- Un banco abre a las 9:00 ( $t_0$ ) sin clientes y con 8 cajeros trabajando (estado inicial), y cierra a las 14:00 ( $t_F$ ). El analista está interesado en modelar la interacción entre los clientes y los cajeros durante todo el día, incluyendo el arranque y la parada del sistema.
- El analista está interesado en la hora pico del banco; entonces, la simulación se realizará desde las 10:00 ( $t_0$ ) hasta las 11:00 ( $t_F$ ). El estado inicial puede ser especificado de dos maneras. En la primera, a partir de estimaciones del sistema real se determinan la cantidad de clientes y cajeros que deberían estar presentes a las 10:00. En la segunda, el sistema se simula desde el estado inicial original conocido; es decir desde las 9:00 hasta las 10:00 sin recolectar datos. Luego, este estado final se toma como estado inicial de la simulación de la hora pico.
- Se desea estimar el tiempo  $t_F$  en el cual un sistema de comunicaciones sin mantenimiento dejará de funcionar. En el estado inicial todos los equipos son nuevos. El estado final se presentará cuando fallen tanto los equipos principales como los de relevos. En este caso, el tiempo final no se conoce con precisión, sólo se conoce el evento F.

### 2.8.3. ANÁLISIS POR REPETICIÓN

Considere una simulación con terminación que corre en el intervalo  $[t_0, t_f]$  y que produce la siguiente secuencia de valores para una salida  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ . Un caso especial, es cuando sólo se obtiene un valor por simulación; por ejemplo, el tiempo de falla de un sistema de comunicaciones, la duración de una batalla, el resultado de un partido. Se desean estimar  $\mu_Y$  y  $\sigma_{Y_m}^2$ . Para eliminar el problema de la correlación de los datos  $Y$  se aplicará el método de las repeticiones independientes. Este método consiste en repetir  $R$  veces la simulación, utilizando un semilla distinta para generar los números aleatorios, y eligiendo condiciones iniciales independientes (lo que incluye el caso de todas las condiciones iniciales iguales). Sea  $Y_{ri}$  el valor  $i$  de la observación obtenida durante la simulación  $r$  para  $i = 1, \dots, n_r$  y  $r = 1, \dots, R$ . Para un valor fijo de  $r$ , es decir para una simulación dada, los valores  $\{Y_{r1}, Y_{r2}, \dots, Y_{rn}\}$  están autocorrelacionados y persiste el problema para el tratamiento estadístico convencional. Sin embargo para  $r \neq s$ , los  $Y_{ri}, Y_{sj}$  son estadísticamente independientes. Entonces, si para cada simulación  $r$  se calcula la media muestral (ya sea basada en observaciones o en tiempo)  $Y_{mr}$ , estos valores son estadísticamente independientes y, por lo tanto, se pueden aplicar las técnicas estadísticas convencionales.

Aplicando técnicas estadísticas convencionales, se obtienen los siguientes estimadores:

$$Y_m = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R Y_{mr} \quad (12)$$

$$S_{Y_m}^2 = \frac{1}{R} S_{Y_{mr}}^2 = \frac{\sum_{r=1}^R (Y_{mr} - Y_m)^2}{R(R-1)} \quad (13)$$

y el grado de libertad  $f$  es igual a  $R-1$ .

Como ejemplo, suponga que se hacen 4 simulaciones del servicio de mantenimiento de aviones presentado en el capítulo anterior. Para el caso de dos talleres, la utilización media del taller 1 (promedio basado en tiempo) resultó ser 0.808, 0.875, 0.708 y 0.842. Entonces, los estimadores son:

$$Y_m = \frac{0.808 + 0.875 + 0.708 + 0.842}{4} = 0.808 \quad (14)$$

$$S_{ym}^2 = \frac{(0.0808 - 0.808)^2 + (0.875 - 0.808)^2 + (0.842 - 0.808)^2}{4 * 3} = 0.036^2 \quad (15)$$

Para un nivel de confianza de 95% y grado de libertad 3,  $t_{0.025,3} = 3.18$  (obtenido de tabla); entonces, el correspondiente intervalo de confianza es:

$$\mu_y = 0.808 \pm 3.18 * 0.036 \quad (16)$$

Esto es, la utilización media real pertenecerá al siguiente intervalo con un 95% de certeza:

$$0.694 \leq \mu_y \leq 0.922 \quad (17)$$

#### 2.8.4. INTERVALO DE CONFIANZA ESPECIFICADO

Frecuentemente se especifican el error tolerable  $\varepsilon$  y el nivel de confianza  $100(1-\alpha)\%$  deseado para la estimación; entonces, se deberá estimar la cantidad de repeticiones que serán necesarias para alcanzar dicho objetivo. Suponga que inicialmente se realizan  $R_0$  repeticiones (no menos de 4). Con estos resultados se estima  $S_{Y_{mr0}}^2$ . Utilizando la definición del intervalo de confianza, ecuación (9), y la definición de  $S_{Y_m}^2$ , ecuación (13), se obtiene:

$$\frac{t_{\alpha/2, R-1} S_{Y_{mr0}}}{\sqrt{R}} \leq \varepsilon \quad (18)$$

Si se resuelve esta desigualdad, se tiene que  $R$  es el menor número entero que cumple con  $R \geq R_0$  y con:

$$R \geq \left( \frac{t_{\alpha/2, R-1} S_{Y_{mr0}}}{\varepsilon} \right)^2 \quad (19)$$

Debido a que  $t_{\alpha/2, R-1} \geq z_{\alpha/2}$ , una estimación inicial de  $R$  se obtiene con:

$$R \geq \left( \frac{z_{\alpha/2, R-1} S_{Y_{mr0}}}{\varepsilon} \right)^2 \quad (20)$$

Determinado  $R$ , se procederá a realizar  $R-R_0$  simulaciones adicionales. Si el nuevo intervalo de confianza es mayor que el especificado, se deberán repetir los cálculos tomando  $R$  como el nuevo  $R_0$ .

Para el caso analizado en la sección anterior, se desea determinar la utilización media del taller 1 con un error de  $\pm 0.04$  y 95% de certeza. Dado que ya se realizaron 4 simulaciones,  $R_0 = 4$ . Luego se puede estimar  $S_{Y_{mr0}}^2$  como:

$$S_{Y_{mr0}}^2 = R_0 S_{Y_m}^2 = 4 * 0.036^2 = 0.00518 \quad (21)$$

De la ecuación (20), y tomando de tablaz<sub>0,025</sub> = 1.96, surge que  $R$  debe ser mayor que:

$$R \geq \left( \frac{z_{\alpha/2, R-1} S_{Y_{mr0}}}{\varepsilon} \right)^2 = \frac{1.96^2 * 0.00518}{0.04^2} = 12.44 \quad (20)$$

Los posibles candidatos son los números enteros superiores a 12.44. En la Tabla 1 se muestra la evaluación para 13, 14 y 15. Como puede apreciarse,  $R = 15$  es el menor entero que satisface la desigualdad; por lo tanto, en principio serán necesarias  $R - R_0 = 15 - 4 = 11$  simulaciones adicionales para alcanzar la tolerancia requerida. Sin embargo, debido a que  $S_{Y_{mr0}}^2$  fue estimado es necesario verificar que el nuevo intervalo de confianza obtenido con las  $R$  simulaciones es menor que el error tolerado  $\varepsilon$ . Sin esto no es así, entonces se toma  $R$  como el nuevo  $R_0$ , se estima la nueva varianza  $S_{Y_{mr0}}^2$ , y se repiten los cálculos anteriores para estimar la nueva cantidad de simulaciones adicionales. Este procedimiento se repite hasta que el intervalo de confianza sea menor que el error tolerable.

**Tabla 1:** Determinación del nuevo  $R$ .

$R$	13	14	15
$t_{0.025, R-4}$	2.18	2.16	2.14
$\left( \frac{t_{0.025, R-4} S_{Y_{mr0}}}{\varepsilon} \right)^2$	15.40	15.12	14.84

## 2.8.5. SIMULACIÓN SIN TERMINACIÓN

Un sistema sin terminación es un sistema que funciona continuamente; por ejemplo: líneas de ensamblaje, sistema de teléfonos, hospitales, sistemas de computación, etc. Si bien el sistema real funciona continuamente, la simulación necesariamente debe iniciar en un cierto tiempo ( $t_0$ ) y debe terminar en otro ( $t_f$ ). Esto significa que se deberán establecer un estado inicial y un criterio para detener la simulación, la determinación de estos dos factores en forma adecuada todavía está en investigación.

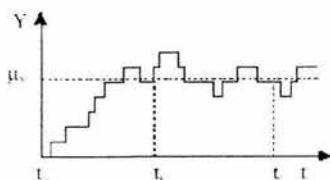
Generalmente, el interés está en el estado estacionario de estos sistemas, el cual no es influenciado por el estado inicial. Sin embargo, cuando se desea estudiar el estado dinámico, el sistema debe ser tratado como un sistema con terminación. Por ejemplo, aunque es cierto que un banco funciona todos los días, si el objeto de estudio es un día de operación incluyendo el arranque y la parada del sistema, se debe considerar el banco como un sistema con terminación. En cambio, si el interés está en otros aspectos del banco, tales como el flujo de dinero, el sistema se debe considerar como un sistema sin terminación. Por lo tanto, si una simulación será o no con terminación depende de tanto los objetivos del estudio como de la naturaleza del sistema.

Considere que se realiza una simulación para estimar el estado estacionario del sistema. Suponga que se obtiene la siguiente secuencia de observaciones  $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ , las cuales generalmente están autocorrelacionadas. El valor medio  $\mu_Y$  de la variable Y en el estado estacionario es definido como:

$$\mu_Y = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (23)$$

con probabilidad 1, y el valor  $\mu_Y$  es independiente del estado inicial del sistema Figura(1).

Figura 1: Determinación del estado estacionario.



Debido a que no es posible realizar una simulación con  $n$  tendiendo a infinito, la misma deberá detenerse para un valor finito de  $n$  o  $t_F$ . Estos valores deberán elegirse cuidadosamente considerando los siguientes aspectos:

- El sesgo del estimador puntual debido al estado inicial artificial o arbitrario. Dicho sesgo será menor mientras más grandes sean los valores elegidos para  $n$  o  $t_F$ . Una simulación demasiado corta puede producir un sesgo severo en el resultado.
- La precisión deseada del estimador puntual, medida por un estimador de la varianza.
- Las restricciones de los recursos informáticos.

## 2.8.6. SESGO DEBIDO AL ESTADO INICIAL

Existen varios métodos para reducir el sesgo producido por el estado inicial sobre las estimaciones en el estado estacionario. El primer método consiste en seleccionar como estado inicial un estado representativo del sistema en funcionamiento continuo. A veces, este método se llama inicialización inteligente. Algunos ejemplos son:

- En un banco, iniciar con la cantidad de dinero, deudas y créditos que debería tener el banco en condiciones de funcionamiento normal.
- En un sistema de comunicaciones, iniciar con la cantidad de componentes fallados que normalmente están presentes.
- En una simulación de tránsito, iniciar con la cantidad y distribución de automóviles que normalmente están presentes.

Para obtener las condiciones de una inicialización inteligente existen por lo menos dos caminos. En el primero, si el sistema existe, se deben recolectar datos del mismo y seleccionar el estado más representativo de su funcionamiento; si el sistema no existe, es posible formular un modelo simplificado resoluble analíticamente, e iniciar la simulación con esta solución.

En el segundo camino, se divide la simulación en dos partes, una de inicialización desde el tiempo  $t_0$  hasta  $t_E$ , seguida por una fase de recolección de resultados desde  $t_E$  hasta  $t_F$ . Esto es, la simulación se inicia en el tiempo  $t_0$  con determinadas condiciones iniciales  $I_0$  y se ejecuta hasta  $t_E$  sin recolectar los resultados porque el único objetivo de esta etapa es hacer que el estado del sistema evolucione desde  $I_0$  hasta otro  $I$  representativo del estado estacionario. En otras palabras, la distribución de probabilidades de las variables en el estado  $I$  es igual a la distribución de probabilidades que ellas tienen en el estado estacionario. El resto del tiempo se utiliza para recolectar los resultados.

La elección de  $t_E$  es crítica, ya que debe ser elegido lo suficientemente grande como para que  $I$  sea en realidad un estado representativo del estado estacionario; pero no muy grande, porque se estaría desaprovechando los recursos informáticos. Si  $t_E$  no es suficientemente grande, se recolectarán datos del estado transitorio que originarán un sesgo en el análisis del estado estacionario. Lamentablemente, no existe un criterio



establecido para determinar la cantidad de datos que se deben eliminar para reducir el sesgo a un nivel aceptable. Los siguientes puntos deben ser considerados cuando se va a elegir  $t_e$ :

- Para detectar el final del estado dinámico se pueden graficar las variables del sistema en función del tiempo. En el estado estacionario la variación de estas variables debe estar dentro de una banda de normalidad. Para hacer más suave las líneas, y así reducir la banda de normalidad, se pueden graficar los promedios de los valores de las R simulaciones correspondientes a cada tiempo o intervalo de tiempo (promedio de ensambles). Debido a que estos promedios siguen la distribución t es posible determinar la banda de normalidad (intervalo de confianza) correspondiente a cada punto, agregarla en el gráfico, y determinar si el gráfico es lo suficientemente preciso o si será necesario realizar simulaciones adicionales. Éste es el método recomendado.
- Un gráfico más suave se puede obtener graficando los promedios móviles de los promedios de los ensambles. La cantidad m de puntos anteriores a tomar para promediar con el valor actual se determina experimentalmente.
- No se recomienda graficar los promedios acumulados (desde  $t_0$  hasta t) debido a que siempre se vuelve más suave a medida que avanza el tiempo, haciendo posible que se confunda el todavía presente estado dinámico con el estacionario.
- Por lo general, el interés está puesto en más de una variable del sistema, como por ejemplo: la longitud de colas, tiempos de espera, utilización de servidores, etc. Lamentablemente, estas variables alcanzan el estado estacionario en distintos tiempos; entonces, es necesario determinar un único  $t_E$  adecuado para todas ellas, este tiempo es determinado por la variable más lenta.

## 2.8.7. ANÁLISIS POR REPETICIÓN PARA EL ESTADO ESTACIONARIO

Cuando el estado estacionario es correctamente determinado, el sesgo de los estimadores es despreciable y puede aplicarse el método de las repeticiones tal como se hizo con los sistemas con terminación. Sin embargo, si el sesgo no fue reducido lo suficiente, el mismo no será eliminado aumentando la cantidad de simulaciones  $R$ . En efecto, el sesgo no es afectado por las repeticiones, y esto originará intervalos de confianza alrededor de un promedio sesgado.

También es posible determinar la cantidad de simulaciones necesarias para alcanzar un intervalo de confianza especificado tal como se hizo con los sistemas con terminación. Sin embargo, experimentalmente se estableció que más de 25 simulaciones no aportan información relevante; en todo caso, se debería volcar el esfuerzo en incrementar  $(t_f - t_e)$  a más de 10  $(t_e - t_0)$ . Este incremento se puede hacer ampliando tanto  $(t_e - t_0)$  como  $(t_f - t_0)$  por el factor  $(R/R_0)$ .

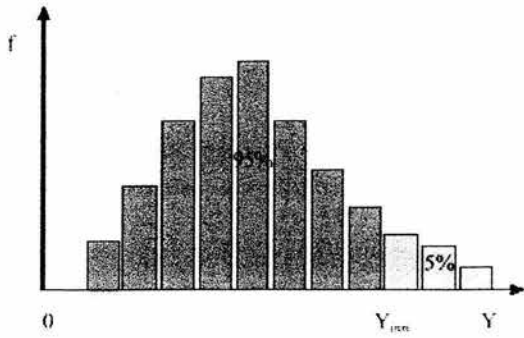
## 2.8.8. HISTOGRAMA

Hasta ahora se estudiaron técnicas que ayudan a estimar el valor medio de  $Y$  ( $\mu_Y$ ) y el correspondiente intervalo de confianza. Sin embargo, esta información no es suficiente para tomar una decisión. Suponga que aplicando estas técnicas se estima que el costo medio anual de reparación de un sistema de comunicaciones es de  $\$10000 \pm 100$  con un 95% de nivel de confianza. El resultado tiene una gran precisión, pero note que esta precisión refiere al valor medio. Lo que se está planteando es que el costo medio anual estará entre  $\$9900$  y  $\$10100$  en el 95% de los casos. Esta información es útil para realizar planes a largo plazo donde los costos realmente se promediarán. Sin embargo, no es de mucha utilidad cuando se está planificando para un único año; en este caso, interesa conocer el intervalo de confianza del costo anual y no del costo anual promedio. La diferencia es importante, mientras el costo anual promedio está limitado al intervalo  $[\$9900, \$10100]$  en el 95% de los casos, no se tiene información alguna sobre la varianza del costo anual. Puede ser que en un año el costo sea  $\$1000$  y que en el siguiente sea  $\$19000$ , el promedio es  $\$10000$  que está dentro de lo esperado; sin embargo, nada hacía suponer que en un año se debería enfrentar un costo de  $\$19000$ . Para obtener la

información faltante es necesario estimar el intervalo de confianza no sólo del costo anual promedio sino también del costo anual.

La estimación de un intervalo de confianza para  $Y$  no es tan simple como la estimación de un intervalo de confianza para  $\mu_Y$  debido a que generalmente no presenta una distribución  $t$  ni normal. La solución más directa para este problema es realizar  $R$  simulaciones independientes y construir un histograma con los datos recolectados  $Y_{it}$ . La determinación de un intervalo con un nivel de confianza  $100(1-\alpha)\%$  se realiza seleccionando el intervalo más crítico (depende del caso) que contenga dicho porcentaje del total del área del histograma. La Figura 2 muestra el histograma del costo anual, el intervalo  $[0, Y_{max}]$  contiene el 95% del área del histograma; por lo tanto, se puede decir que para un año dado el costo anual será menor que  $Y_{max}$  con un 95% de certeza.

Figura 2: Histograma del costo anual  $Y$ .



## 2.9. IMPLANTACIÓN

La última fase de cualquier proyecto de Simulación es su implantación, es decir, su puesta en funcionamiento en el lugar donde desempeñará su labor. Para ello deben afrontarse tareas tan variadas como la carga inicial de los datos con los que trabajará el sistema.

El modelo de simulación debe abordar la fase de implantación atendiendo principalmente a dos criterios: cubrir directamente todas las posibles necesidades derivadas (instalación de máquinas, suministro de software propietario, etc.) y minimizar el impacto de todo el proceso procurando realizarlo en el menor plazo de tiempo y con las menores molestias.

### METODOLOGÍA

Las diferentes tareas que constituyen la implantación de un sistema varían atendiendo fundamentalmente a su propia naturaleza y a la infraestructura actual existente en el lugar de trabajo.

Estas tareas comienzan con la instalación de los equipos necesarios para el funcionamiento del sistema de simulación. Esto supone comprar los equipos que ejecutarán las aplicaciones, instalar sus sistemas operativos y controladores adicionales, crear la infraestructura necesaria o configurar otras plataformas complejas como los servidores de bases de datos y aplicaciones. El precio de los equipos, y de las licencias del software propietario que se instale, constituyen un factor determinante del coste total de esta fase.

Una vez que se dispone de la infraestructura, porque ya existiese, se pasa a la instalación de las aplicaciones desarrolladas a medida. Este proceso supone, además, optimizar el funcionamiento de los servidores y equipos para que se adapten mejor a los nuevos programas. Por último, y con el objetivo de ahorrar tiempo, las dos últimas fases de la implantación se realizan de forma paralela. Por un lado, un grupo de técnicos aborda la complicada labor de migrar la información desde sistemas antiguos hacia los nuevos, cargando además los datos con valor inicial. Mientras tanto, otro grupo de profesionales se encarga de formar a los futuros usuarios del sistema explicándoles personalmente como deben realizar su labor y aportando manuales para asegurar una total comprensión.

## **2.10.DOCUMENTACIÓN**

En los procesos de simulación se debe de conceder una gran importancia al proceso de formación de los usuarios o clientes del sistema de simulación, con la finalidad de que puedan entender lo que se está realizando y de la información que arroje el modelo . De nada sirve disponer de una aplicación muy completa si las personas que trabajen con él sólo van a utilizar un porcentaje bajo de sus posibilidades.

La creación de manuales completos y amenos, así como la organización de diferentes seminarios, permiten que todos los usuarios(clientes) tengan claro que pueden hacer con sus equipos informáticos y hasta donde pueden llegar con los programas de simulación con que cuentan.

## **2.11. COSTOS**

Uno de los factores determinantes a la hora de afrontar la creación de un sistema de simulación es su coste y sus posibilidades de amortización en un corto plazo de tiempo.

Es por ello que se debe de adaptar las soluciones a la capacidad económica del cliente o a sus posibilidades de inversión en este contexto.

Por otra parte, los modelos de aplicación utilizados, que se encuadran en los estándares de la industria, permiten abordar la creación de un sistema por fases de tal forma que, al principio, sólo disponga de algunas funcionalidades básicas y con el paso del tiempo se realicen nuevas inversiones que aumenten sus posibilidades.

En cualquier caso, la metodología de trabajo expuesta ayuda a disminuir el número de horas empleadas en la construcción de un sistema de lo que se derivan una competitividad.

## 2.12. CONCLUSIONES

Un sistema es un conjunto de objetos con relaciones internas entre los propios objetos y entre sus atributos. Un sistema no está limitado a objetos reales o físicos, sino que puede aplicarse a fenómenos abstractos, como por ejemplo la economía, la sociología. El concepto de sistema puede aplicarse a la física, biología, medicina, etc. Todos los sistemas son, de alguna manera, sistemas de flujo de información, energía o materia. Este intercambio constituye las relaciones de todo sistema.

Existen cuatro pasos en el modelado de las entradas:

1. Recolección de datos del sistema real.
2. Identificación de la distribución de probabilidad que mejor representa a la entrada.
3. Determinación de parámetros.
4. Evaluación de la distribución y de los parámetros.

Con los datos de entrada obtenidos, es necesario para nuestro modelo de simulación, establecer las distribuciones y sus parámetros, ya que ellos nos permitirán realizar la replica de los procesos que se tienen contemplados para la simulación.

El siguiente paso es la realización del modelo que se va a utilizar, por ello, podemos decir que la definición de un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea. Usualmente, su propósito es ayudar explicar, entender o mejorar un sistema (Shannon, 1988). Los modelos son útiles para, el pensamiento, la comunicación, el entrenamiento y la instrucción, la predicción y la experimentación. Los pasos sugeridos para este proceso son:

1. Establecer una definición clara de los objetivos.
2. Analizar el sistema real.
3. Dividir el problema del sistema en problemas simples.
4. Buscar analogías.
5. Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
6. Determinar las variables de interés.
7. Escribir los datos obvios.

8. Escribir las ecuaciones teóricas o empíricas que describen los fenómenos presentes y relacionan las variables de interés.

Posterior al planteamiento del modelo es necesario realizar la validación del modelo esto es, la primera fase de validación implica, en consecuencia, determinar si de todos los aspectos del sistema que hemos incorporado al modelo que son de real interés para el estudio que nos ocupa, y hemos dejado fuera aquellos que podemos ignorar sin consecuencias para nuestro estudio, o no hemos considerado alguno que puede influir en el comportamiento del sistema cuyo estudio pretendemos.

Una vez comprobado que el programa de computador esta libre de errores de programación hay que establecer si trabaja correctamente o no. Una primera posibilidad puede consistir en ejecutar el programa bajo hipótesis simplificadoras para las cuales sea conocido, o se pueda calcular fácilmente por otros medios, como se comporta el sistema modelizado.

El propósito del análisis de las salidas de un sistema es predecir el desempeño del sistema o comparar entre dos o más alternativas. Debido a la naturaleza estocástica del sistema, las salidas serán aleatorias; esto requiere que los resultados sean tratados estadísticamente.

A través de pruebas previamente realizadas podemos verificar la validación de la información estadística que arroja nuestro modelo, de tal forma que podemos verificar que el sistema sea el correcto y cumpla con las especificaciones planteadas desde un principio.

Ya que se hayan cumplido con todos los pasos de exige la metodología planteada es muy importante considerar la implantación del modelo, así como los costos que traerán las modificaciones que se tengan que utilizar para implementar los cambios reales a los cambios al optimizar los proceso (en el área de la metalurgia o de servicios).

## CAPITULO 3

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA PROMODEL

#### 3.1. INTRODUCCIÓN.

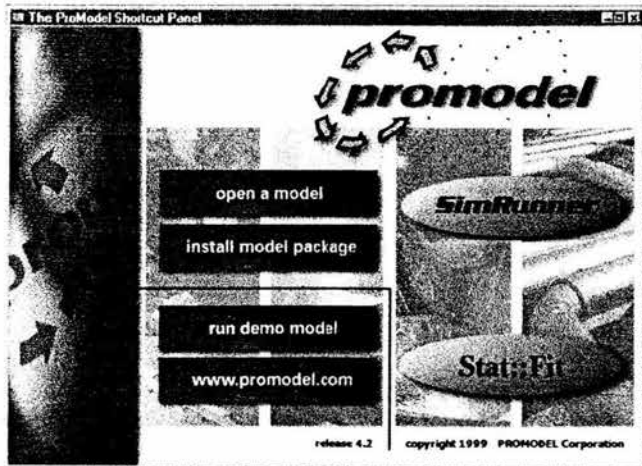
Es importante que dentro de los proceso de simulación, se cuenten con herramientas, que permitan realizar en periodos cortos de tiempo, replicas de procesos de simulación, de tal forma que sean clave importante en la mejora continua de los procesos, tanto en áreas metalúrgicas como de servicios; por ello es muy importante buscar el software apropiado que apoye a esta área de la simulación, ya que los cambios técnicos y tecnológicos que existen constantemente permiten eficientar los procedimientos en diferentes áreas de la producción.

Actualmente se realizó un estudio de los mejor software con los que se cuentan, de los cuales se tiene a **Promodel**, esta herramienta además de representar imágenes graficas, proporciona un fácil y rápido aprendizaje en su programación. Permitiendo que ha diferencia de otros software, su manejo se mas rápido, más eficiente así como ser mejor que los demás por gráficos y por la información estadística que arroja.

Esta herramienta cuenta además con sub módulos que permiten a través de información externa, un análisis de los datos proporcionando, una lista de las funciones de distribución así como los parámetros que mas se le aproximen, además se pueden utilizar técnicas heurísticas que permiten la optimización del modelo.

Promodel es una herramienta de simulación para el modelado de varios procesos de manufactura y sistemas de servicios. Además de sistemas de manufacturas también considera, procesos de compras, transferencias, líneas de transporte, masas de producción, líneas de ensamblado, sistemas flexibles de manufactura, grúas, sistemas justo a tiempo; estos procesos pueden ser modelados a través de Promodel; otros proceso que pueden ser desarrollados con esta herramienta son: Servicios de hospital, centros de llamadas, operación de almacenes, sistemas de transporte, departamentos de almacenes, sistemas de información, servicios a clientes, procesos de negocios.

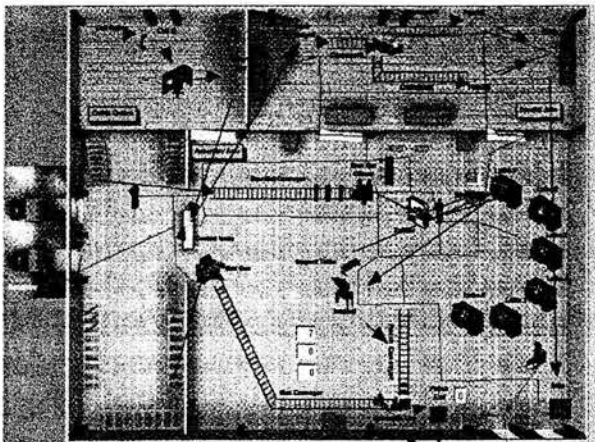
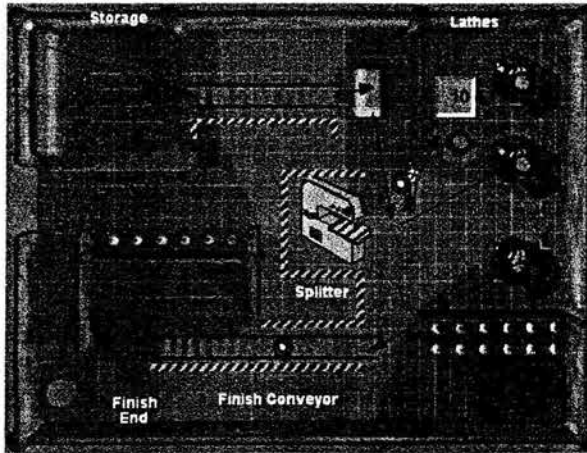




Promodel es una herramienta muy poderosa en manos de la ingeniería, dando varias alternativas de diseño, ideas y mapas de procesos antes de su implementación, así como mejoras en los sistemas ya existentes o en el diseño de nuevos sistemas (un nuevo modelo), proporcionando información de varias operaciones estratégicas y control de alternativas que pueden ser comparadas y analizadas.

### 3.2. MODELOS DESARROLLADOS EN ESTE PROGRAMA

Esta herramienta permite que muchas personas usen la simulación en la predicción exacta de procesos y provee sistemas desarrollados para el modelado de locaciones actuales (es decir, una planta industrial, un lobby de un banco, una sala de emergencias) o procesos abstractos (es decir, procesos abstractos), lanzando varias pruebas con diferentes escenarios, los cuales pueden permitir obtener una opción óptima que conduzca a la mejor operación.



Promodel es una excelente herramienta para la toma de decisiones la cual contiene sub herramientas que agregan una mayor precisión en la toma de decisiones o para construir el modelo a simular.

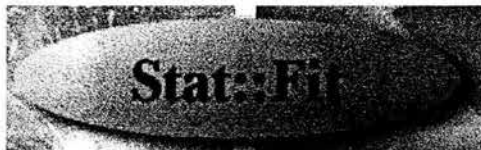
Promodel cuenta con las siguientes sub herramientas:

- **Stat:Fit**
- **SimRunner**

## 3.2. HERRAMIENTAS DE PROMODEL

### 3.2.1. STAT:FIT

El **Stat:Fit** puede ser usado para el análisis de entrada de información así como el para el ajuste de distribuciones proporcionando también sus parámetros, las distribuciones pueden ser continuas o discretas. Si existe información, que sea mayores a 24 datos esta herramienta puede dar las distribuciones que se acercan mas a los datos indicados.



### 3.2.2. SIMRUNNER

*SimRunner* es un software que permite realizar un análisis de la simulación, ayuda a encontrar el algoritmo óptimo para el modelo que se desea diseñar. Este software arroja un informe optimizado que contiene datos los cuales describen la conducta de cada valor que supervisó y la mejor solución hallada. Por su conveniencia *SimRunner* permite utilizar la información que se genera en esta herramienta a través de un texto con los datos necesarios para poder utilizar dichos reportes.

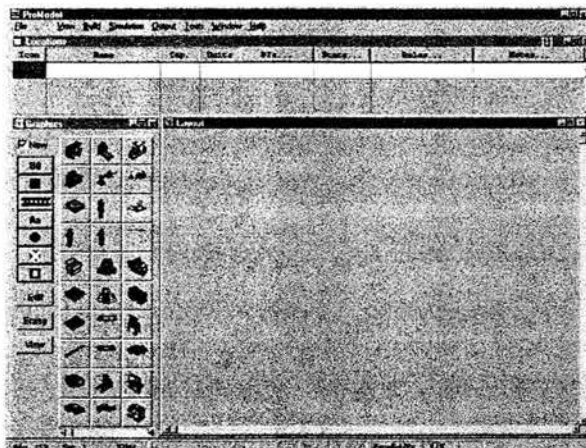


### 3.3. PROGRAMANDO CON PROMODEL

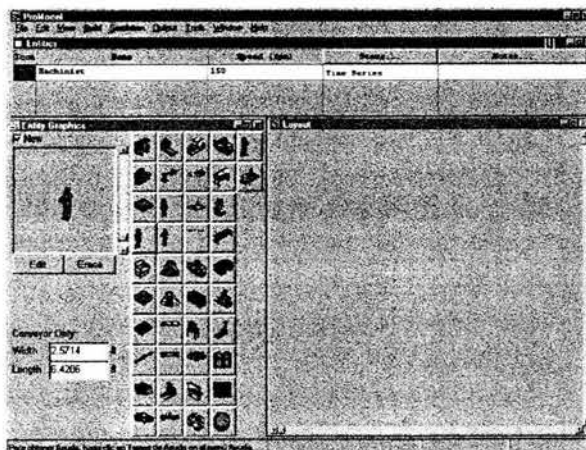
Promodel es una herramienta muy noble, la cual permite de una manera muy sencilla programar un modelo de simulación, de acuerdo con la lógica del sistema permite llevar de la mano al usuario por el menú de opciones.

#### 3.3.1. PASOS PARA PROGRAMAR EN PROMODEL

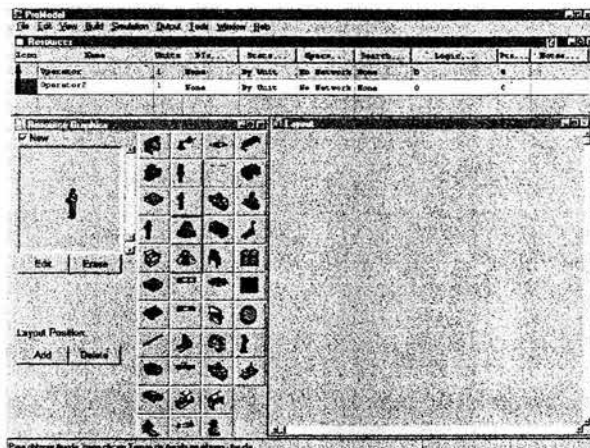
Definición de Localidades. En esta parte se definen las áreas que participan en la simulación.



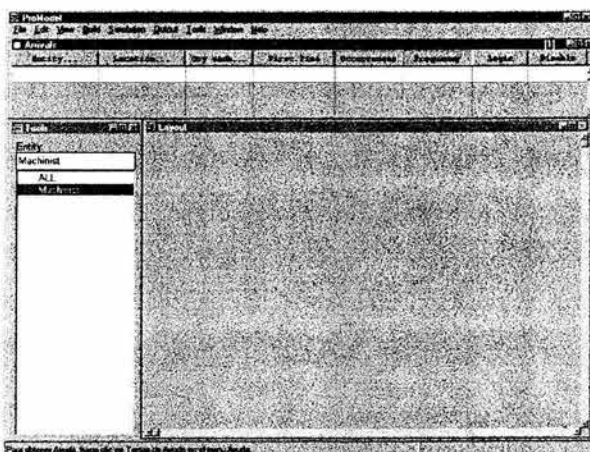
- Definición de Entidades. Son los productos o materia prima que de acuerdo con un proceso de transformación se convierten en un producto.



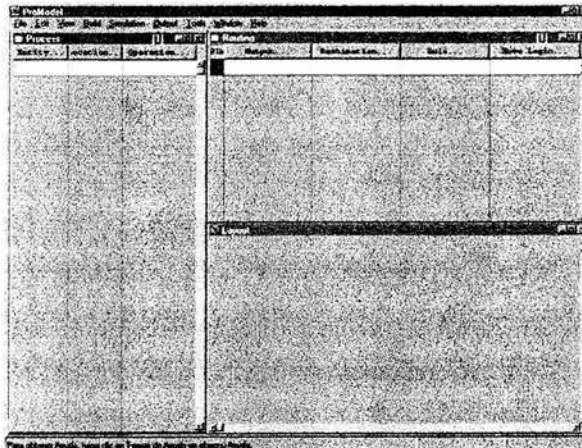
- Definición de Recursos. En esta parte se define los recursos utilizados para realizar una actividad.



- Arribos. En esta parte se definen, las llegadas de las materias primas, así como las cantidades y las veces en que se surte el material.



- Procesos. En esta parte del software se programa el código necesario para realizar la simulación, en el cual se le indica al programa todos los pasos para la fabricación de un producto, el tiempo de espera entre cada proceso y el tiempo de la simulación.



- Reporte de la información. En esta parte se analiza la información que arroja el modelo de simulación, al terminar el tiempo de la ejecución.

General Report  
 Output from C:\pyrthree\Laboratorio - Simulacion\Lab 3\Lab3-3bis.MOD (Poly Furniture F  
 Date: Nov/17/2003 Time: 06:43:15 PM

Scenario : Normal Run  
 Replication : 1 of 1  
 Simulation Time : 10 hr

---

LOCATIONS

Location Name	Scheduled Hours	Capacity	Total Entries	Average Minutes Per Entry	Average Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Util
Llegadas	10	999999	61	255.762984	26.0026	53	53	0.0
Corta	10	1	8	74.000000	0.906667	1	1	98.8
Torno	10	1	30	18.881400	0.94407	1	1	94.8
Pintura	10	1	29	19.290621	0.93230	1	1	93.2
limacon	10	1	27	5.000000	0.225	1	0	22.5
Horneado	10	1	28	19.851786	0.926417	1	1	92.6

LOCATION STATES BY PERCENTAGE (Multiple Capacity)

Location	Scheduled	% Partially	% Full
		%	%

### 3.4. CONCLUSIONES

Las herramientas actuales que se tienen para poder duplicar procesos, a través de la simulación son muy variados, de los cuales podemos separarlos de acuerdo con el tipo de simulación que se desea realizar, estos se dividen en simuladores, financieros, procesos metalúrgicos o de servicios, es por ello que de acuerdo con el objetivo planteado en esta tesis, se desea desarrollar simulación de procesos dentro del ramo de servicios y metalurgia.

Es por ello, que podemos decir, que el software llamado Promodel, cumple con las necesidades planteadas para el desarrollo del tipo de simulación con que se desea trabajar.

Por otro lado se puede decir que dicho software es uno de los mejores programas de simulación con los que se cuenta actualmente, ya que proporciona herramientas útiles y que facilita el trabajo en el código de programación, el cual está definido de acuerdo al modelo de simulación con el que se trabajará, otra ventaja de este sistema es que se cuenta con sub herramientas de análisis de información, en donde se permite ingresar datos externos automáticamente, los cuales generan un análisis estadístico muy completo, así como funciones de distribución, las cuales permitirán contar con el algoritmo matemático que representa el proceso que se esta tratando de duplicar.

Se cuenta también con graficas de desempeño, las cuales califican el porcentaje de utilización de cada localidad, cada localidad representa un proceso de fabricación o de atención a los clientes dentro del proyecto de simulación.

Tanto para el programador como para el dueño del proceso (cliente), el programa les permite representar gráficamente el proceso de simulación que se esta realizando, siendo una forma muy amigable para poder explicar como es la forma actual de trabajo y como mejorarían los proceso si se tuvieran cambios en la operación, con esto permite tomar decisiones antes de implantar dicho sistema.



Promodel a partir de contar con un modelo de simulación ya generado, evalúa la optimización del proceso productivo, generando un reporte, el cual proporciona el óptimo algoritmo para la optimación de la operación, así como un análisis de sensibilidad y el número de replicaciones necesarias para poder evaluar el modelo de simulación.

El software permite validar niveles, que de una forma normal no se podían ver, ya que en la simulación de un proyecto muy grande, al momento de unir los procesos con todas las áreas que participan, en la producción de un artículo o para dar un servicio, no se podría darse cuenta en donde se está desperdiciando la capacidad producción de alguna área, o en donde se podría generar procesos inoperantes.

Al mismo tiempo se puede realiza un pre-análisis de los procesos ayudando a generar todas las pruebas necesarias para identificar el sesgo inicial, determinar el tiempo apropiado para correr la simulación, y mejorar la exactitud en el rendimiento del modelo.

## CAPITULO 4

# ANÁLISIS, DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Para poder iniciar un proyecto de simulación, es necesario contar con toda la información relacionada con los procesos que participarán en el diseño del sistema a simular; esto permitirá elaboración claramente un modelo de simulación con mayor exactitud, el cual describirá los pasos a seguir para la fabricación de un producto o para realizar un proceso de servicio.

El objetivo principal de este capítulo, es poner en practica la metodología descrita en los capítulos anteriores, utilizando además un software, el cual ayudará a diseñar un modelo de simulación, el cual tiene como primer objetivo simular los diversos procesos con los que se cuentan en un caso de estudio y en segundo lugar, dar una propuesta de mejoramiento en los procesos productivos.

Para poder realizar un modelo de simulación, para el caso de "Creaciones Deportivas B", es necesario considerar toda la información que se pueda tener de los diferentes procesos que se realizan en la fabricación, esto es, tomando en cuenta los tiempos que tarda cada pieza al ser modificada por un proceso de producción, los tiempos muertos y la mano de obra necesaria para poder operar el equipo.

De acuerdo con la metodología propuesta en esta tesis se considerará:

- Definir todo el proceso de operación, entradas, salidas y mano de obra
- Tomar los tiempos de fabricación de los productos
- La formulación del modelo de simulación
- La implementación de un software que permita implementar el modelo de simulación
- La validación del modelo de simulación, de acuerdo con los script de pruebas

previamente diseñados

- Realizar diversas pruebas de experimentación
- Analizar los resultados arrojados por el modelo de simulación

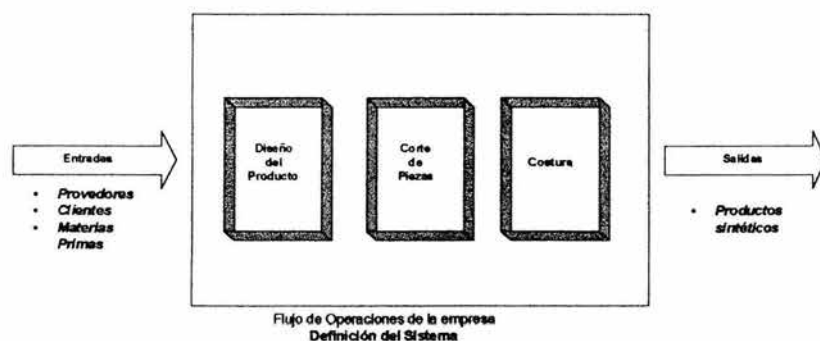
Al finalizar el proyecto de simulación se dará un reporte de la operatividad de los procesos productivas, así como una propuesta de mejoramiento, así como los costos generados por la simulación.

## 4.2. DESARROYO DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN

### 4.2.1. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

El objetivo del siguiente proyecto, es simular la operación en la fabricación de productos del ramo textil , tales como son bolsas de nailon (bolsas mil usos).

Con el modelo de simulación que se desea implantar permitirá la Optimización de los procesos productivos.



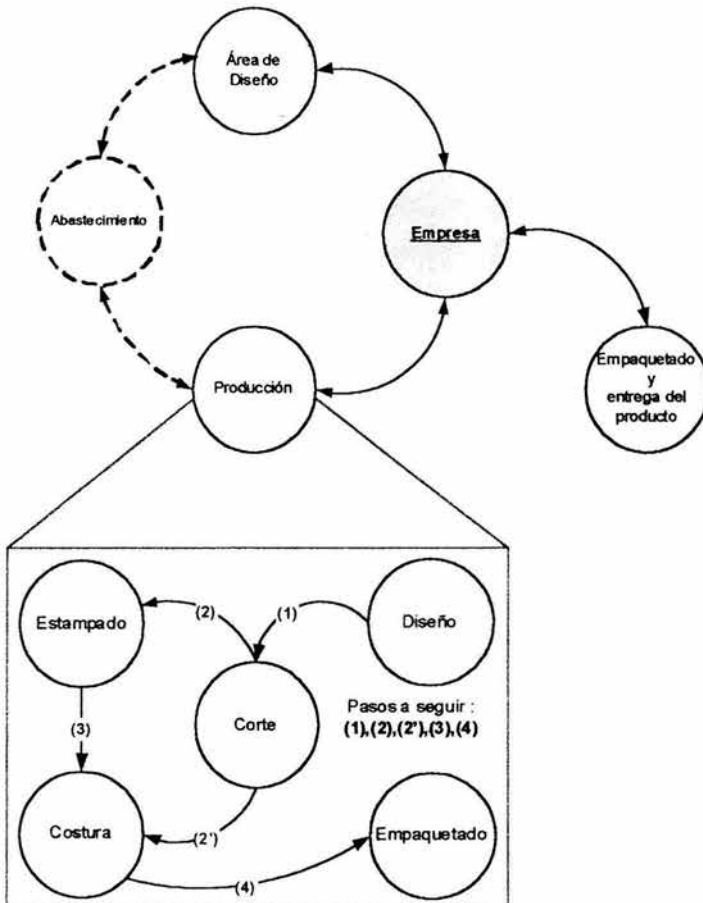
La empresa familiar "Creaciones Deportivas B" productora de artículos de tipo textil, deportivos y escolares, fue fundada en 1930 en México D.F., por el padre de los hermanos Barona, que fue uno de los primeros talabarteros que fabricaban artículos de piel (portafolios, carteras, etc), con el transcurso de los años, se fueron actualizando los artículos (mochilas deportivas, escolares y artículos varios) y la materia prima que utilizaban, hasta ocupar materias sintéticas (nailon, algodón, satín, etc) para la fabricación de sus productos.

La empresa esta constituida por varias áreas las cuales, se responsabilizan del trabajo que les corresponde, con el objetivo de terminar el producto solicitado.

La compañía se compone del área de Abastecimiento de la materia prima, diseño, corte y producción. Las áreas de Diseño, Corte y Abastecimiento está a cargo del Ingeniero de

Diseño. El área de producción es responsable son los dueños, ya que ellos, también trabajan en la producción de los artículos.

El proceso de producción de la empresa así como las áreas en que se conforma, se puede ver de la siguiente forma:



En la fabricación de los diversos productos que se fabrican en la empresa, se considerará, el proceso de fabricación de Bolsas de hailon, este producto al igual que los productos deportivos y escolares, tienen que pasar por las diferentes áreas de la empresa y tienen su particularidad para ser fabricadas.

El proceso de fabricación para productos de nailon (Bolsas de mil usos), lo podemos describir de la siguiente forma:

#### **Paso 1**

Se inicia con el diseño del producto (esta área trabaja de acuerdo a las necesidades del cliente, proporcionando diseños innovadores o en su caso el diseño que el cliente ya tenga en mente).

#### **Paso 2**

Posteriormente se continua con el abastecimiento de la materia prima, en este caso, el material requerido será: Forro de propiletileno, hilo de nailon, remaches y asas de plástico.

#### **Paso 3**

A continuación se realiza el corte de las piezas, que se utilizarán en fabricación del artículo.

#### **Paso 4**

En este paso se cosen las piezas, dándoles la forma requerida para posteriormente ensamblarlas.

#### **Paso 5**

El ensamble de las piezas, así como, remachar las bolsas fabricadas para agregarles las asas.

#### **Paso 6**

Proceso de calidad del producto (en este paso se verifica que el producto cumpla con las condiciones necesarias para poder ser vendida y garantizar que el producto pueda ser competitivo).

**Paso 7**

El proceso de empaque del producto y su entrega.

#### 4.2.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de producción, que vienen ha ser a partir de los paso 4 y 5, antes mencionados:

No.	TIEMPOS DE FABRICACIÓN									
	Paso 4.1/ Seg.	T. de espera/ Seg.	Paso 4.2/ Seg.	T. de espera/ Seg.	Paso 5.1/ Seg.	T. de espera/ Seg.	Paso 5.2/ Seg.	T. de espera/ Seg.	Paso 5.2/ Seg.	T. de espera/ Seg.
1	5	2	8	8	3.15	24	30			
2	6	2	9	11	2.02	37	35			
3	5	2	8	20	3.3	124	30			
4	6	2	8	6	2.42	40	37			
5	5	2	6	6	2.56	31	30			
6	4	2	8	10	1.56	45	50			
7	5	2	11	5	3.07	34	35			
8	6	2	7	17	2.44	27	33			
9	5	2	7	7	2.29	51	30			
10	9	2	6	10	2.39	90	20			
11	6	2	9	17	2.33	56	45			
12	6	2	8	4	2.2	44	26			
13	7	2	8	6	2.2	34	30			
14	7	2	8	4	2.02	38	29			
15	6	2	7	18	2.17	33	30			
16	5	2	8	8	2.09	28	41			
17	5	2	7	7	2.05	41	50			
18	9	2	7	6	2.09	34	36			
19	6	2	4	7	2.49	55	30			
20	5	2	6	4	1.55	44	35			
21	9	2	6	13	2.33	37	32			
22	6	2	5	11	2.12	8	32			
23	5	2	6	5	2.22	25	30			
24	7	2	60	7	2.02	34	30			
25	6	2	7	15	2	28	30			
26	5	2	6	5	2.08	41	41			
27	5	2	15	4	2.04	34	50			
28	5	2	10	13	2	41	36			
29	6	2	8	10	3.3	40	30			
30	5	2	9	5	2.42	31	50			



No.	Paso 4.1/Seg	T. de espera/Seg	Paso 4.2/Seg	T. de espera/Seg	Paso 5.1/Seg	T. de espera/Seg	Paso 5.2/Seg	T. de espera/Seg	Paso 5.2/Seg
31	4	2	8	17	2.56	45	35		
32	5	2	8	7	1.56	34	33		
33	6	2	6	10	3.07	27	30		
34	5	2	8	17	2.44	51	20		
35	9	2	7	4	2.29	90	45		
36	6	2	6	6	2.39	56	26		
37	6	2	15	4	2.33	44	30		
38	7	2	8	18	2.2	34	29		
39	7	2	7	8	2.2	38	30		
40	6	2	8	7	2.02	33	41		
41	5	2	7	6	2.17	28	30		
42	5	2	7	7	3.3	41	50		
43	9	2	4	4	2.42	40	35		
44	6	2	6	10	2.56	31	33		
45	5	2	6	5	1.56	45	30		
46	9	2	5	17	3.07	34	20		
47	6	2	6	7	2.44	27	45		
48	5	2	61	10	2.29	51	30		
49	7	2	7	17	2.39	90	50		
50	6	2	6	4	2.33	56	35		
51	5	2	15	6	2.2	44	33		
52	5	2	6	4	2.2	40	30		
53	5	2	8	18	2.02	31	20		
54	6	2	7	8	2.17	45	45		
55	5	2	6	7	2.09	34	26		
56	4	2	15	6	2.05	27	30		
57	5	2	8	7	2.09	51	29		
58	6	2	7	4	2.49	90	30		
59	5	2	8	13	1.55	56	41		
60	6	2	7	11	2.33	44	32		

### 4.2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La información estadística arroja a través de Excel fue la siguiente:

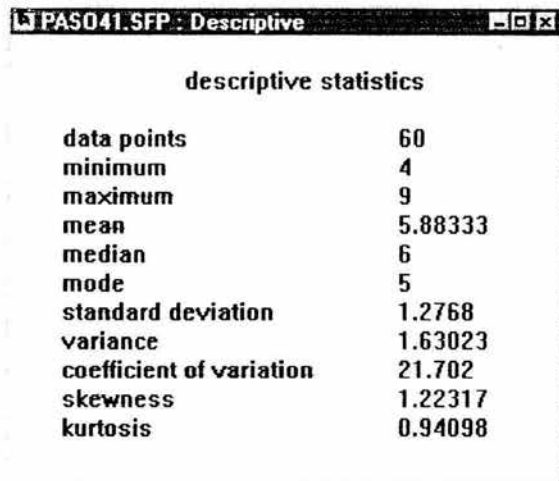
<b>Paso 4.1</b>	
Media	5.8833
Error típico	
Mediana	6.0000
Moda	5.0000
Desviación estándar	1.2768
Varianza de la muestra	1.6302
Curtosis	1.2781
Coefficiente de asimetría	1.2868
Rango	5.0000
Mínimo	4.0000
Máximo	9.0000
Suma	353.0000
Cuenta	60.0000
Nivel de confianza(95.0%)	0.3298

<b>Paso 5.1</b>	
Media	2.2950
Error típico	0.0526
Mediana	2.2100
Moda	2.2000
Desviación estándar	0.4078
Varianza de la muestra	0.1663
Curtosis	1.0846
Coefficiente de asimetría	0.7431
Rango	1.7500
Mínimo	1.5500
Máximo	3.3000
Suma	137.7000
Cuenta	60.0000
Nivel de confianza(95.0%)	0.1054

<b>Paso 4.2</b>	
Media	9.4167
Error típico	1.2717
Mediana	7.0000
Moda	8.0000
Desviación estándar	9.8502
Varianza de la muestra	97.0268
Curtosis	24.0194
Coefficiente de asimetría	4.8815
Rango	57.0000
Mínimo	4.0000
Máximo	61.0000
Suma	565.0000
Cuenta	60.0000
Nivel de confianza(95.0%)	2.5446

<b>Paso 5.2</b>	
Media	33.9333
Error típico	1.0120
Mediana	31.0000
Moda	30.0000
Desviación estándar	7.8392
Varianza de la muestra	61.4531
Curtosis	0.0170
Coefficiente de asimetría	0.6497
Rango	30.0000
Mínimo	20.0000
Máximo	50.0000
Suma	2036.0000
Cuenta	60.0000
Nivel de confianza(95.0%)	2.0251

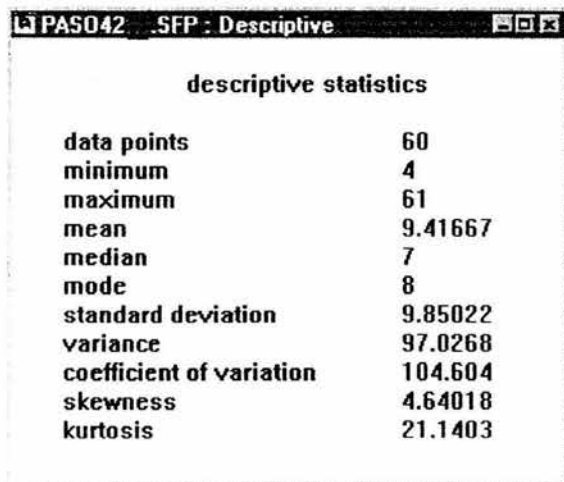
La información obtenida a través de Promodel es:



The screenshot shows a window titled "PAS041.SFP : Descriptive" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). The main content area displays the following descriptive statistics:

descriptive statistics	
data points	60
minimum	4
maximum	9
mean	5.88333
median	6
mode	5
standard deviation	1.2768
variance	1.63023
coefficient of variation	21.702
skewness	1.22317
kurtosis	0.94098

Paso 4.1.



The screenshot shows a window titled "PAS042.SFP : Descriptive" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). The main content area displays the following descriptive statistics:

descriptive statistics	
data points	60
minimum	4
maximum	61
mean	9.41667
median	7
mode	8
standard deviation	9.85022
variance	97.0268
coefficient of variation	104.604
skewness	4.64018
kurtosis	21.1403

Paso 4.2.

descriptive statistics	
data points	60
minimum	1.55
maximum	3.3
mean	2.295
median	2.21
mode	2.055
standard deviation	0.407816
variance	0.166314
coefficient of variation	17.7697
skewness	0.706341
kurtosis	0.769134

Paso 5.1.

descriptive statistics	
data points	60
minimum	20
maximum	50
mean	33.9333
median	31
mode	30
standard deviation	7.8392
variance	61.4531
coefficient of variation	23.1018
skewness	0.617589
kurtosis	-0.179186

Paso 5.2.

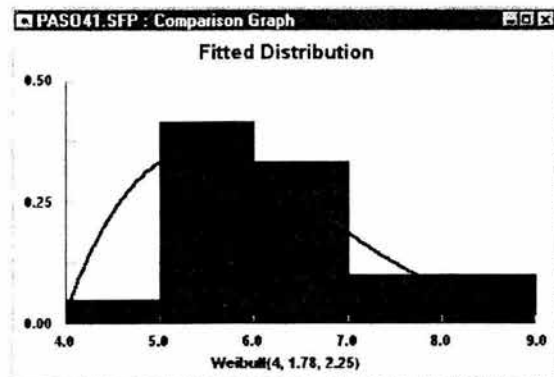
A continuación se muestra las funciones de distribución que más se aproximan a la información de los pasos 4.1, 4.2, 5.1 7 5.2:

Funciones de Distribución para el paso 4.1.

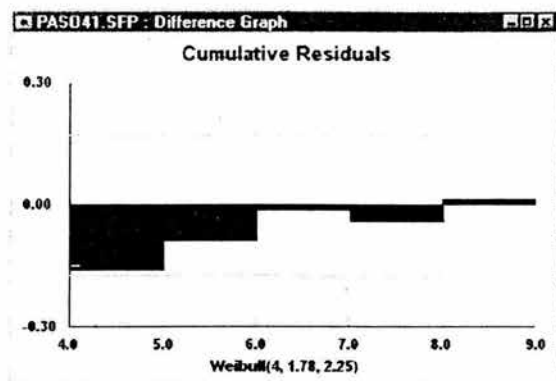
distribution	rank
Weibull(4, 1.78, 2.25)	65.2
Triangular(3, 9.76, 4.92)	5.76
Beta(4, 2.23e+04, 3.23, 3.6e+04)	0.379
Erlang(4, 5, 0.377)	0
Gamma(4, 4.93, 0.382)	0
Log-Logistic(4, 3.13, 1.64)	0
Exponential(4, 1.88)	0
Pareto(4, 2.74)	0
Inverse Gaussian(4, 7.18, 1.88)	0
Pearson 6(4, 0.0698, 90.1, 4.18)	0
Lognormal(4, 0.528, 0.538)	0
Uniform(4, 9)	0
Pearson 5(4, 4.06, 6.06)	0

Podemos observar, que las funciones de distribución que más se aproximan a los datos obtenidos para el paso 4.1:

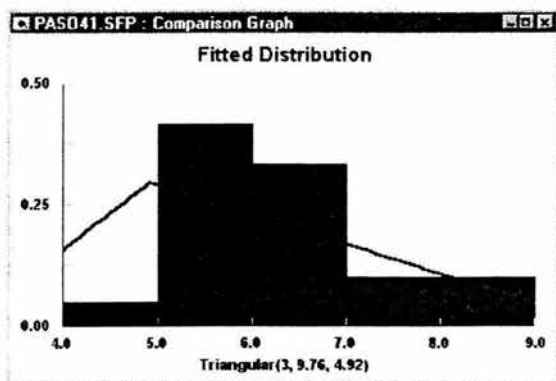
- La distribución Weibull con parámetros shape value (valor de la forma) = 4, scale value (valor de la escala) = 1.78, stream (flujo) = 2.25.



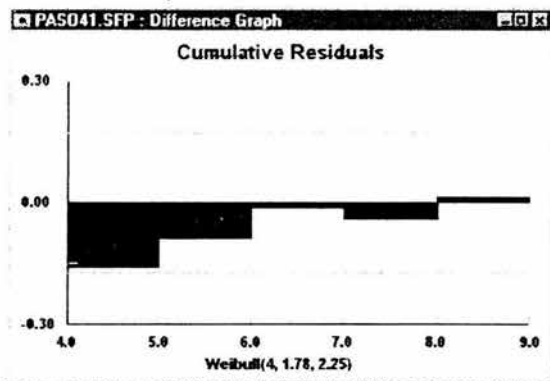
Sus residuos acumulativos son:



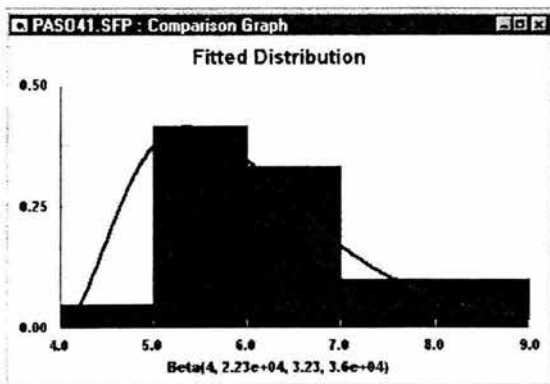
- La distribución Triangular con parámetros minimum (valor mínimo) = 3, mode (moda) = 9.76, maximum (valor máximo)= 4.97



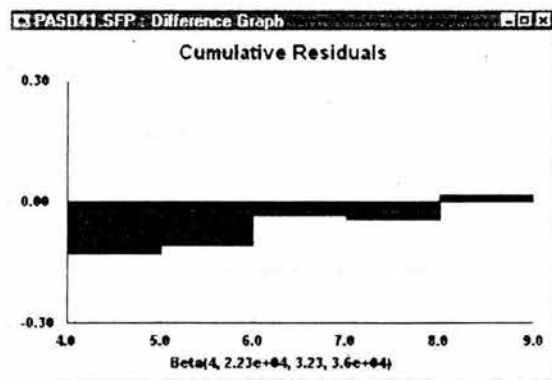
Sus residuos acumulativos son:



- La distribución Beta con parámetros shape 1(forma 1) = 4, shape 2 (forma 2) =  $2.23e+04$ , lower bound (límite bajo) = 3.23, upper bound (límite superior) =  $3.6e+04$ .



Sus residuos acumulativos son:



En este caso, la mejor función de distribución que podemos aplicar para nuestro modelo de simulación, es la *distribución Weibull*, ya que es la función que más se aproxima al comportamiento de nuestros datos.

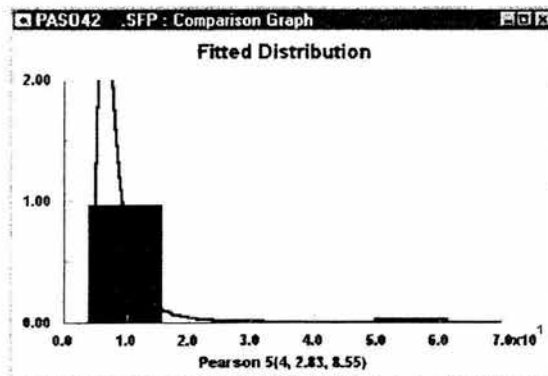


## Funciones de Distribución para el paso 4.2.

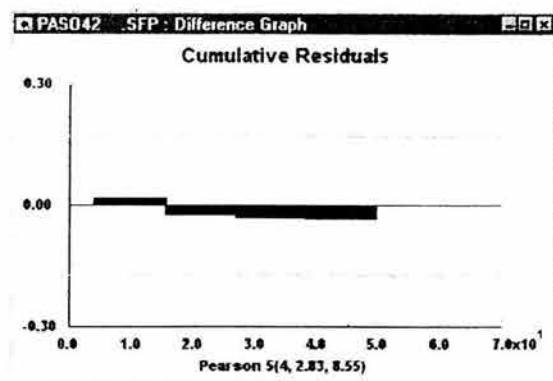
distribution	rank
Pearson 5(4, 2.83, 8.55)	19.6
Pearson 6(4, 0.0874, 101, 2.9)	17.2
Lognormal(4, 1.29, 0.719)	0.394
Gamma(4, 1.4, 3.87)	0
Beta(4, 61, 0.78, 5.69)	0
Exponential(4, 5.42)	0
Pareto(4, 1.47)	0
Inverse Gaussian(4, 6.81, 5.42)	0
Erlang(4, 1, 5.42)	0
Triangular(3, 62.6, 5.98)	0
Uniform(4, 61)	0
Weibull(4, 0.971, 5.5)	0

Las Funciones de Distribución, que mas se aproximan a la información obtenida para el paso 4.2. es:

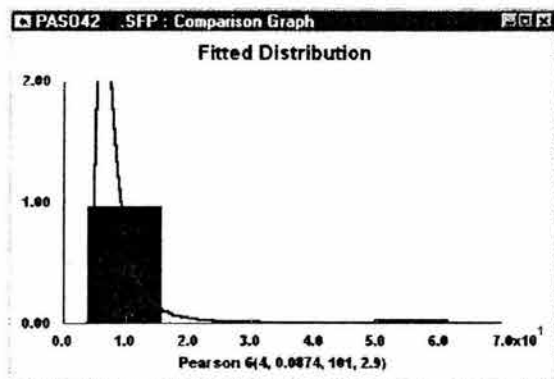
- La distribución Pearson 5 con parámetros shape value (valor de la forma) = 4, scale value (valor de la escala) = 2.83, stream (flujo)= 8.55



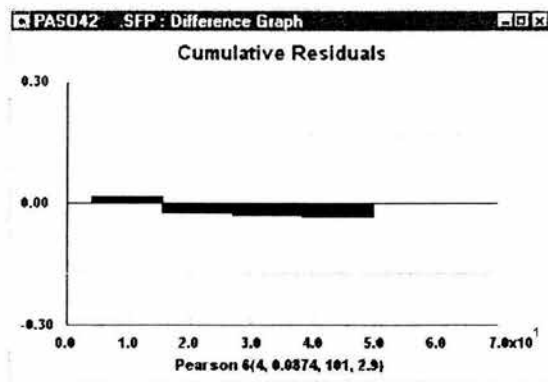
Sus residuos acumulativos son:



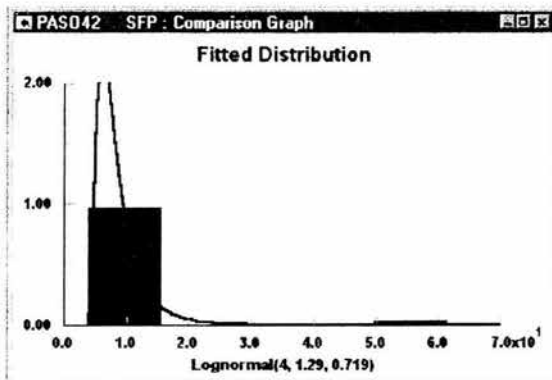
- La distribución Pearson 6 con parámetros shape 1(forma 1) = 4, scale 2 (forma 2) = 0.0874, scale value (valor de la escala) = 101, stream (flujo) = 2.9



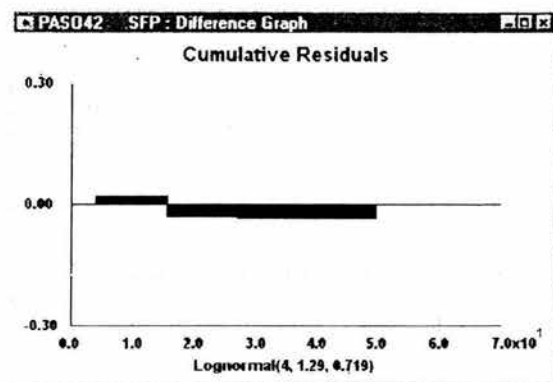
Sus residuos acumulativos son:



- La distribución Lognormal con parámetros mean = 4, std deviation (desviación estándar) = 1.29, stream (flujo) = 0.79

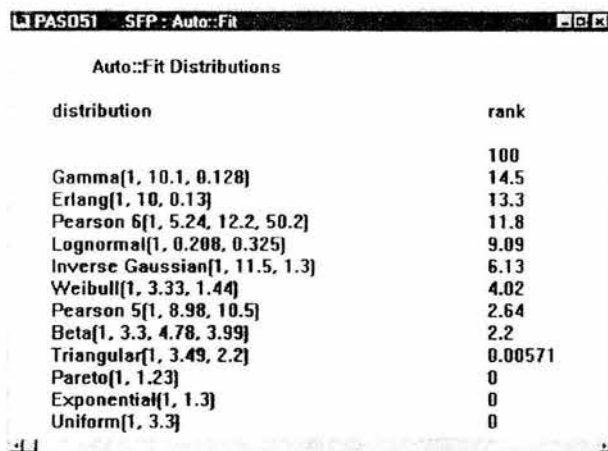


Sus residuos acumulativos son:



En este caso, la mejor función de distribución que podemos aplicar para nuestro modelo de simulación, es la **Función de Distribución Pearson 5** con parámetros shape value (valor de la forma) = 4, scale value (valor de la escala) = 2.83, stream (flujo) = 8.55

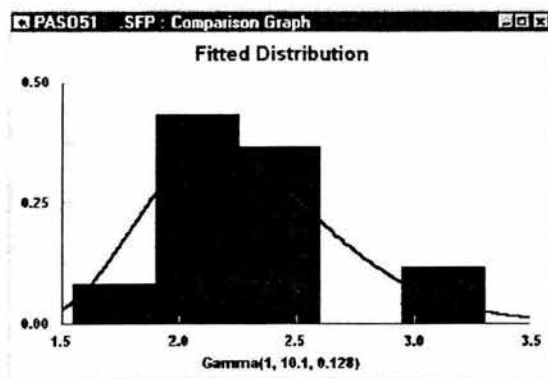
## Funciones de Distribución para el paso 5.1.



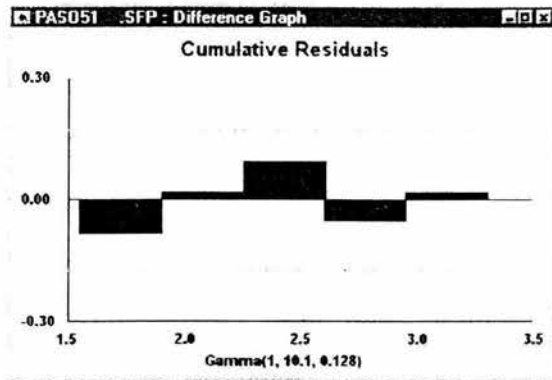
distribution	rank
	100
Gamma[1, 10.1, 0.128]	14.5
Erlang[1, 10, 0.13]	13.3
Pearson 6[1, 5.24, 12.2, 50.2]	11.8
Lognormal[1, 0.208, 0.325]	9.09
Inverse Gaussian[1, 11.5, 1.3]	6.13
Weibull[1, 3.33, 1.44]	4.02
Pearson 5[1, 8.98, 10.5]	2.64
Beta[1, 3.3, 4.78, 3.99]	2.2
Triangular[1, 3.49, 2.2]	0.00571
Pareto[1, 1.23]	0
Exponential[1, 1.3]	0
Uniform[1, 3.3]	0

Las Funciones de Distribución, que mas se aproximan a la información obtenida para el paso 5.1. es:

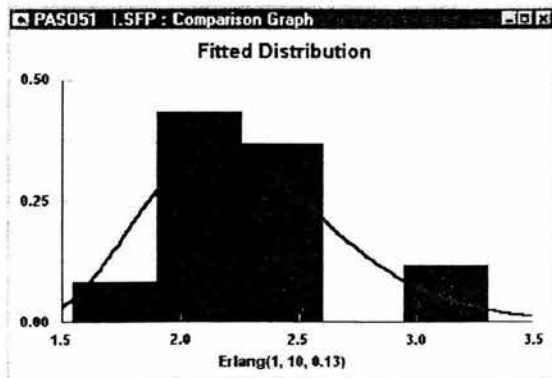
- La distribución Gamma con parámetros shape value (valor de la forma) = 1, scale value (valor de la escala) = 10.1, stream (flujo) = 0.128



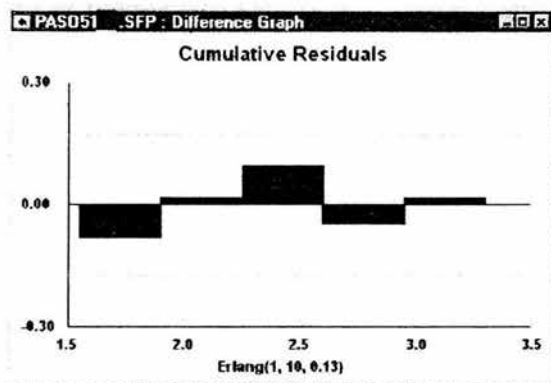
Sus residuos acumulativos son:



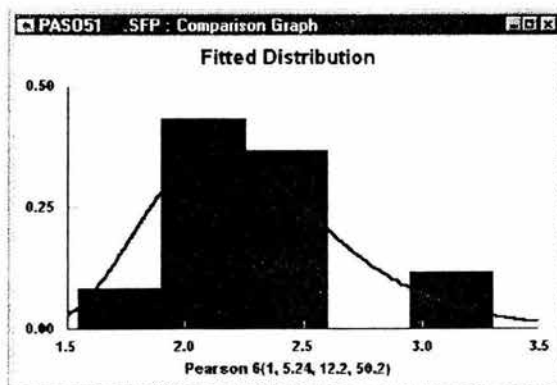
- La distribución Erlang con parámetros mean value (valor de significancia) = 1, parameter (parámetro) = 10, stream (flujo) = 0.13



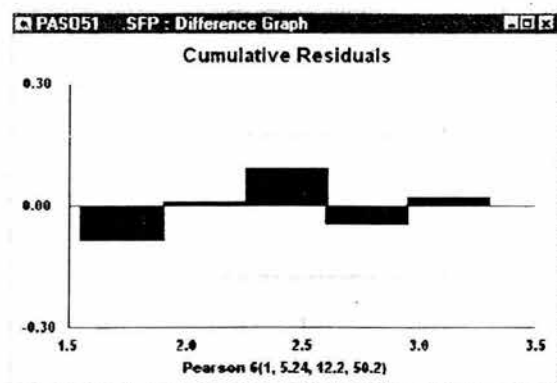
Sus residuos acumulados son:



- La distribución Pearson 6 con parámetros shape 1 (forma 1) = 4, scale 2 (forma 2) = 5.24, scale value (valor de la escala) = 12.2, stream (flujo) = 50.2



Sus residuos acumulativos son:



En este caso, la mejor función de distribución que podemos aplicar para nuestro modelo de simulación, es la **distribución Log-logistic**, ya que es la función que más se aproxima al comportamiento de nuestros datos.

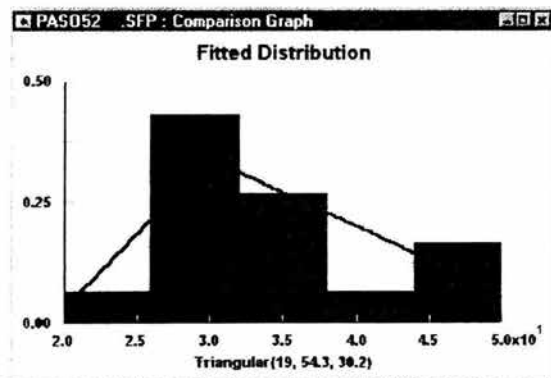


## Funciones de Distribución para el paso 5.2.

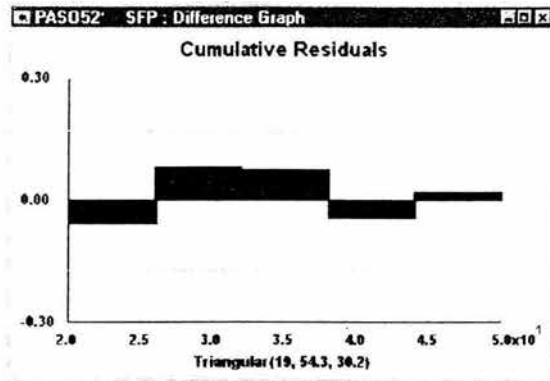
distribution	rank
Triangular[19, 54.3, 30.2]	27.4
Log-Logistic[20, 3.95, 13.1]	6.85
Pearson 5[20, 5.83, 72.1]	4.73
Weibull[20, 2.27, 16.9]	3.37
Lognormal[20, 2.6, 0.435]	2.04
Pearson 6[20, 39.7, 7.29, 20.4]	1.17
Uniform[20, 50]	0.988
Beta[20, 381, 4.79, 110]	0.338
Inverse Gaussian[20, 111, 13.9]	0.0138
Gamma[20, 16.6, 0.837]	0
Erlang[20, 17, 0.82]	0
Exponential[20, 13.9]	0
Pareto[20, 1.99]	0

Las Funciones de Distribución, que mas se aproximan a la información obtenida para el paso 5.2. es:

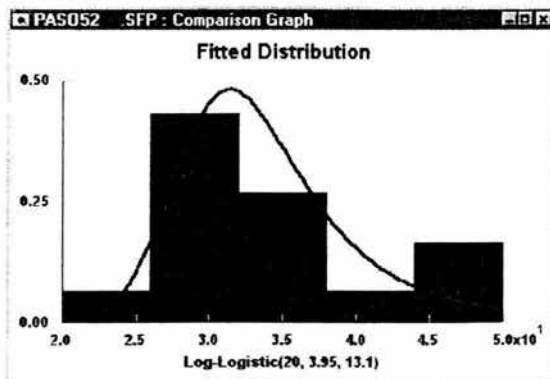
- La distribución Triangular con parámetros minimum (valor mínimo) = 19, mode (moda) = 30.2, maximum (valor máximo) = 54.3



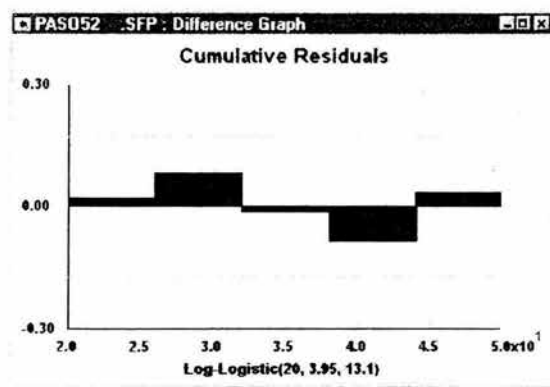
Sus residuos acumulativos son:



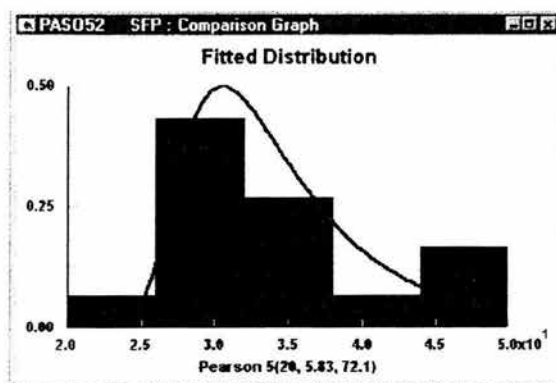
- La distribución Log-Logistic con parámetros mean (significancia) =28, std deviation (desviación estándar) = 3.95, stream (flujo) = 13.1.



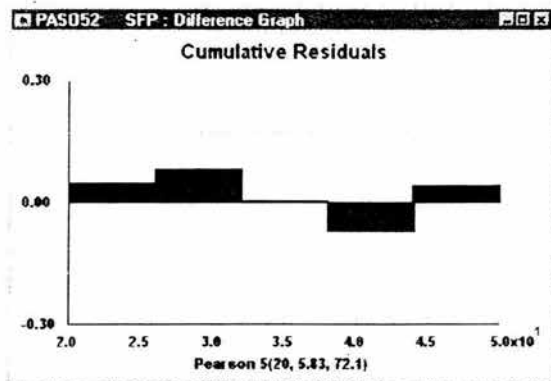
Sus residuos acumulativos son:



- La distribución Pearson 5 con parámetros shape value (valor de la forma) = 20, scale value (valor de la escala) = 5.83, stream (flujo) = 72.1



Sus residuos acumulativos son:



En este caso, la mejor función de distribución que podemos aplicar para nuestro modelo de simulación, es la **distribución Triangular**, ya que es la función que más se aproxima al comportamiento de nuestros datos.

#### 4.2.4. MODELO DE SIMULACIÓN A TRAVÉS DEL UN SOFTWARE (PROMODEL)

Los pasos a seguir para poder realizar un modelo de simulación a través de Promodel son los siguientes:

Para poder definir el modelo de simulación, es necesario comenzar a establecer las localidades, las cuales mostrarán de forma grafica, los procesos.

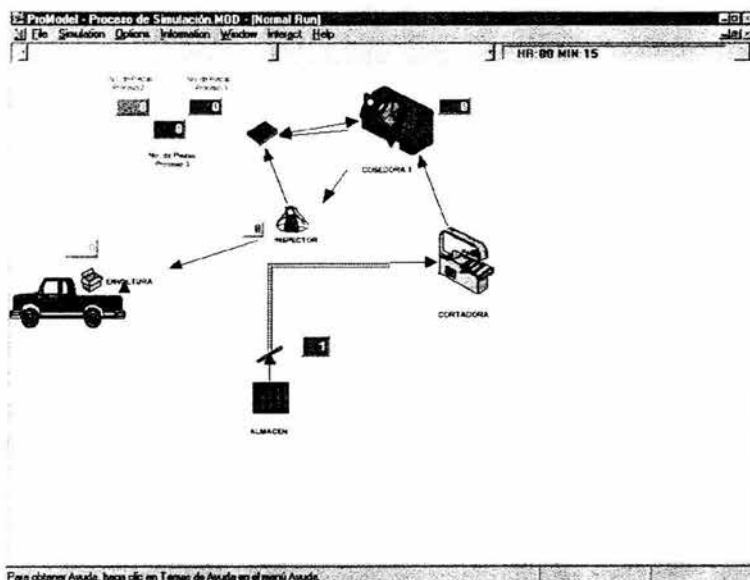


Figura 4.1

En la figura 4.1. podemos observar las localidades que se utilizarán, para poder representar nuestro modelo.

En la figura 4.2. se observa la definición de las localidades, dentro del software utilizado (Promodel)

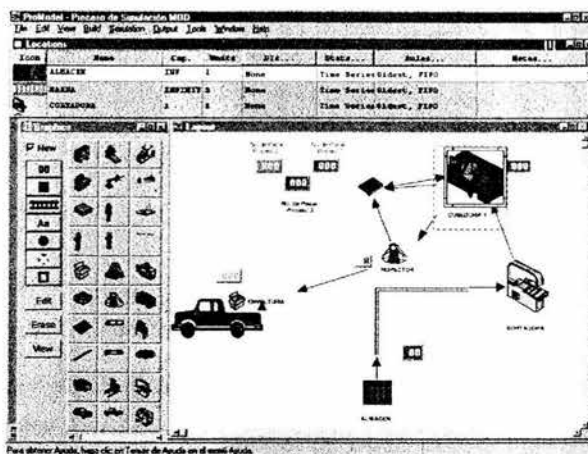


Figura 4.2.

En la Figura 4.3. se tienen las entidades, las cuales representan tanto la materia prima, así como las piezas que surgen de los diferentes procesos (modelado, costura y terminados especiales).

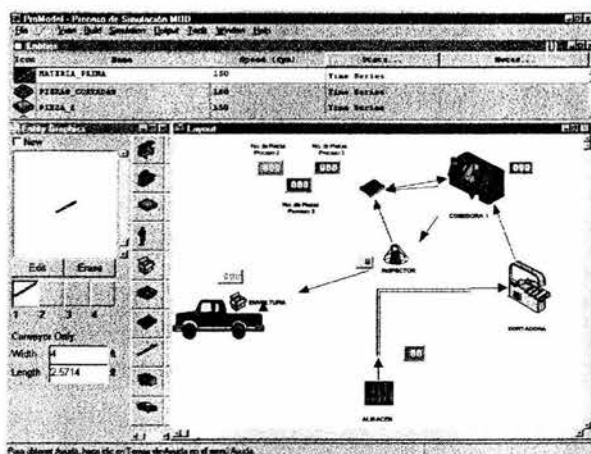


Figura 4.3.

En la figura 4.4., es la parte donde se define la materia prima que se ocupara para poder iniciar el proceso de producción, así como el número de ambos que se tendrán, en el transcurso de la simulación.

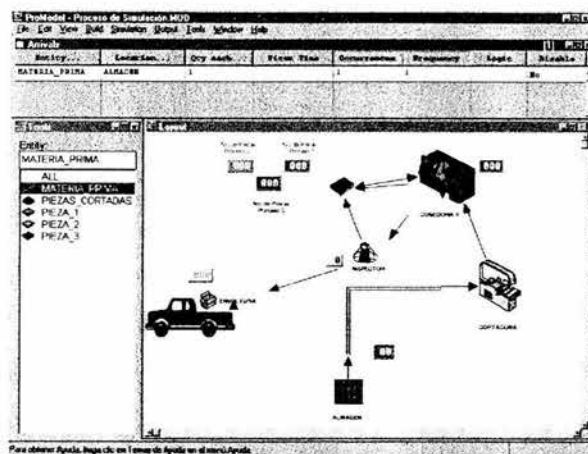


Figura 4.4.

La figura 4.5., muestra las diferentes variables globales que se utilizarán, como respectivos contadores, dentro de los procesos de manufacturación, dichos contadores servirán como auxiliares para poder saber el número de piezas que entran y número de piezas que salen.

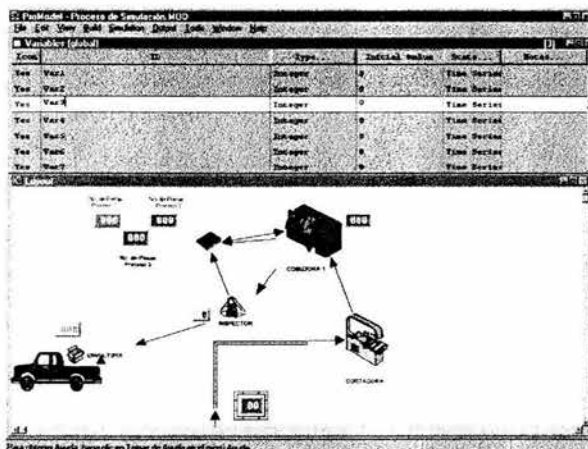


Figura 4.5.

La figura 4.6., muestra el proceso del modelo de simulación, aquí se definen los tiempos de llegadas, salidas, control de calidad de productos y tiempos de espera entre cada uno de los diferentes proceso, además de las diferentes direcciones que debe de tomar cada una de las piezas, que participan el la fabricación de los productos.

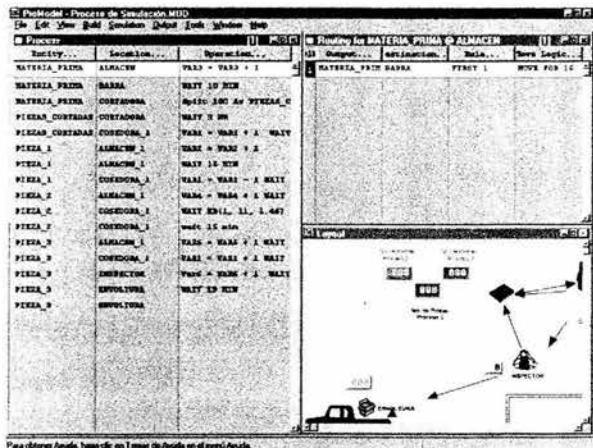
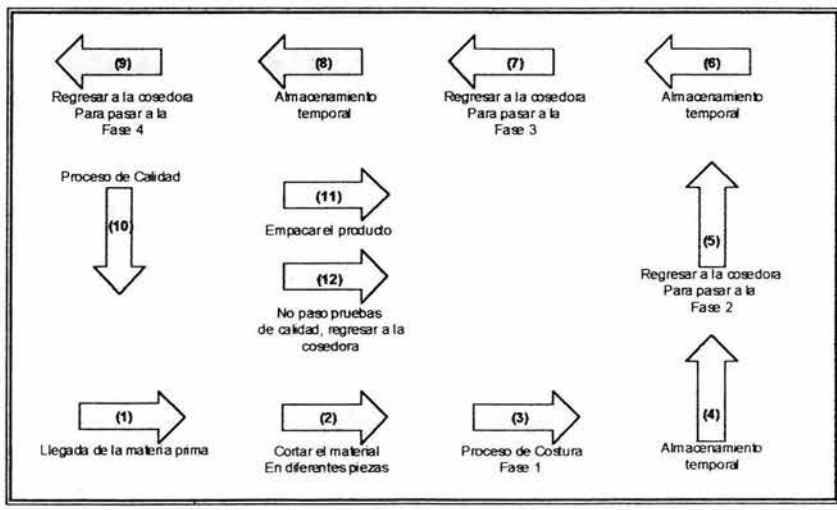


Figura 4.6.

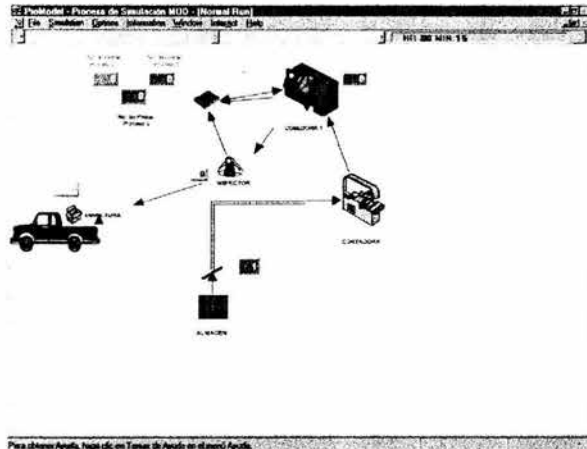
En el siguiente diagrama se puede observar a detalle los diferentes procesos que se llevarán a cabo dentro del proceso de simulación.



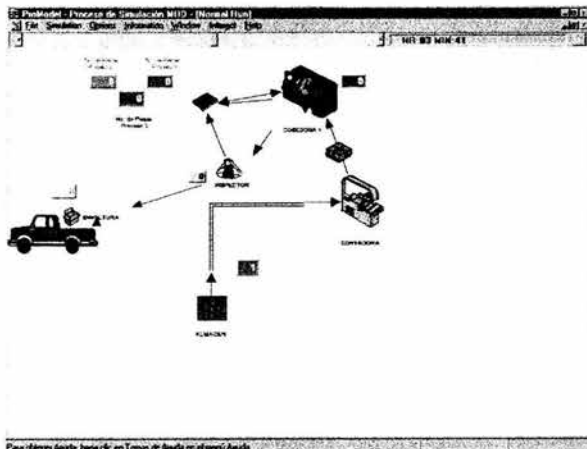
Procesos de Operación



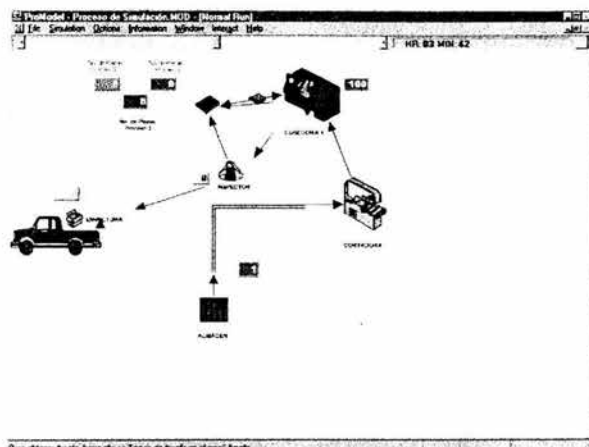
A través del software llamado **Promodel**, se desarrolló el presente modelo de simulación, el cual tiene la finalidad de mostrar de forma gráfica el comportamiento de las operaciones, en la fabricación de artículos de nailon; en este caso podemos observar en el inicio de la aplicación, como la materia prima sale del almacén y su destino será a través de la banda transportadora llegar a la cortadora.



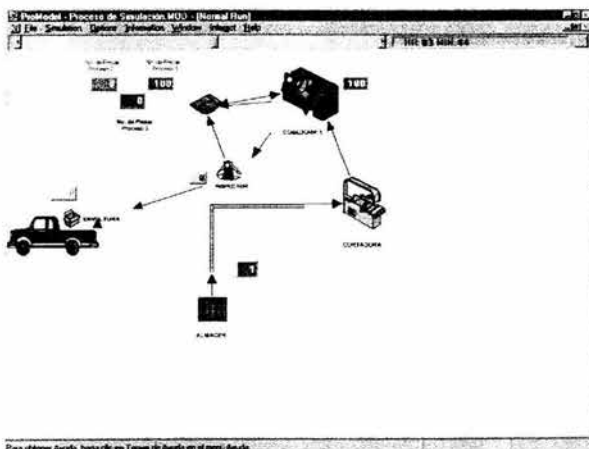
El siguiente paso es a través de la cortadora, dividir la materia prima en las piezas necesarias para la fabricación de 100 artículo de nailon (Bolsa de mil usos), este proceso tiene una duración de 3hrs, después de pasar por la cortadora, el siguiente destino es ir a la maquina de coser (cosedora).



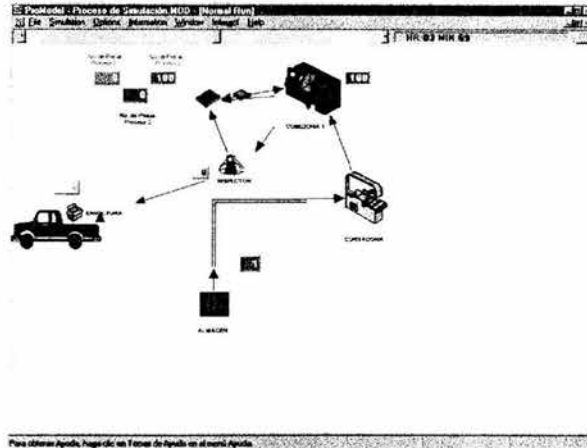
Al llegar a la maquina de coser, se comenzará con la primera etapa del proceso de transformación el cual, corresponde a una función de distribución Weibull con parámetros shape value = 4, scale value = 1.78, stream =2.25.



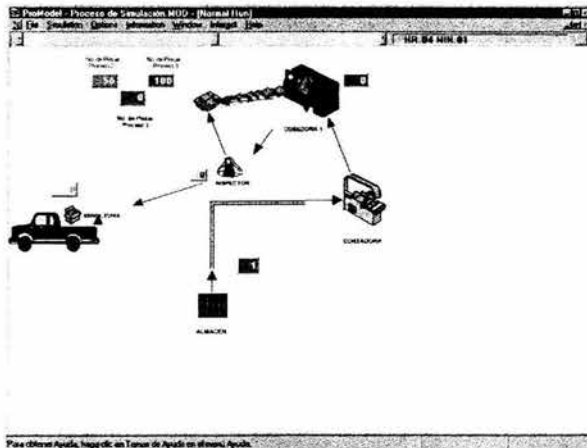
Al terminar la primera etapa del proceso en la maquina de coser, las piezas terminadas, se envían al almacén, el cual acumulará todas las piezas, y después de obtener todas dejara pasar 15 minutos antes regresar dichas piezas nuevamente a la maquina de coser, para comenzar con la segunda etapa.



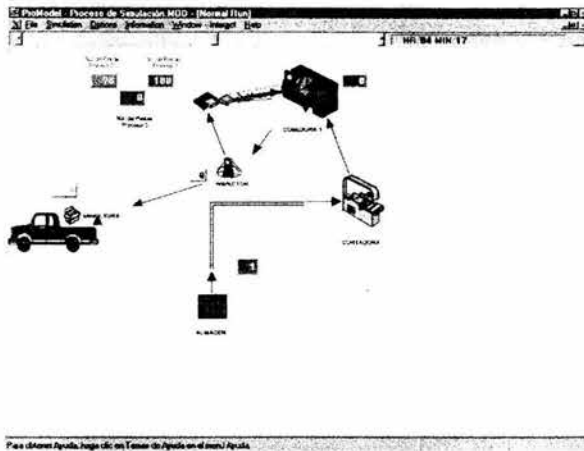
- Al enviarse las piezas del almacén a la maquina de coser, el proceso de costura se representará a través de la función de distribución Pearson 5 con parámetros shape value = 4, scale value = 2.83, stream = 8.55



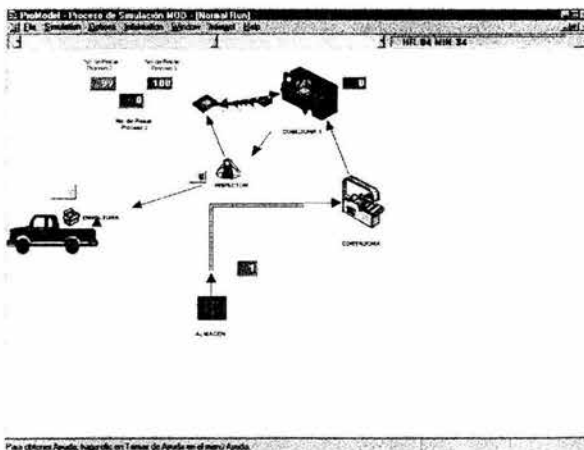
Al terminar el segundo proceso en la maquina de coser, las piezas nuevamente son enviadas al almacén, en el cual se acumularán todas las piezas y después de un tiempo de espera de 15 minutos, las regresará a la maquina de coser.



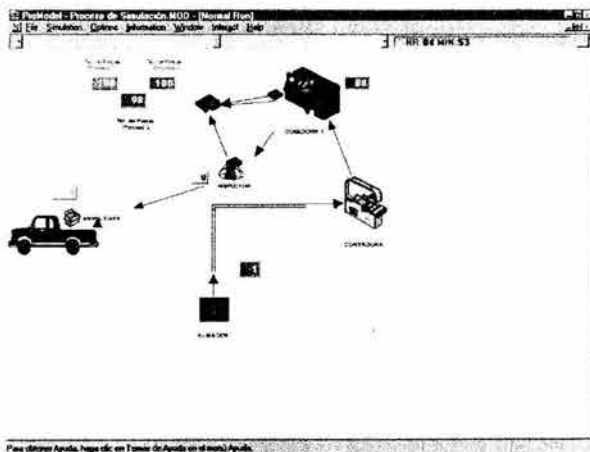
Al ser devueltas las piezas a la máquina de coser, se comenzará la tercera fase del proceso, el tiempo del proceso se representará con la función de distribución Gamma con parámetros shape value = 1, scale value = 10.1, stream = 0.128 ; posteriormente se regresarán al almacén.



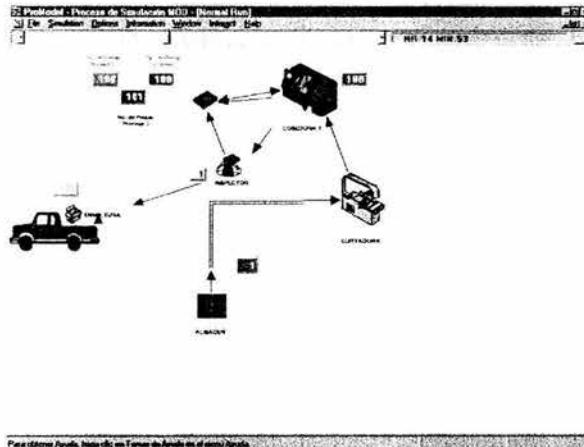
Al terminar el tercer proceso en la máquina de coser, las piezas nuevamente son enviadas al almacén, en el cual se acumularán todas las piezas y después de un tiempo de espera de 15 minutos, las regresará a la máquina de coser.



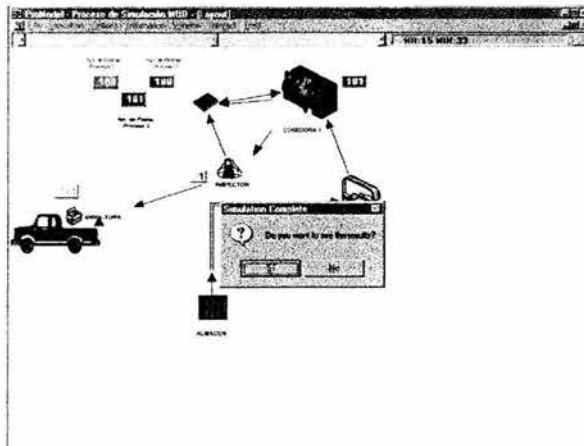
- Al enviarse las piezas del almacén a la maquina de coser, el proceso de costura se representará a través de la función de distribución Triangular con parámetros  $\text{minimum} = 19$ ,  $\text{mode} = 30.2$ ,  $\text{maximum} = 54.3$



Al terminar las cuatro fases del proceso de transformación de la materia prima , las piezas terminadas, son enviadas a un inspector, el cual se encargará de verificar que cumplan con las normas de calidad necesarias, la probabilidad de que una pieza salga defectuosa es del 3%, del total; si la pieza no cumple con las normas de calidad, es regresada a la maquina de cocer, para que se le realicen las modificaciones necesarias para poder ser nuevamente inspeccionada y cumpla con lo requerido.



Posteriormente del proceso de calidad, las piezas son enviadas a el área de carga para ser empaquetadas y posteriormente se puedan distribuir, el tiempo de empaquetado para 100 artículos es de 19 minutos.



## 2.4.5. EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE PRUEBAS

De acuerdo con recolección de datos obtenidos en la fabricación de bolsas mil usos, para el caso de 25, 50, 75 y 100 artículos tenemos la siguiente información:

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN				
Piezas	25	50	75	100
Tiempo de Producción	7hrs 50 min	10 hrs 50 min	12 hrs 52 min	15hrs 47 min
Tiempo de Cortado				
Materia Prima	3 hrs	3 hrs	3 hrs	3 hrs
Tiempo de Terminación del art.	4 hrs 50 min	7 hrs 50 min	9 hrs 52 min	12 hrs 47 min

Esta información es muy importante para poder validar el modelo de simulación, con la finalidad de que cumpla con los tiempos estimados de producción, corriendo nuestro modelo, de acuerdo con el número especificado de productos tenemos.

PRUEBAS DE SIMULACIÓN				
Piezas	25	50	75	100
Tiempo de Producción	7hrs 39 min	10 hrs 11 min	12 hrs 57 min	15hrs 45 min
Tiempo de Cortado				
Materia Prima	3 hrs	3 hrs	3 hrs	3 hrs
Tiempo de Terminación del art.	4 hrs 39 min	7 hrs 11 min	9 hrs 57 min	12 hrs 45 min

De acuerdo con la información arrojada por el modelo de simulación, podemos observar que los tiempos de fabricación de los artículos, están dentro de los márgenes establecidos, por el productor, de tal forma nuestro modelo de simulación cumple con las características y especificaciones establecidas, esto da como conclusión que nuestro modelo es bueno.

## 2.4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Información Arrojada Por La Simulación

#### Localidades

Con respecto de las localidades, podemos observar el tiempo en el cual participaron activamente dichas entidades, así como la capacidad de operación, el número de entradas de piezas u/o artículos, el promedio por minutos y volúmenes máximos en cada localidad.

Nombre de la Localidad	Tiempo del Proceso	Capacidad	Total Entradas	Promedio de Entradas por Minuto	Promedio de Volúmenes	Volúmenes Máximos
Almacén	16.40	Infinita	1	0.00	0.00	1
Barra	16.40	Infinita	1	10.46	0.01	1
Cortadora	16.40	1	1	180.00	0.18	1
Cosedora 1	16.40	Infinita	504	68.69	35.18	100
Almacén 1	16.40	Infinita	404	11.29	4.63	100
Pickup	16.40	1	0	0.00	0.00	0
Inspector	16.40	1	104	5.08	0.54	1
Envoltura	16.40	50	200	9.50	1.93	4

#### Localidades Declaradas por Porcentajes

En la siguiente tabla podemos observar el porcentaje de desocupación de cada una de las localidades, así como el porcentaje de ocupación; en estas columnas podemos ver claramente la capacidad desperdiciada, dentro de las localidades participantes. Por otro lado identificar las localidades en las cuales su actividad es crítica por el hecho de estar en descanso.

Nombre de la Localidad	Tiempo del Proceso	% Desocupado		% Parcialmente Ocupado	
		%		%	
Almacén	16.40	100		0	
Barra	16.40	98.94		1.06	
Cosedora 1	16.40	30.5		69.5	
Almacén 1	16.40	89.23		10.77	
Envoltura	16.40	32.84		67.16	
Nombre de la Localidad	Tiempo del Proceso	% Operación		% Ocioso	
Cortadora	16.40	18.29		81.71	
Pickup	16.40	0		100	
Inspector	16.40	53.71		46.29	



## Fallo de Llegadas

En esta tabla se muestran los fallos de las llegadas de productos a los diferentes almacenes, los cuales proporcionan la materia necesaria para los procesos de producción; en donde se muestra que al correr la simulación, no se encontraron problemas en estas localidades, con respecto de las entidades (piezas).

Nombre de la Localidad	Nombre de la Localidad	Total de Fallos
Materia Prima	Almacen	0
Entidades	Almacen 1	0

## Actividad por Entidades (Piezas)

En la tabla de actividad por entidades, se muestra la salida total de las piezas, de donde se observa una salida de materia prima, la cual proporcionará las piezas necesarias para el comienzo del proceso de fabricación, se puede ver que en las entidades piezas uno y dos las salidas es cero, ya que estas piezas se manejan como parte de un proceso para que al llegar a convertirse en la pieza tres, sea cuando esté terminado el producto, que es donde se registra en el total de salidas la cantidad de cien piezas; Por otro lado se muestran los promedios de operación por minutos, en los cuales se especifica el tiempo que se toma para producir el artículo especificado.

Nombre de la Entidad	Total de Salidas	Promedio de minutos en el Sistema	Promedio de Minutos Movimiento Logico	Promedio de Minutos en Operacion
Materia Prima	1	40.464	30	10.464
Piezas Cortadas	0	0	0	0
Pieza 1	0	0	0	0
Pieza 2	0	0	0	0
Pieza 3	100	608.21077	12.12	300.86703

## Entidades Declaradas por Porcentajes

En esta tabla podemos observar el porcentaje de movimiento lógico así como el de operación, esto nos indica el porcentaje del tiempo total de todo el proceso en el que son ocupadas estas entidades.

Nombre de la Entidad	% Movimiento Lógico	% Operación
Materia Prima	74.14	25.86
Pieza 3	1.99	49.47

Con la información obtenida por el proceso de simulación, podemos llegar a la conclusión que las localidades ocupadas, para el proceso de fabricación de los productos, están sobre valoradas, ya que es factible aumentar la producción, ya que las maquinas de producción pueden soportar más trabajo, aunque se recomendaría cambiar el proceso de producción de tal forma, que si se obtuviera otra maquina de cocer se podría realizar en serie la producción, en menor tiempo y aumentaría la capacidad de fabricación.

## 2.4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para poder validar nuestro modelo, tenemos la necesidad de cumplir con las características del siguiente esquema:



El sistema ya fue definido con todos los procesos necesarios para poder realizar la simulación, de acuerdo con el modelo conceptual y ayudado por el cliente se establecieron los parámetros, entradas y salidas en la fabricación de los prontos de su empresa.

A través del programa llamado Promodel, se diseñó el modelo a simular, en el cual se realizaron diferentes pruebas con información ya establecida por el cliente, de la cual nos permitió realizar pruebas para determinar si el modelo cumple con los pasos y características necesarias para la fabricación de artículos de nailon, además se verificaron los diferentes tiempos de producción.

Con el análisis de información de las pruebas realizadas, autentificamos que el modelo de simulación cumpliera con los resultados adecuados, obteniendo resultados correctos.

Ahora bien, siendo que el modelo es correcto y cumple con las especificaciones especificadas, es necesario comenzar a tomar las decisiones necesarias para poder realizar cambios en la forma de operación o con en la implementación de más equipo de producción.

## COSTOS

Como el costo del proyecto, está determinado por el:

- Número de recurso a utilizar (número de personas en el proyecto)
- Tiempo dedicado al proyecto (investigación y programación)
- Recursos materiales utilizados (Computadora, software, etc)
- I.va.

Por ello es costo de este proyecto es:

### COSTOS POR EL PROYECTO

	Recursos	\$
Recursos Humanos	1	\$5,000.00
Recursos materiales	Pc, Impresora, Papeleria, Software, ect	\$2,500.00
I.va.	10%	\$750.00
	<b>Costo Total</b>	<b>\$8,250.00</b>

Tiempo del Proyecto: **90 hrs**

## 2.4.9. INFORME PARA EL USUARIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN REALIZADA.

De acuerdo con el modelo de simulación que se desarrollo, podemos darnos cuenta, que el proceso de fabricación de los productos que producen la empresa "Creaciones Deportivas B", puede tener cambios significativos; al cambiar el proceso de fabricación, se tienen mejoras significantes, al tener la producción en serie se pueden eliminar tiempos muertos, mano de obra, reducción de costos y al mismo tiempo llegar a una muy buena optimización en la manufactura.

De acuerdo con las expectativas del productor de ampliar la empresa, es necesario considerar la forma de fabricación, así que es muy importante considerar lo que se está planteando de acuerdo con el sistema de simulación.

Por estas razones se recomienda cambiar el proceso de producción, el cual permitirá que la maquinaria pueda ser utilizada al cien por ciento, se pueda ahorrar tiempo desaprovechado y tener un mejor control en funcionamiento operativo y de mano de obra.

<b>Proceso Actual</b>			
<b>Producto</b>	<b>Tiempo estimado de fabricación por unidad</b>	<b>tiempo muertos por unidad</b>	<b>Costo del producto</b>
Bolsas de Nailon	15 min	5 min	\$25.00

<b>Proceso con Cambios Efectuados</b>			
<b>Producto</b>	<b>Tiempo estimado de fabricación por unidad</b>	<b>Promedio de tiempo muertos por unidad</b>	<b>Costo del producto</b>
Bolsas de Nailon	10 min	1.30 seg	\$15.00

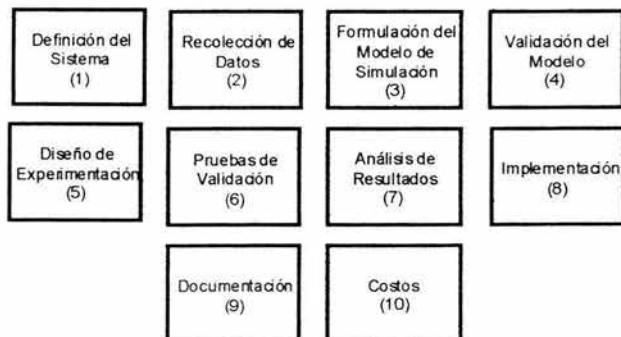
Por otro lado se recomienda realizar un modelo de simulación (modelo logístico de simulación) para la distribución del producto en la zona metropolitana y sus alrededores, ya que con esto proporcionará una mejor atención al cliente y un ahorro económico para el productor por cuestiones de entrega de la mercancía.

### 4.3. CONCLUSIONES

En el caso de las empresas dedicadas a la fabricación de artículos caseros, deportivos o domésticos, es muy útil contar con modelos de simulación, ya que les permitirá en sus respectivas empresas determinar los procesos que se realizan ahí, ya que de acuerdo con la simulación se podrán tomar mejores decisiones, sobre todo en la implementación de nuevas tecnologías o simplemente para saber cual es la capacidad de producción, además de saber en donde se generan tiempos muertos, los cuales pueden generar gastos financieros muy fuertes y que no se le ha dado la importancia que se merece; resolviendo estos problemas se puede optimizar los proceso en general.

Podemos decir como conclusión, que la utilización de está metodología, nos permitió poder considerar todas las etapas necesarias para realizar un buen estudio y desarrollo de un modelo de simulación; comenzando con la definición del sistema, la integración de la información necesaria para un el diseño del modelo conceptual, la información requerida para poder duplicar los procesos, la ejecución pruebas así como su validación, la validación del modelo y analizar la información que arroja nuestro modelo de simulación.

El modelo de simulación que se efectuó, para la empresa "Creaciones Deportivas B", permitió optimizar los proceso y poder dar una propuesta de mejora, en su fabricación de artículos, así como ahorro en gastos financieros.



## CONCLUSIONES GENERALES

Un entendimiento de la dinámica de sistemas es esencial para usar cualquier herramienta para la planeación de sistemas. Los sistemas de manufactura y servicios consisten de elementos interrelacionados (personal, equipo, etcétera) que funcionan interactivamente para producir un resultado específico (producto terminado, cliente satisfecho, etcétera).

Un sistema es un conjunto de objetos con relaciones internas entre los propios objetos y entre sus atributos. Todos los sistemas son, de alguna manera, sistemas de flujo de información, energía o materia. Este intercambio constituye las relaciones de todo sistema. Los sistemas son hechos de entidades (el objeto que es procesado), recursos (el personal, equipo, y facilidades usadas para procesar las entidades), actividades, los pasos del proceso y controles (las reglas que especifican quién, qué, dónde, cuándo, y cuánto de procesamiento de una entidad).

Para poder realizar un modelo de simulación que cumpla con la estructura necesaria para poder tener las bases suficientes que garanticen la confiabilidad de lo que se esta haciendo, es necesario poder conocer el sistema con que se cuenta, es por ello la importancia que tienen los sistemas dentro de la simulación digital.

Los pasos considerados para realizar una buena simulación son:

- Definición del Sistema
- Recolección de Datos o Información
- Formulación del modelo de simulación
- Validación del modelo
- Verificación de modelos de simulación
- Diseño de experimentación
- Experimentación (ejecución de pruebas)
- Validación de las pruebas
- Análisis de resultados (análisis de salida)
- Implementación
- Documentación
- Costos

Cada uno de los pasos mencionados anteriormente, trae consigo una parte fundamental y al mismo tiempo muy importante en la planeación, desarrollo e implementación del modelo de simulación. Se considera que aplicando esta metodología, permitirá tener un control mas claro de la información con que se cuenta así como un mejor control en los procesos simulados.

Actualmente existen herramientas (software) que permiten duplicar procesos, a través de la simulación, de los cuales podemos separarlos por áreas financieras, procesos industriales o de servicios.

El software para el caso de áreas del ramo metalúrgico y de servicios, permite validar niveles, que de una forma normal no se podían ver, ya que en la simulación de un proyecto muy grande, al momento de unir los procesos con todas las áreas que participan en la producción de un artículo o para dar un servicio, no se podría darse cuenta en donde se está desperdiciando la capacidad producción de alguna área, o en donde se podría generar procesos inoperantes.

Una vez comprobado que el programa de computador esta libre de errores de programación hay que establecer si trabaja correctamente o no. Una primera posibilidad puede consistir en ejecutar el programa bajo hipótesis simplificadoras para las cuales sea conocido, o se pueda calcular fácilmente por otros medios, como se comporta el sistema modelizado.

A través de pruebas previamente realizadas podemos verificar la validación de la información estadística que arroja nuestro modelo, de tal forma que podemos verificar que el sistema sea el correcto y cumpla con las especificaciones planteadas desde un principio.



## ANEXO. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

**Sistema:** Conjunto de objetos o ideas que están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin (Shannon, 1988). También se puede definir como la porción del Universo que será objeto de la simulación.

**Modelo:** Un objeto  $X$  es un modelo del objeto  $Y$  para el observador  $Z$ , si  $Z$  puede emplear  $X$  para responder cuestiones que le interesan acerca de  $Y$ .

**Simulación:** Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema Shannon, 1988).

**Planta:** Es un equipo o juego de piezas de una máquina funcionando conjuntamente, cuyo objetivo es realizar una operación determinada.

**Proceso:** Operación o desarrollo natural, caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos que tienden a un determinado resultado final.

**Perturbación:** es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si se genera fuera del sistema es una perturbación externa, si dentro del sistema es interna.

**Estados de un sistema:** Se ha definido al sistema como un conjunto de elementos junto a sus atributos de interrelación. Estos atributos podrán variar en el tiempo. Así se podrá describir el estado del sistema, de acuerdo a los valores que toman estos atributos en cada momento del tiempo. Esto se asocia a los sistemas dinámicos.

**Señal:** Una señal representa una variable de interés asociada al sistema que varía en función del tiempo.

**Control:** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. Control significa medir el valor de la variable controlada de un sistema (generalmente la salida) y

aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al valor deseado.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFÍA

- Simulación (Segunda Edición)  
Sheldon M. Ross  
Department of Industrial Engineering and Operations Research  
University of California  
Editorial Prentice Hall
- Simulación Métodos y Aplicaciones  
David Ríos Insua, Sixto Ríos Insua, Jacinto Martín Jiménez  
Grupo de Análisis y Decisiones Departamento de Inteligencia Artificial  
del la Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.  
Editorial Ra-Ma
- Simulation using promodel  
Harrell Ghosh Borden  
Mc Graw Hill
- Discrete-Event System Simulation  
Banks j., Carson J.S., Nelson B.L., 1996  
Ed. Prentice-Hall, New Jersey
- Conceptos y Métodos en la Simulación digital de eventos discretos  
Fishman G.S., 1978  
Ed. Limusa
- Simulación y Modelización de Sistemas, en: Panorama Informático  
Barceló, J. y J. Casanovas ,  
Editado por FESI, 1996.
- Simulation Modeling and Analysis  
Law, A. M. y W. D. Kelton  
Editorial McGraw Hill, 1991.
- System simulation,  
Gordon, G.,  
Editorial. Prentice-hall, 1978.
- Modeling and Analysis: An Introduction to  
System Performance Evaluation Methodology,  
Kobayashi, H.,  
Edition Addison-Wesley, 1978.

- A Guide to Simulation,  
Bratley, P., B. L. Fox y L. E. Schrage,  
Ed. Springer-Verlag, 1987.
- Tráfico, Razonamiento y Simulación, Especificación Preliminar de la  
Arquitectura TRYS Cuenca, J. Departamento de Inteligencia Artificial,  
Universidad Politécnica de Madrid, 1991.
- Apuntes de Cátedra de Modelos y Simulación  
Dr. Ing. Enrique Puliafito  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Mendoza
- Teoría de Modelos y Simulación  
Dr. Enrique Eduardo Tarifa  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy
- Statistical Techniques in Simulation,  
Kleijnen, J. P. C.,  
Ed. Marcel Dekker, 1975.
- Statistical Tools for Simulation  
Kleijnen, J. P. C.,  
Practitioners, Marcel Dekker, 1987.