

# CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DISCRETOS

## I.1 Introducción

Si se examinara bibliografía de investigación de operaciones o de las ciencias administrativas, rápidamente se notaría que la simulación es una de las herramientas mas ampliamente utilizadas en el campo de las ciencias administrativas. La simulación ha sido aplicada en producción, control de inventarios, sistemas de transporte, análisis de estrategias de mercado, patrones de crecimiento urbano e industrial, control del medio ambiente y otras numerosas áreas.

La simulación sin embargo difiere significativamente de otros modelos y técnicas. Los problemas de investigación de operaciones hasta ahora vistos fueron modelados y resueltos Analíticamente (matemáticamente), pero se hicieron un numero de consideraciones básicas sobre el medio ambiente de los problemas para modelar los mismos.

Por ejemplo en problemas de control de inventarios se considera que el costo de escasez o agotamiento es directamente proporcional al numero esperado de unidades escasas; también puede el costo de escasez, ser una función no lineal de la escasez. Muchas de las consideraciones requeridas para modelar problemas tal que pudieran ser resueltos analíticamente no son requeridas en simulación: por esto sistemas más grandes y complejos pueden ser estudiados.

En muchas situaciones, la simulación es la única forma viable para el análisis. Por ejemplo, las características operativas de sistemas complejos de colas puede aproximarse usando simulación pero no se puede solucionar utilizando métodos analíticos (los algoritmos de teoría de colas analizan problemas de una sola fase y simulación de una o múltiples fases).

Simulación es imitar una operación de un proceso del mundo real o de un sistema con respecto al tiempo. Ya sea que se realice en forma manual o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema, y observar esa historia artificial para realizar inferencias relacionadas con las características operativas del sistema real.

El comportamiento de un sistema conforme evoluciona con respecto al tiempo es estudiado a través de desarrollar un modelo de simulación. Estas consideraciones son expresadas en relaciones matemáticas, lógicas o simbólicas entre las entidades, u objetos de interés, del sistema. Una vez desarrollado y validado, un modelo puede ser usado para investigar una amplia variedad de preguntas ¿Qué tal sí? sobre un sistema de la vida real. Los cambios potenciales para un sistema primero pueden ser simulados para predecir su impacto sobre el comportamiento del sistema. La simulación también puede ser usada para estudiar sistemas en la etapa de diseño, antes de que tales sistemas sean construidos. Por esto, la simulación, puede ser usada como una herramienta de análisis para predecir el efecto de los cambios en los sistemas existentes, y como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento de nuevos sistemas bajo un conjunto variado de circunstancias.

En algunos casos, un modelo puede ser desarrollado, el cual es muy simple de ser resuelto por métodos matemáticos. Tales soluciones pueden se encontradas usando cálculo diferencial, teoría de probabilidad, métodos algebraicos, y otras técnicas matemáticas. Las soluciones usualmente consisten de uno o mas parámetros numéricos los cuales son llamados medidas de desempeño del sistema. Sin embargo, muchos sistemas del mundo real son demasiados complejos que los modelos que los representan son virtualmente imposibles de ser resueltos matemáticamente.

En estas situaciones, la simulación numérica computacional puede ser usada para imitar el comportamiento del sistema con respecto al tiempo. Partiendo de la simulación se obtienen datos tal como si un sistema de la vida real hubiera sido observado. Los datos generados de la simulación son usados para estimar las medidas de desempeño del sistema.

En un sentido amplio, todos usamos la simulación para tomar decisiones todos los días. Previo a tomar una acción, generalmente construye un modelo mental o en algunos casos físicos de su concepción del medio ambiente para ayudar a la toma de decisiones. Entonces se manipula el modelo con diversas configuraciones y varias formas de influencias posibles para generar cierta información que pueda ser usada para tomar decisiones racionales. Por ejemplo, cuando se prepara a tomar el avión, uno puede visualizar (construir un modelo mental) los diversos preparativos que son necesarios, la ruta para ir al aeropuerto, y los retrasos posibles. Para redistribuir la sala (un sistema existente), en lugar de mover muebles pesados alrededor para encontrar el lugar mas apropiado, uno puede dibujar a escala las distribuciones o corta figuras a escala en cartón que imiten los muebles actuales y rápidamente re-arreglar la sala actual. Para diseñar un nuevo edificio (un sistema futuro, no existente), los arquitectos crean maquetas para representar su modelo mental de la apariencia del edificio y para estudiar la distribución de la instalación.

Este libro proporciona un trato introductorio de los conceptos y métodos de simular modelo de eventos discretos. El primer capítulo inicialmente discute cuando usar la simulación, sus ventajas y desventajas y sus áreas actuales de aplicación. Después se analizan los conceptos de sistema, modelo y control. Finalmente, indican los pasos que se siguen en la construcción y uso de un modelo de simulación de un sistema.

Este proceso de construcción de modelos y experimentación predice resultados de las decisiones para ser implementadas mas tarde. Tan simple como puede parecer. Estos ejemplos tienen mucho en común con la practica técnica de la simulación, que se cubrirá en este libro.

## 1.2 Conceptos y terminología.

Existe un numero de diferentes definiciones y tipos de simulación. Para propósitos prácticos se definirá simulación como " El proceso del desarrollo de un modelo de un problema y la estimación de medidas del funcionamiento del problema a través de la realización de experimentos sobre el modelo".

**La simulación de sistemas puede entonces ser definida como:**

La practica de la construcción de modelos que representan un sistema existente del mundo real o un sistema futuro hipotético, y la experimentación con esos modelos para explicar el comportamiento del sistema, mejorar el desempeño del sistema, o diseñar nuevos sistemas con funcionamiento deseados.

Para una mejor comprensión de esta definición se puede examinar la relación entre simulación y los modelos empleados hasta ahora. La simulación difiere significativamente del cuadro de trabajo de solución de modelos enfatizados anteriormente.

Hasta ahora se había dado énfasis a la formulación y desarrollo de modelos matemáticos y de la solución analítica o matemática a los modelos. En la mayoría de los casos las soluciones analíticas eran en forma de algoritmos que producían soluciones óptimas. La simulación no enfatiza alguno de estos factores, es un proceso de modelado descriptivo opuesto a un proceso normativo. El proceso de modelado asociado con la Simulación generalmente involucra la obtención de información que describe los factores de insumo y operacionales y que definen la interrelación entre los factores (variables), insumos y otros componentes del problema en estudio.

El producto del modelo de simulación esta en forma de descriptores del funcionamiento. A través de la ejercitación del modelo, pueden explorarse las características del problema. Debe notarse, que la simulación puede ser empleada para generar soluciones a modelos que son imprácticos de ser resueltos analíticamente. También debe señalarse que aunque el producto de la simulación es descriptivo por naturaleza, una rutina de búsqueda puede ser incluida en el modelo de simulación para proporcionar soluciones óptimas o cercanas al óptimo.

Se utiliza el término cerca del óptimo debido a que la solución puede ser óptima en términos del modelo definido, pero esto no garantiza que la solución es un óptimo absoluto. La optimización en simulación por esto puede ser una aproximación de optimalidad que ocurre en programación matemática.

### I.3 Aplicaciones de la Simulación

#### Comunicaciones

Las aplicaciones e simulación están siendo vitales en la industria de la comunicación.

Redes de computadoras de área local y área Amplia  
Sistemas telefónicos  
Sistemas de comunicación intercontinental vía satélite  
Redes de televisión por cable y  
Sistemas de telefonía celular

Son Ejemplos de Sistemas complicados que demandan el poderío de la simulación por computadora para el eficiente diseño y operación. Actualmente existen diversas herramientas comerciales de propósito especial para simulación disponibles para análisis y diseño de sistemas de comunicación.

#### Educación

Estudios concernientes a situaciones relacionadas con:  
Los efectos en los cambios en el nivel registro,  
El proceso de inscripción, asignación y calendarización de aulas  
Planeación del inventario en bibliotecas y cafeterías, y  
Planeación de la composición y de sistemas de diseño para escuelas y universidades;  
son algunas de las aplicaciones que pueden ser realizadas por la simulación.

#### Entretenimiento

Las técnicas de simulación son ampliamente usadas en el diseño de la estructura y operación de componentes diversos de parques de diversión  
Estudios de producción, y sistemas de teatro y cine.  
Sistemas de venta de boletos, líneas de espera  
Diseño de estacionamiento para vehículos  
Diseño de la capacidad y calendarización de paseos y espectáculos  
Calendarización de personal, equipo y producción de filmaciones

Son algunos de los propósitos típicos de aplicaciones de la simulación en la industria del entretenimiento.

#### Servicios Financieros

Existen muchos reportes de la aplicación de la simulación en compañías bancarias, de seguros y de valores.

Análisis de transacciones  
Análisis de flujos de caja  
Sistemas de diseño de oficinas  
Planeación de materiales y abastecimientos  
Diseño de redes de computación y procesamiento de datos, y  
Maquinas de atención automática y sistemas de servicios DRIVE IN  
son algunas de las actividades que pueden ser realizadas por la simulación.

### Servicios de Alimentación

Sistemas tales como:  
Restaurantes independientes  
Restaurantes de comida para llevar  
Restaurantes de comida rápida  
Franquicias de restaurantes, y  
Sistemas de tiendas de autoservicio (Mini Supers)

Pueden ser sujetos a estudios de simulación para propósitos tales como:  
Planeación del inventario de materiales e insumos  
Planeación de la distribución  
Selección de la ubicación  
Distribución del lugar, y  
Planeación y calendarización de la mano de obra.

### Servicios de Salud

Hospitales, servicios de emergencia, laboratorios clínicos, oficinas de médicos y dentistas, y paramédicos son sujetos frecuentemente a estudios de simulación para determinar:

La calendarización de cuadrillas de enfermeras y médicos  
Políticas de inventario de medicinas y alimentos,  
Planeación de la capacidad de recursos, tales como; camas, áreas de espera, salas de operación, equipo de primeros auxilios, y ambulancias.  
Planeación de servicios de emergencia  
Diseño de instalaciones  
Programación y calendarización de pacientes  
Análisis Logístico  
Compra de equipo  
Flujo Inter-departamental de pacientes  
Además, estudios epidemiológicos tales como pronósticos de las tasas de propagación de enfermedades, y análisis de alternativas de políticas de control de enfermedades son en forma rutinaria realizadas por la simulación.

### Hoteles y Servicios de Hospedaje

Sistemas tales como hoteles, moteles, y áreas de descanso pueden ser estudiadas por la simulación para determinar de factores tales como:

Capacidades adecuadas  
Ubicación, administración de políticas de los recursos en inventario  
Métodos de la planeación y calendarización de la mano de obra, y  
Sistemas de reservaciones.  
Diseño y Distribución de instalaciones  
Determinación de la característica y capacidad de equipos y materiales  
Análisis Logístico  
Asignación de recursos

## Transporte

Estos sistemas pueden involucrar uno o más tipos de vehículos ( taxis, autobuses, trenes, aviones, barcos, etc. ), pasajeros, carga y rutas de transporte. El estudio de simulación puede tener objetivos tales como:

- El diseño de la capacidad de los vehículos
- Planeación y calendarización de la mano de obra (operadores, cuadrillas de mantenimiento, Etc.)
- Planeación de repuestos
- Planeación del mantenimiento
- Planeación urbana
- Rutas de vehículos
- Diseño de carreteras
- Diseño de sistemas de control de tráfico aéreo de tierra y aire, y
- Diseño de estacionamientos y su estructura.

## Pronósticos Ambientales, del Tiempo y Ecológicos

Los pronósticos del tiempo en forma rutinaria e intensiva utilizan la simulación. Un gran número de variables son manipuladas por los programas de simulación que generalmente son ejecutados en super computadoras para predecir la situación climatológica local o global. Estudios concernientes a:

- Control de contaminación
- El Efecto invernadero
- Contaminación de insectos, y
- Otros tópicos ecológicos y del medio ambiente también son realizados por simulación en computadora.

## Producción y Manufactura:

La simulación en producción y en manufactura es también otra clase importante de aplicaciones de la simulación. Algunas industrias típicas de esta clase y su propósito correspondiente para estudios de simulación son:

Cosecha y Extracción de recursos naturales.

Industrias tales como la minería, cosecha agrícola, perforación de pozos y pesca usan la simulación por computadora para la planeación de actividades relacionadas y la creación de políticas para el control oportuno de recursos costosos, tales como maquinaria (cargadores, palas, elevadores, bandas transportadoras, bulldozers, y barcos).

Siembra y Cría de Animales

Sistemas ranchos agrícolas pueden ser simulados para el pronóstico de la producción, planeación de recursos tales como la tierra, fertilizantes, alimentos para animales, drogas, tractores, y vehículos de transporte, y el estudio y diseño de procedimientos operacionales para determinar factores tales como producción, almacenaje, y distribución.

Generación de Energía

Sistemas de generación de energía basados en fuentes tales como vapor, fósiles, agua, nuclear, sol, o viento son generalmente simulados para: el diseño de la capacidad, configuración, y sistemas de distribución, para el diseño y análisis de sistemas operacionales, los cuales pueden tener situaciones relativas a:

Calendarización de Tasas de Generación  
Calendarización de la Distribución  
Diseño de Sistemas de Control  
Calendarización del Mantenimiento, y  
Control del Impacto Ambiental.

#### Manufactura

Todos los tipos de manufactura relativos a plantas de procesamiento químico, plantas automotrices, manufactura de vehículos aeroespaciales, muebles, electrónica, herramientas, y otras utilizan la simulación extensivamente en aplicaciones tales como;

Planeación estratégica  
Diseño de distribución de planta  
Planeación de la producción  
Políticas de reemplazo y mantenimiento de equipo  
Planeación y control del inventario  
Calendarización de la producción  
Balanceo de líneas de ensamble  
Almacenamiento y manejo de materiales  
Diseño de Sistemas de información y  
Otras aplicaciones relacionadas al diseño, fabricación, ensamble, control de calidad, Empacado, almacenamiento, y distribución.  
Justo a tiempo  
Aseguramiento de la calidad  
Niveles de servicio al cliente  
Confiabilidad y disponibilidad de productos

Consecuentemente a su amplia aplicación existe un considerable número de herramientas de simulación de propósito especial que están disponibles comercialmente para el diseño y análisis de sistemas de manufactura.

La importancia de la Simulación es evidente al considerar el impacto que tuvieron algunos trabajos, como son:

La Perestroyka: Estudios de simulación efectuados en Rusia en las décadas del 70 y 80 convencieron a los dirigentes de la necesidad de plantear un fuerte cambio en la economía de ese país.

La caída de la bolsa de New York en 1988: La utilización de programas de simulación por parte de los corredores de la bolsa causó una falsa inestabilidad que provocó la caída.

El regreso del Apolo 13: La simulación jugó un rol fundamental en la determinación del plan de emergencia. La nave retornó con éxito a pesar de las graves averías.

Los Voyagers: Gracias a la simulación se pudieron establecer los itinerarios óptimos para estas naves con un mínimo consumo de energía aprovechando la atracción gravitacional de los planetas.

Proyecto Monte Carlo: Von Newman y Ulam (1945) emplearon simulación para estudiar reacciones nucleares.

Los modelos del planeta: Algunos plantean la posibilidad de un calentamiento global debido al efecto invernadero. Otros plantean la posibilidad de un enfriamiento y predicen una nueva era glacial.

Capacitación de tropas: En el operativo "Tormenta del desierto" llevado a cabo en la guerra contra Irak, las tropas de todas las fuerzas estadounidenses que participaron (fuerza aérea, marina y ejército) fueron entrenadas con simuladores.

Capacitación de policías: Se utiliza entornos virtuales para que el policía aprenda a conducirse en situaciones de riesgo.

Simuladores de vuelos: Fue una de las primeras aplicaciones de los simuladores. Actualmente se utilizan para entrenar pilotos de aviones comerciales y de combate.

#### I.4 Futuro Potencial de la Simulación

1. El grado de complejidad de los sistemas Físicos, Biológicos, Sociotécnicos y Socioeconómicos estudiados por los actuales sistemas de diseñadores y analistas prohíben el uso de herramientas Matemáticas clásicas, o aun modernas en la mayoría de los estudios reales.
2. El incremento de la capacidad del Hardware de los sistemas de computación los cuales ofrecen dramáticamente mejores desempeños (principalmente en memoria y velocidad). EL bajo costo de las computadoras y sus periféricos que dan a las empresas pequeñas acceso a las capacidades que ofrece la simulación.
3. La evolución de los sistemas existentes de Software de modelación hacia el ofrecimiento de nuevas capacidades y la emergencia de nuevas herramientas de Software que proveen una capacidad sofisticada y de mas fácil interfase del usuario ha traído a los usuarios con varias disciplinas y habilidades en computación a usar la simulación.
4. EL incremento del conocimiento del poderío de la simulación por parte de los Administradores de varias organizaciones y proyectos, y de la disponibilidad de modernas herramientas de simulación
5. La simulación por computadora esta siendo incorporada a la retícula de varias Universidades e Instituciones de Educación Superior.

#### I.5 Otros Conceptos de Simulación

La simulación es una forma de experimentar con un modelo detallado de un sistema real para determinar como responderá el sistema a cambios en su estructura, medio ambiente o a ciertas consideraciones.

System Improvement Using Simulation

Charles R. Harrell, Robert E. Bateman, Thomas J. Gogg and, Jack R.A. Mott  
Promodel Corporation., 1996

La simulación es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, de tal forma que se obtiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo.

Mohammad R. Azarang y Eduardo garcía Dunna  
Mc. Graw-Hill, 1997

Una simulación es imitar la operación de un proceso de la vida real o de un sistema con respecto al tiempo.

Discrete-Event Simulation Sytem

Jerry Banks, John S. CARson, Barry L. Nelson

Prentice Hall, 1984

- Es una técnica de sustituir desarrollos sintetizados (para este caso irreales) por uno real.  
Altus, David Morris, Simulation As A Feedback Mechanism In Training Engineering Draftsmen, 1971

- Una técnica numérica para el comportamiento de experimentos en una computadora digital, la cual implica ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos para describir el comportamiento de un negocio o sistema económico sobre extensos períodos de tiempo.  
H. Maisel y G. Gnugnoli

- Inicia con un sistema real, y intentando duplicarlo en papel o en computadoras, por procedimientos que generan datos representativos de la efectividad de varias soluciones alternativas en un costo relativamente bajo y en un corto período de tiempo.  
Apple, James M., Plant Layout and Material Handling, 1977.

- Es una representación dinámica obtenida por la construcción de un modelo y moviéndolo a través del tiempo.  
Arthur, William, To Simulate or not To Simulate: That Is The Question, Educational Data Processing Newsleter.

- Es la ejecución o manipulación dinámica de un modelo de un sistema objeto para algunos propósitos.  
Barton, Richard T., A primer on simulation and Gaming, 1970.

- Esencialmente una analogía funcional. ....?  
Chorafas, Dimitris N., Systems and Simulations, 1965.

- Técnica para resolver modelos, formulaciones representadas en ecuaciones evaluando una o mas ecuaciones en cuales una o mas variables son seleccionadas aleatoriamente.  
Cooper Bhat, LeBlanc, Operations Research Models, 1977.

- Es un modelo de alguna situación en cual el elemento de la situación son representados por procesos aritméticos y lógicos que pueden ser ejecutados en una computadora a predecir la dinámica propia de la situación.  
Emshoff, James R. and Sisson, Roger L., Design and Use of Computer Simulation Models, 1971.

- Es un modelo operativo, reproducción o imitación de un fenómeno físico o social, consistiendo de un conjunto de factores o variables interrelacionados cual función conjunta es Esencialmente de la misma manera como el sistema actual o hipotético.  
Gillispie, Philip H., Learning Through Simulation Games.

- Es una forma de imitación el cual el problema que necesitamos resolver es representado por un modelo el cual, en efecto reemplaza el problema por un segundo problema que es fácil de resolver.  
Gordon, Geoffrey, The Application of GPSS To Discrete System Simulation, 1975.

- Es una prueba-error, la cual permite aproximarnos a describir un problema y aumentar la comprensión de factores complicados por requerir preguntas y descripciones de respuestas.

- Es un procedimiento que nos permite solucionar un problema para definirlo y analizarlo como un modelo de sistema.

- Es una representación lógica y matemática de un sistema que puede ser fingido de una manera experimental en una computadora digital.

- Es el proceso del diseño de un modelo de un sistema real dirigido experimentalmente con el propósito también de entender el comportamiento del sistema o de la evaluación de varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o grupo de criterios) para la operación del sistema.
- Estudia la comprensión de un modelo para aprender mas acerca de un sistema particular, un estudio simulado de un sistema o mecanismos requeridos por algunos tipos de modelos los cuales asumen o tienen la apariencia y/o comprensión de un sistema o mecanismo fuera de realidad.
- Es el proceso de determinación de la distribución muestral altamente irregular y definida complejamente estadística.
- Es la representación de un sistema mediante un mecanismo (como una computadora) que imita el comportamiento del sistema.
- La suposición de la apariencia de alguna cosa fuera de su realidad.
- Necesariamente implica el uso de expresiones matemáticas y ecuaciones que se aproxima estrechamente a fluctuaciones aleatorias en el sistema simulador, y que es tan complejo como para obtener una solución sin la ayuda de buenas computadoras electrónicas.
- Empleando un lenguaje especial para construir un procedimiento modelo que, en algún sentido, se comporte de manera semejante al prototipo. Este procedimiento modelo puede ser implementado en la computadora y hacer pruebas empleando diversos juegos de datos para definir problemas modelando bajo consideración.
- Una lógica representación matemática de un concepto, sistema u operación programada para solucionar rápidamente en una computadora electrónica.
- La técnica de emplear un modelo dinámico para describir el comportamiento del sistema con respecto al tiempo.
- El acto de representar algunos aspectos del mundo real por medio de números o símbolos que pueden ser fácilmente manipulables para facilitar su estudio.
- Representación de la realidad.
- El uso de un modelo para representar sobre el tiempo características esenciales de un sistema o proceso bajo estudio.
- El proceso del comportamiento de experimentos en un modelo de un sistema dentro de 1) experimentación directa con el sistema o, 2) directa solución analítica de algún problema asociado con el sistema.

## 1.6 Ventajas de la simulación

Permite estudiar sistemas reales que no se pueden evaluar analíticamente. En la práctica, la mayoría de los sistemas reales se estudian mediante simulación. De hecho la simulación es la técnica de Investigación de Operaciones más utilizada.

Hace posible estimar el comportamiento de un sistema existente si se modifican algunas de las condiciones de funcionamiento actuales.

Además para probar si esos cambios producen mejoras, no es necesario interrumpir el funcionamiento del sistema real.

Se pueden comparar distintas alternativas de diseño (o de formas de operar de un sistema), antes de construirlo, para ver cual se comporta mejor.

Permite estudiar en poco tiempo la evolución de un sistema en un periodo largo de tiempo: se pueden evaluar años de experiencia en el sistema real en unos pocos minutos de simulación. Alternativamente también permite lo contrario: estudiar los trabajos detallados de un sistema en un periodo de tiempo extendido.

Se puede utilizar para validar un modelo analítico: para construir un modelo analítico hemos tenido que hacer diversas hipótesis para que sea más simple. Si los resultados no difieren mucho de los obtenidos con simulación (con un modelo más cercano al sistema real), se puede utilizar el modelo analítico porque los resultados no son sensibles a las hipótesis que se han hecho.

## I.7 Desventajas de la simulación

No produce resultados exactos, sino estimaciones. Esto hará necesario utilizar las técnicas estadísticas para saber, por ejemplo, cuantas veces hay que ejecutar la simulación (número de muestras), para cada conjunto de datos de entrada y realizar estimaciones fiables de los parámetros de interés.

Desarrollar un modelo de simulación suele ser caro y lleva tiempo.

Es difícil demostrar la validez del modelo. Si el modelo no es válido, los resultados son poco útiles, ya que la información que estamos obteniendo del modelo de simulación no es representativa del sistema real que nos interesaba estudiar.

Es difícil encontrar el óptimo: sólo se puede encontrar el mejor entre varias alternativas. Es habitual que haya muchas alternativas y no se pueden probar todas. Las técnicas estadísticas de diseño de experimentos que ayudan a solucionar el problema no son conocidas por muchas personas que hacen simulaciones.

## I.8 Errores frecuentes en los estudios de simulación

No tener bien definidos los objetivos al comienzo del estudio.

Elegir un nivel de detalle inapropiado.

Tratar un estudio de simulación como si fuera principalmente un problema de programación.

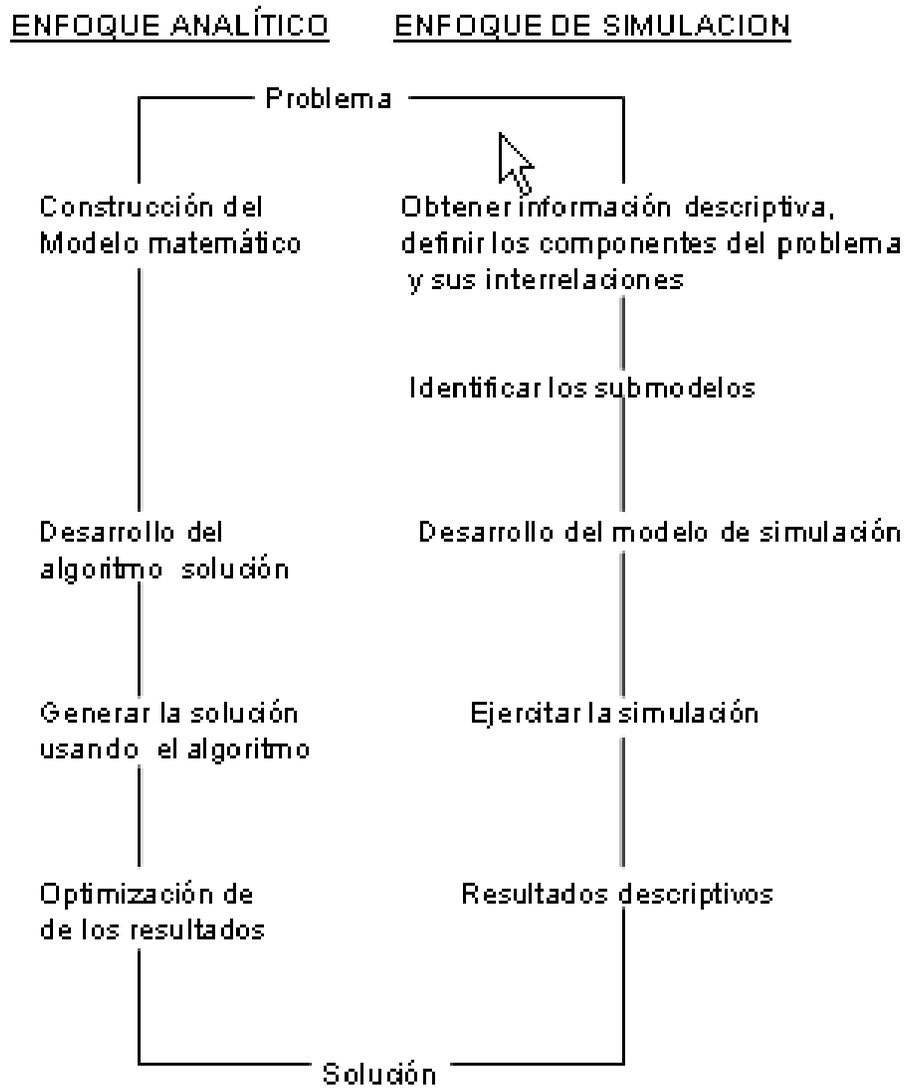
Confiar en simuladores que hacen la simulación accesible a "todo el mundo".

Analizar los datos de salida a partir de una sola ejecución, tratándola como la solución verdadera.

Fallar en la comunicación con las personas que conocen realmente el sistema.

No modelizar correctamente las distintas fuentes de aleatoriedad del sistema real.

## I.9 Enfoque Analítico vs. Enfoque de Simulación



La línea sólida que conecta el bloque al generar la solución usando algoritmo a el bloque "resultados descriptivos" refleja el hecho de que todos los modelos analíticos no necesariamente resulta en una solución óptima.

### I.10 Proceso modelación - simulación

#### Primer paso

Identificación del problema, incluye la obtención de información que describe los diferentes variables de insumo, identificación de las restricciones del sistema, definición de los componentes del sistema y sus interrelaciones, etc.

#### Segundo paso :

Formulación del modelo, esta relacionado con la construcción del modelo de simulación y definición de los procedimientos estadísticos (diseño de experimentos) que serán utilizados para ejercitar el modelo. Ya que la simulación involucra la conducción de experimentos de muestras sobre un modelo del sistema real, los resultados son observaciones muestrales o estadísticas muestrales. El objetivo del análisis estadístico, es asegurar que el problema sea concluido estadísticamente en forma adecuada, esto es, que el número de condiciones del modelo y los casos examinados sean suficiente para obtener inferencias estadísticas validas de los resultados.

#### Tercer paso :

Validación, esta relacionado con el asegurar que los insumos de la simulación son adecuadamente modelados y que el modelo responda a esos insumos en una manera similar a el problema actual (real). Un número de pruebas estadísticas y procedimientos son usados en la validación. Si un dado modelo no simula adecuadamente la respuesta del sistema actual, entonces las dos primeras etapas deben ser reexaminadas para identificar factores o relaciones omitidas.

Una vez que el modelo ha sido validado, el proceso de simulación actual (análisis) puede iniciar. Esto incluye (1) generación de los insumos del sistema, (2) ejercitar el modelo y (3) obtener los datos de la simulación.

Dos cosas deben ser consideradas en el proceso de simulación o primero, para un dado conjunto de condiciones del modelo, se debe asegurar que un número adecuado de experimentos de muestra (interacciones de la simulación) se han realizado. Cada iteración de la simulación es análoga a una simple observación; corriendo  $n$  iteraciones, por esto es análogo a obtener una muestra de tamaño  $n$  en terminología estadística, la medida de una muestra de  $n$  artículos es  $\bar{X}$ , la medida muestral. Si se van a hacer algunas inferencias sobre la media poblacional ( $\mu$ ) para el problema del mundo real, entonces un tamaño adecuado de muestra debe ser empleado.

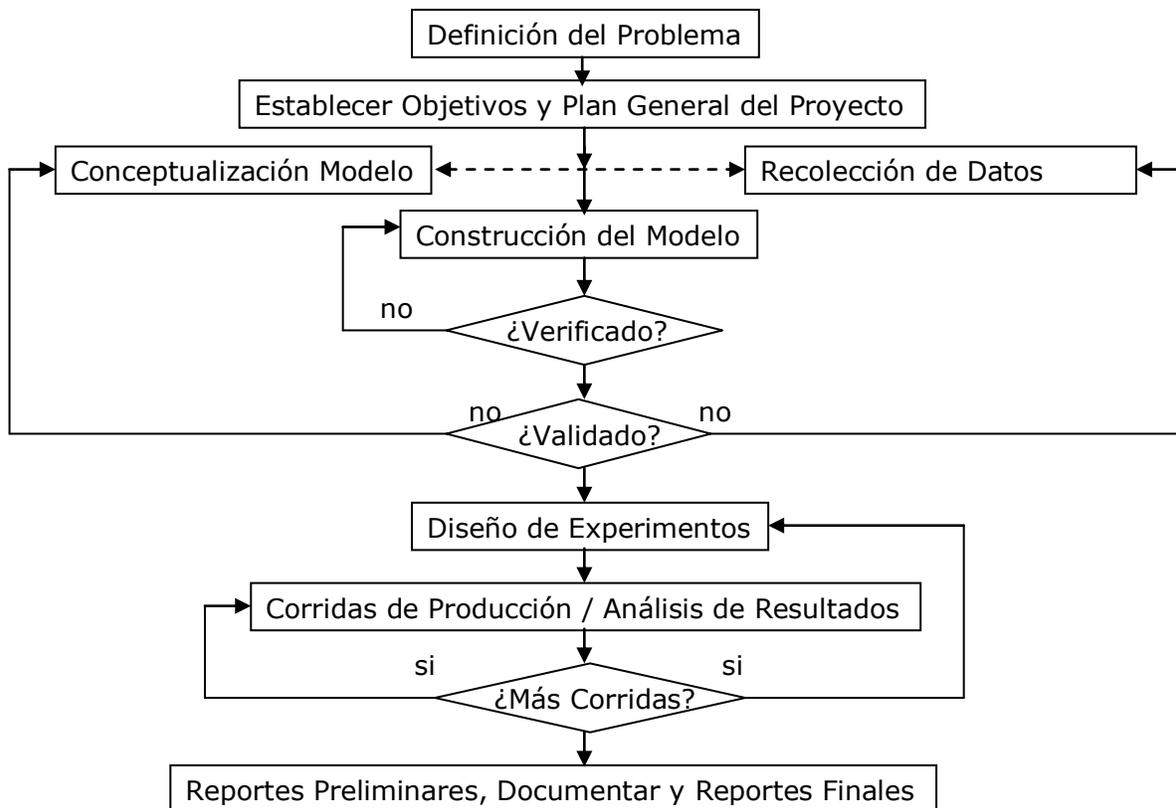
La aproximación de la media muestral a la poblacional depende las condiciones iniciales de la simulación y del número de iteraciones empleado.

La segunda situación que debe considerarse en el proceso de simulación es que si las inferencias se van a realizar sin importar el funcionamiento del problema del mundo real, deben analizarse diferentes condiciones y parámetros del modelo.

Las condiciones, reglas de decisión y estructura del sistema que van a ser examinados son identificados como parte del diseño de experimentos.

### I.11 Etapas de un Proyecto de simulación

**En general el proceso es...**



### Etapas de una simulación

En el desarrollo de una simulación se pueden distinguir las siguientes etapas (Banks *et al.*, 1996):

Definición y formulación del Problema:

Define el Problema a ser estudiado, incluyendo una declaración escrita del objetivo. En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. El cliente y el desarrollador deben acordar lo más detalladamente posible los siguientes factores: los resultados que se esperan del simulador, el plan de experimentación, el tiempo disponible, las variables de interés, el tipo de variaciones (alteraciones) a estudiar, el tratamiento estadístico de los resultados, la complejidad de la interfaz del simulador, etc. Se debe establecer si el simulador será operado por el usuario o si el usuario sólo recibirá los resultados. Finalmente, se debe establecer si el usuario solicita un trabajo de simulación o un trabajo de optimización.

Conceptualización Modelo:

Abstraer el sistema en un modelo describiendo todos sus elementos, sus características y sus interacciones (gráficos).

Definición del sistema: El sistema a simular debe estar perfectamente definido. El cliente y el desarrollador deben acordar dónde estará la frontera del sistema a estudiar y las interacciones con el medioambiente que serán consideradas.

**Formulación del modelo:** Esta etapa es un arte y será discutida más adelante. La misma comienza con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos relevantes del sistema real. Los aspectos relevantes del sistema real dependen de la formulación del problema; para un ingeniero de seguridad los aspectos relevantes de un automóvil son diferentes de los aspectos considerados por un ingeniero mecánico para el mismo sistema. Este modelo simple se irá enriqueciendo como resultado de varias iteraciones.

**Recolección de Datos:**

Identificar, especificar y recolectar datos en apoyo del modelo. La naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.

**Construcción del Modelo:**

Traducir el modelo conceptualizado utilizando los constructos de algún lenguaje de simulación.

**Implementación del modelo en la computadora:** El modelo es implementado utilizando algún lenguaje de computación. Existen lenguajes específicos de simulación que facilitan esta tarea; también, existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales.

**Verificación y Validación:**

Establecer si el modelo ejecuta lo que postula y si existe una concordancia entre el modelo y el sistema real.

**Verificación:** En esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores durante la implementación del modelo. Para ello, se utilizan las herramientas de Depuración (*debugging*) provistas por el entorno de programación.

**Validación:** 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.

**Conducir Experimentos:**

Hacer corridas de simulación controladas, modificando los niveles de una variable de control y manteniendo el resto exactamente igual. La variación en la salida se atribuye a estos cambios.

**Diseño de experimentos.** En esta etapa se decide las características de los experimentos a realizar: el tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones. No se debe incluir aquí la elaboración del conjunto de alternativas a probar para seleccionar la mejor, la elaboración de esta lista y su manejo es tarea de la optimización y no de la simulación. Debe quedar claro cuando se formula el problema si lo que el cliente desea es un estudio de simulación o de optimización.

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

**Analizar Resultados:**

Estudiar los resultados de la simulación para inferir nueva información y hacer recomendaciones para la resolución del problema.

**Interpretación.** Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre. Si es necesario, se deberán recolectar datos adicionales para refinar la estimación de los parámetros críticos.

**Documentación.** Incluye la elaboración de la documentación técnica y manuales de uso. La documentación técnica debe contar con una descripción detallada del modelo y de los datos; también, se debe incluir la evolución histórica de las distintas etapas del desarrollo. Esta documentación será de utilidad para el posterior perfeccionamiento del simulador.

**Implementación:**

Implementación: Conviene acompañar al cliente en la etapa de implementación para evitar el mal manejo del simulador o el mal empleo de los resultados del mismo.

A nivel de detalle:

Definición del problema

- Partir con supuestos adecuados
- Trabajar en el Problema Correcto
- Manejar expectativas
- Preguntar Hábilmente
- Escuchar sin Juzgar
- Comunicar Abiertamente
- Pronosticar la Solución

Conceptualización Modelo

Establecer Objetivos  
 Identificar y priorizar preguntas claves  
 Salidas requeridas para dar respuesta a preguntas claves  
 Establecer los límites del modelo y restringir los detalles  
 Especificar las entradas al modelo

Recolección de Datos

- Una vez que la propuesta ha sido aceptada, se debería preparar un programa de requerimiento de datos.
- La conceptualización del modelo y la recolección de datos son actividades que se realizan en paralelo.
- La conceptualización indica el tipo de datos que se requieren y en que forma. Los datos recolectados permiten, a su vez, refinar y reforzar el concepto del modelo.

Construcción del Modelo

- El Modelo conceptual se traduce a un modelo computacional utilizando lenguajes de propósito general o bien paquetes de aplicación tales como Arena, Promodel, Extend, GPSS y otros.
- Se debe tener en cuenta que un paquete de aplicación se ajusta mejor a los requerimientos del sistema real, considerando las particularidades de cada lenguaje de simulación (construir un modelo de simulación aportando “constructos” adecuados al sistema)
- Foco en el Problema.  
 Construir el modelo no es la tarea principal; lo es encontrar la solución correcta.
- Partir con un Modelo Simple  
 Agregar el detalle; no partir con él
- Frenar la complejidad  
 No permitir que el modelo se vuelva complicado compensando un mal diseño, o tan complejo que va más allá de la posibilidad de implantarlo
- Mantener Momentum  
 Es mejor muchos hitos intermedios que una fecha límite de término.
- Revisiones.  
 Darse tiempo para realinear el proyecto.

¿Verificado?

- Verificación se refiere al modelo operacional. ¿Está funcionando adecuadamente?; esto es, ¿está haciendo lo que se supone que debería hacer?
- ¿Los datos son los apropiados?, ¿son razonables?; ¿el modelo computacional refleja con exactitud el modelo conceptual?

- No es razonable y altamente no recomendable esperar llegar al final para hacer esta tarea. La construcción del modelo operacional o simulador debe cumplir con todas las especificaciones de aseguramiento de calidad del desarrollo de software.

#### ¿Validado?

- En la validación se debe determinar si el modelo conceptual es una representación apropiada del sistema real; esto es, ¿refleja lo que se supone que debe representar? ¿Puede el modelo sustituir al sistema real para propósitos de experimentación?
- Esta actividad en realidad debe ser considerada como un proceso continuo; cada etapa debe verificarse: ¿está el problema claramente definido?; ¿el modelo conceptual es razonable?; ¿son los datos de entrada representativos de la realidad?

#### Diseño de Experimentos

- Para cada escenario que se simulará es preciso establecer:  
El largo de la corrida de simulación, la puesta a punto del simulador (inicialización) y el número de réplicas para cada escenario

#### Corridas de Producción y Análisis

- Las Corridas de Producción y su posterior análisis, se utilizan para estimar las medidas de desempeño de los distintos escenarios que se están simulando.

#### ¿Más corridas?

- Basado en el análisis de las corridas que se han realizado, se debe determinar si se requieren corridas adicionales o si es necesario estudiar otros escenarios.
- Se requieren más corridas, cuando los resultados estadísticos no permiten aceptar o rechazar una hipótesis;
- Se requiere estudiar nuevos escenarios, para tener una mayor comprensión del sistema bajo estudio lo que obliga a menudo a estudiar otras situaciones.

#### Documentación y Reportes

- La documentación y reportes es necesaria por varias razones obvias. Si el simulador se utilizará otra vez con mayor o menor frecuencia por el mismo u otros analistas es necesario saber qué hace y cómo lo hace. Lo mismo ocurre si el simulador es un prototipo y debe ser modificado en el futuro.
- Es importante documentar cada etapa del esfuerzo de simulación junto con su ejecución; con esto se asegura que nada quedará en el tintero. La otra razón es entregar al cliente informes de avance en cada etapa y obtener su aprobación, especialmente en la definición del problema.

Conjunto de documentos formales a entregar debe contener a lo menos:

- Definición de Objetivos y Metas.
- Plan de Trabajo: (Carta Gantt o Pert)
- Supuestos para el Modelo
- Modelo Conceptual
- Registro de Cambios
- Modelo Operacional
- Datos de Prueba

#### ¿Cuándo es adecuado usar la simulación?

Paul Fishwick ("*Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds.*" Prentice-Hall. Estados Unidos, 1995) señala que la simulación es recomendable cuando:

- 1) El modelo que representa al sistema bajo estudio es muy complejo, posee muchas variables y componentes que interactúan.
- 2) Las relaciones entre las variables son no lineales.
- 3) El modelo contiene variables aleatorias.

- 4) Se requiere una visión animada de los resultados arrojados por el modelo.

No obstante que la simulación es por mucho la mejor herramienta para estudiar y observar el comportamiento o la operación de un sistema, es necesario hacer algunas advertencias relativas a su uso:

- En ocasiones los proyectos de simulación consumen mucho tiempo.
- Por lo general los modelos de simulación requieren de muchos datos.
- Los resultados pueden ser malinterpretados.
- Algunos factores técnicos y humanos pueden ser ignorados.
- La validación de los modelos de simulación suele ser difícil

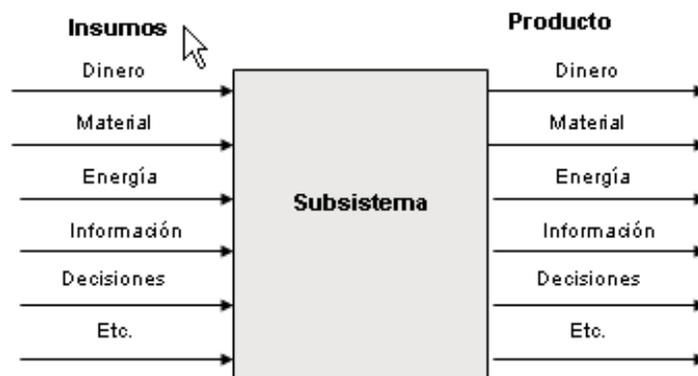
### I.12 Sistemas

Un sistema puede ser visto como una sección de la realidad. Por esto, todo puede ser pensado como un sistema; un átomo es un sistema compuesto de protones, neutrones, y electrones; cualquier objeto es un sistema de átomos; el mundo es un sistema de varios objetos dentro y sobre la tierra; el sistema solar es un sistema compuesto del sol, nuestra tierra, y otros planetas; la vía láctea es un sistema compuesto de nuestro sistema solar y muchos otros sistemas de estrellas y sus planetas que las orbitan; y finalmente, el universo es un sistema compuesto de la vía láctea y muchas otras galaxias.

Una propiedad común de todos los sistemas físicos es que ellos están formados de componentes que interactúan unos con otros. Como otros sistemas físicos, los sistemas hechos por el hombre están formados de componentes que interactúan unos con otros; un martillo es un sistema que consiste de una cabeza de metal y un mango de madera que transfiere la fuerza muscular humana a la cabeza del martillo; un carro es un sistema que consiste en chasis, motor, transmisión, carrocería y elementos interiores; una computadora es un sistema de procesadores, varias clases de módulos de memoria y dispositivos de entrada/salida.

Todos los componentes en estos sistemas interactúan unos con otros, directa o indirectamente. La naturaleza de estas interacciones esta determinada las leyes físicas de la naturaleza así, como también de esquemas de control hechos por el hombre basados en reglas hechas por el hombre. Una característica importante de los sistemas es que pueden ser separados en subsistemas. La forma en que esta separación se realiza en cualquier situación particular dependerá de la naturaleza del sistema que esta siendo estudiado, y además a la extensión a los cuales los detalles son importantes. Para decidir la cantidad de subsistemas en detalle necesarios pueden requerir un análisis profundo del sistema y sus interacciones.

Más general, los flujos entre subsistemas puede referirse a Dinero, Materiales, Energía, Información, decisiones, sugerencias, Ordenes, Demanda, etc. Los diagramas de flujo proveen una invaluable herramienta para ayudar a clarificar nuestro pensamiento particular acerca del sistema.



Familias, comunidades, países, y sus complejas organizaciones socio técnicas y socioeconómicas tales como fábricas, bancos, y gobiernos son otras formas de sistemas hechos de muchos componentes que interactúan. Estas interacciones son gobernadas en una gran parte por el comportamiento social, el cual esta basado en normas y valores humanos.

Todos estos sistemas pueden ser considerados componentes de otros sistemas de superiores (Supra sistemas). En otras palabras, cada sistema es también un subsistema (con la posible excepción del universo mismo).

Debido a que todos los componentes de un sistema interactúan con los otros, esto conduce al hecho de que cada sistema esta influenciado por otros sistemas. Esto es, ningún sistema en su totalidad esta aislado de fuerzas externas.

Un conjunto de subsistemas puede ser identificado como un sistema específico y ser hipotéticamente aislado de otros sistemas solamente si es el foco de un estudio. Estas fronteras de aislamiento, sin embargo, pueden ser dibujadas únicamente con un estudio cuidadoso de las fuerzas externas. Si las influencias externas tienen un gran impacto tal que afectan el comportamiento del sistema en cuestión en muchas formas, entonces las fronteras deben ser expandidas para incluir esos sistemas. Cualquier sistema que influencia a nuestro sistema en su comportamiento debe ser considerado, y se le denomina supra-sistema.

El sistema forma parte de una jerarquía de los sistemas. Existe usualmente una fuerte interacción entre los varios sistema la cual ocurre al mismo nivel jerárquico y entre sistemas a diferentes niveles jerárquicos. Los sistemas en la cúspide son los mas importantes porque ejercen una influencia considerable sobre los sistemas de inferior jerarquía.

El estudio de una intersección de calles donde el tráfico se controla a través de un semáforo. Se desea encontrar la duración óptima de las luces del semáforo para las diferentes calles de la intersección de tal manera que el tiempo de todos los carros que llegan a la intersección sea minimizado. Este sistema depende de otras intersecciones que conducen a esta y de las diferentes situaciones que existan entre estas dos intersecciones (salidas a otras calles, comportamientos diversos debidos a ciertos negocios, escuelas, empresas de gobierno, etc. a diversas horas del día)

Un sistema es una parte de la realidad que es el enfoque primario de un estudio y esta formado de componentes que interactúan uno con el otro de acuerdo a ciertas reglas con fronteras (restricciones) identificadas con el propósito del estudio. Un sistema puede desarrollar una función que no puede ser desarrollada por sus componentes individuales.

Los sistemas tienen objetivos conflictivos. No es una tarea fácil obtener los objetivos correctos de un sistema, pero es la clave para el diseño exitoso del sistema.

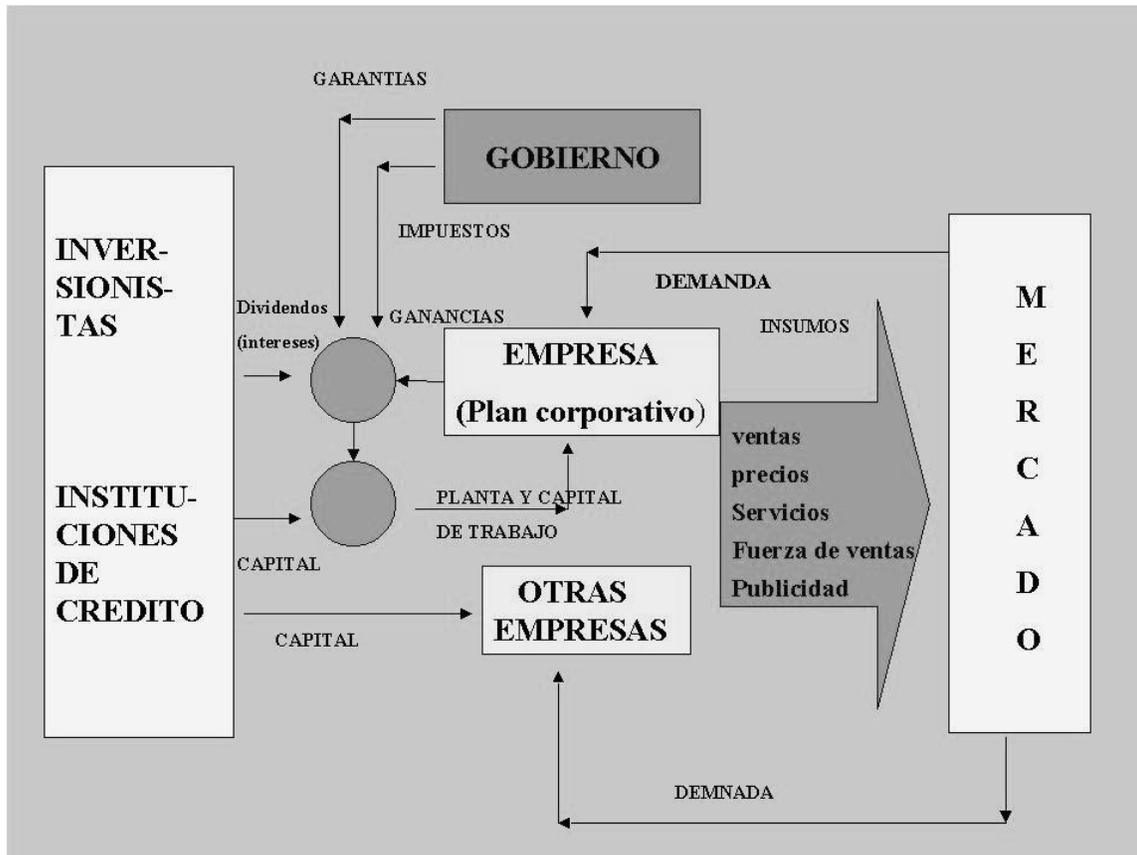
Qué es más importante en una empresa:

- Minimizar los costos de operación
- Obtener altos estándares de seguridad
- Maximizar la facilidad de mantenimiento
- ¿o que?

Se podrá escribir una gran lista de objetivos posibles, sin embargo, estos objetivos generalmente tenderán a estar en conflictos uno con el otro.

Los sistemas deben ser diseñados para ser capaces de lograr sus objetivos. Lograr los objetivos generales puede ser difícil y complicado, y puede que se requiera análisis, planeación y diseño sobre un largo periodo de tiempo.

A continuación se presenta el supra-sistema que influye el establecimiento de un plan corporativo de una empresa:



### Clasificación de los sistemas

Los parámetros y las variables son medidas que caracterizan al sistema.

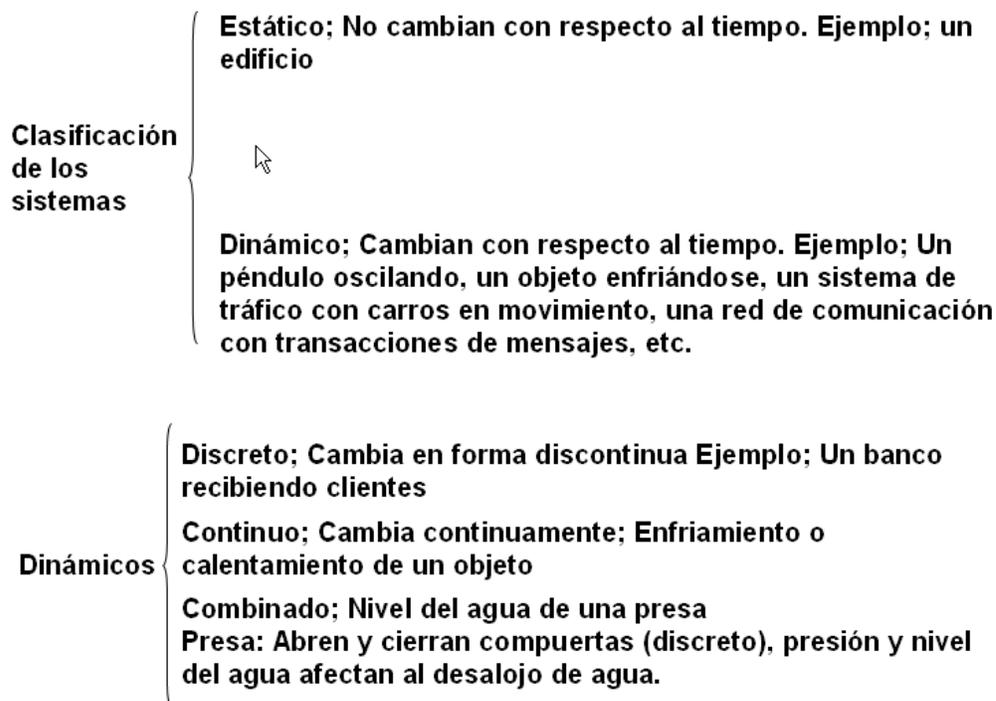
**Parámetros;** Son medidas independientes que configuran las condiciones de los datos y la estructura del sistema (son controlables) Ejemplo; peso y longitud del péndulo

**Variables;** Son medidas que dependen de los parámetros y de otras variables (medidas que caracterizan al sistema) Ejemplo; Velocidad del rango de oscilación y depende del peso y la longitud del péndulo; el número de partes esperando ser procesadas y su tiempo de espera.

Por ejemplo:

- La oscilación de un péndulo
- Un objeto enfriándose
- Un sistema de tráfico con carros en movimiento
- El piso de fabricación con partes en movimiento, herramientas y trabajadores
- El medio ambiente de una oficina con transacciones de documentos
- Una red de comunicación con transacciones de mensajes
- Una computadora con transacciones de datos

El conjunto de valores de algunas variables en un sistema en cualquier punto en el tiempo son llamadas el estado del sistema en ese punto en el tiempo. Los sistemas se pueden clasificar en estáticos y dinámico. Por definición, un estado estático es aquel que no cambia con respecto al tiempo. El estado dinámico cambia con respecto al tiempo.



Enfoque de sistemas: debido a que los elementos de un sistema son interdependientes, no es posible conocer la respuesta del sistema estudiando aisladamente a cada elemento es por esto que se requiere realizar un enfoque de sistemas pues éste puede ser dividido en su estructura, pero tal vez no en sus funciones. Para poder ver a un sistema como un todo es necesario entender las relaciones causa-efecto así como las de decisión-respuesta.

### I.13 Control

El tema del CONTROL es importante para muchos estudios de análisis y diseño de sistemas. Algunos problemas comunes de control son:

- Control de tráfico
- Control de contaminación
- Control de producción e inventario
- Control de población, etc.

En muchos estudios el objetivo es diseñar un mecanismo de control para dichos sistemas que logran el desempeño deseado por el sistema. Control es un mecanismo dentro de todo sistema biológico y algunos sistemas dinámicos hechos por el hombre que dirigen el sistema hacia un conjunto de metas.

Ejemplo:

- El piloto automático de un avión
- Un sistema de aire acondicionado
- El gerente operativo de una compañía, etc.

Una bala que ha sido disparada hacia un blanco no tiene mecanismo de control.

Un mecanismo de control puede usar información sobre lo que entra, sale del sistema y su estado interno (parámetros de sistema y los valores de sus variables)

Un sistema que usa un mecanismo de control generalmente usa FEEDBACK (Retroseso) o FEEDFORWARD (Avance) o ambos tipos. La información es recibida a través de un componente del mecanismo de control denominado sensor. La información Feedback se refiere al estado actual del sistema. La información Feedforward se refiere al estado actual del medio ambiente dentro del cual el sistema dinámico opera.

Los mecanismos de control que están basados no únicamente en información retroalimentada (feedback) comparan con el estado actual del sistema, con la meta fijada y toman las acciones correctivas.

En el control FEEDFORWARD las perturbaciones ambientales son medidas antes de que afecten al sistema, y es tomada una acción correctiva por anticipado.

El sistema de piloto automático del avión:

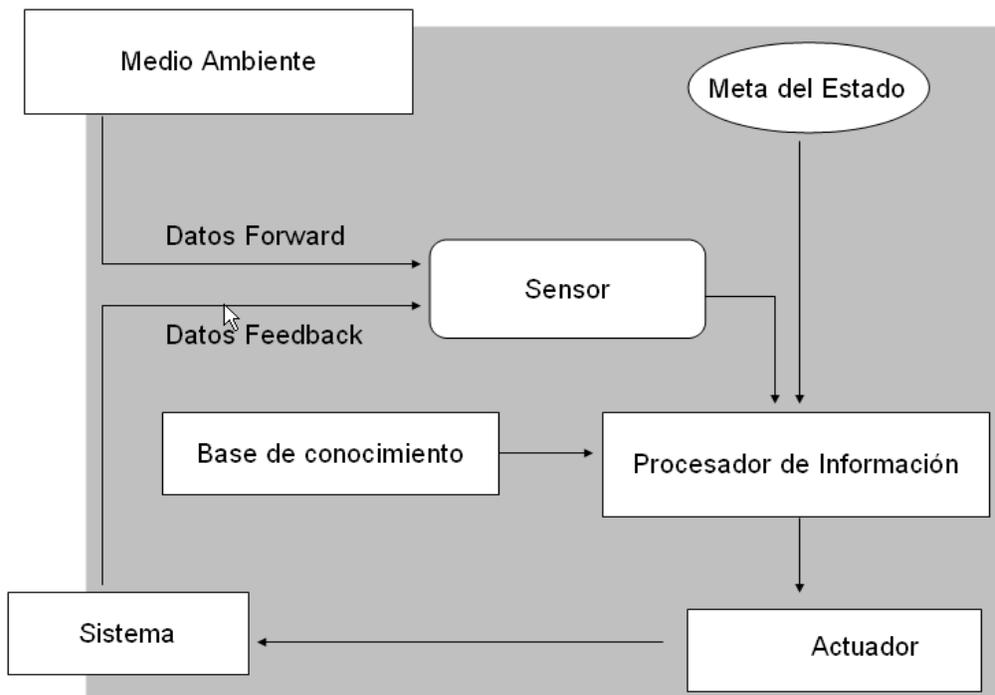
FEEDBACK: La dirección, altitud, velocidad, etc., son leídas por el mecanismo de control a través de SENSORES (medidores de altitud, velocidad, giroscopios, etc.) y es comparado con los valores de las metas fijadas para esas medidas.

La desviación calculada de lo deseado es usada junto con la información FEEDFORWARD sobre el medio ambiente (dirección y velocidad del aire, etc.) para actuar sobre los elementos de control (alerones, ruteadores, etc.) en ciertas direcciones y magnitudes para suavemente alcanzar la meta fijada por el sistema del avión.

Los principales elementos de los mecanismos de control son:

Sensores, Bases del conocimiento, Procesadores de información, y Actuadores

### Estructura de un mecanismo de control combinado feedback/feedforward



El termino CONTROL ÓPTIMO se refiere a las condiciones específicas de control para las que se logra el mejor desempeño del sistema. La medida del desempeño esta generalmente expresada por una relación conocida como FUNCIÓN OBJETIVO. La FUNCIÓN OBJETIVO representa los indicadores generales del desempeño del sistema que nosotros deseamos optimizar.

*Controles:* son los que deciden cómo, cuándo y dónde se realizan las acciones, así como también, determinan la acción cuando se presentan ciertos eventos o condiciones. En el más alto nivel, los controles los podemos encontrar en forma de políticas, planes u horarios, mientras que en un nivel bajo están en forma de procedimientos o programas.

#### I.14 Moviendo la simulación a través del tiempo

Se debe tener cuidado con los diferentes problemas de muestreo involucrados en la simulación pero también se debe tener cuidado con la necesidad de llevar un seguimiento del tiempo relacionado a todos los eventos (arribos, salidas, fallas, ordenes de clientes, envíos, etc.) que ocurren con el paso del tiempo. En el caso de moto bombas de occidente, por ejemplo se debe llevar un seguimiento de cuando una falla ocurre, de cuando la persona de mantenimiento inicio la reparación de la maquina, y de cuando la reparación ha sido terminada y la maquina esta nuevamente disponible para dar servicio.

Existen dos enfoques para llevar un seguimiento de los eventos en una simulación; incremento de tiempo fijo (llamado también de tiempo parcial) e incremento de tiempo variable (llamado también de evento secuenciado).

En la simulación con incremento de tiempo fijo el reloj del sistema es avanzado un incremento de tiempo fijo. En cada punto sucesivo en el tiempo simulado, el modelo es revisado para determinar si han ocurrido algunos eventos en el incremento de tiempo. Cuando se encuentra que ha ocurrido un evento, el modelo es actualizado; y si no han ocurrido eventos en ese incremento de tiempo, el reloj del sistema se incrementa nuevamente.

La principal ventaja del método de incremento fijo es que la secuencia actual de los eventos no necesita ser puesta en memoria ya que la posible ocurrencia de cada evento es revisada en cada incremento de tiempo. La desventaja de este método es que los incrementos de tiempo deben ser cortos en comparación con el tiempo promedio del evento; por esto es necesario eliminar las demasiadas revisiones en que se puede incurrir, ya que durante algunos incrementos de tiempo, nada ha sucedido.

En la simulación con incremento de tiempo variable, el reloj del sistema es avanzado al tiempo de ocurrencia del próximo evento, sin importar ser un día o meses en el tiempo simulado. Utilizando el método de incremento variable, un calendario de tiempo debe ser llevado para cada evento, pero esto es computacionalmente más eficiente.

La mayoría de las simulaciones emplean el método del incremento del tiempo variable y la mayoría de los lenguajes de simulación son construidos sobre este concepto. En estas notas se cubrirá el incremento de tiempo variable pero se identificara a los lenguajes que emplean ambos métodos.

#### I.15 Modos de estado Transitorio y Estacionario

Se dice que un sistema esta en el modo de estado estacionario cuando cambios en el estado del sistema toman lugar dentro de un rango relativamente fijo.

Los cambios el modo de estado transitorio siguen un patrón creciente o decreciente con respecto al tiempo.

Los cambios en el sistema durante el período de estado ESTACIONARIO son independientes del tiempo.

## I.16 Características de los Sistemas Discretos

Los sistemas discretos difieren de los sistemas continuos en que la fuente de su dinamismo (la instalación física) es en forma disjunta (unidades, carros, gente, etc.) en lugar de en forma conjunta (líquido, gas, calor, etc.) Básicamente, un sistema está compuesto por entidades, actividades, recursos y controles; estos elementos definen quién, qué, dónde, cuándo y cómo acerca del procesamiento del sistema.

Cada unidad disjunta de una instalación es una ENTIDAD, por lo que una entidad es una commodity cuyo movimiento en el sistema causa cambios discretos en el estado del sistema. Los mensajes y señales en un sistema de comunicación, por ejemplo, pueden ser consideradas como entidades.



Entidades: son los artículos procesados a través del sistema, tales como productos, clientes y documentos. Se pueden clasificar en tres tipos:

Humanos o animados (clientes, pacientes, etc.).

Inanimados (partes, papelería, etc.).

Intangibles (llamadas, correo electrónico, proyectos, etc.).

Los sistemas discretos pueden tener variables continuas: La distancia entre entidades carro es una variable continua. Las entidades se pueden transformar en otras entidades con características variadas. También pueden dividirse en un número mayor de entidades y varias entidades pueden combinarse para formar entidades más pequeñas. Los cambios en el estado del sistema son causados por el movimiento de las entidades.

A las acciones que consumen tiempo en un sistema discreto (sin considerar la espera en la cola) se llaman ACTIVIDADES. Por lo que en un sistema discreto, el estado del sistema cambia únicamente en tiempos del evento que toman lugar al inicio o al final de las actividades. La actividad representa un periodo de tiempo de longitud específica. Las actividades son las tareas que se realizan en el sistema, tales como llenado, corte, reparación, atención al cliente, etc. Las actividades tienen una duración y por lo general utilizan recursos. Ejemplo: Un banco está siendo estudiado, los clientes pueden ser una de las entidades, el balance de sus cuentas de cheques puede ser un atributo, y realizar los depósitos podría ser una actividad.

Es esencial para el estudio de sistemas discretos reconocer las ENTIDADES y sus rutas, la naturaleza de las ACTIVIDADES, las diversas condiciones del comportamiento que gobierna al sistema, las ocurrencias que conducen a los eventos y el impacto de los eventos sobre el sistema.



Un sistema de transporte puede incluir tanto gente como autobuses que cargan, transportan y descargan gente. La gente puede tener diferentes características tales como su destino deseado y la cantidad de dinero que pueden gastar. Además, los autobuses pueden tener diferentes capacidades, pueden ser asignados a rutas diferentes, y pueden ser de tipo regular o express con boletos de precio diferente. Las ENTIDADES pueden tener diferente tipo de relación con otra. Ejemplo. un autobús-entidad puede llevar varios pasajeros-entidad, y un policía-entidad puede detener al autobús-entidad.

Las entidades están caracterizadas por sus ATRIBUTOS. Cada entidad puede tener varios atributos. Una colección de atributos es llamada conjunto de atributos.

Atributos para un cliente: Nombre, edad, tiempo de arribo, tipo de deposito, etc.  
Atributos de un autobús: Nombre, tonelaje, tiempo de carga, velocidad, etc.

Los atributos de las entidades pueden ser observados únicamente la entidad esta presente.

En el curso de las actividades, las entidades pueden algunas veces necesitar usar o soltar ciertos RECURSOS que tienen disponibilidad limitada (las cajeras en un banco).

Los RECURSOS son los medios por los cuales se ejecutan las actividades, por ejemplo: personal, equipo, herramientas, energía, tiempo, dinero, etc. Los recursos pueden tener características tales como capacidad, velocidad, tiempo de ciclo y confiabilidad, asimismo, son los que definen quién o qué realiza la actividad y en dónde.

El estado de un sistema es definido ser una colección de variables necesarias para describir un sistema en cualquier momento, relativo a los objetivos de estudio. En un banco, las posibles variables de estado son el número de cajeros, el número de clientes esperando en línea para ser atendidos, y el tiempo de arribo del próximo cliente.

El estado del sistema cambia en ciertos instantes en el tiempo en el cual ocurrencias significativas toman lugar. Estas ocurrencias significativas que resultan en un cambio en el estado del sistema discreto son llamadas EVENTOS. El término endógeno es usado para describir actividades y eventos que ocurren dentro del sistema, y el término exógeno es utilizado para describir actividades y eventos que ocurren en el medio ambiente del sistema. En un banco, el arribo de los clientes es un evento exógeno, y la terminación del servicio es de un cliente es un evento endógeno.

Medidas del rendimiento de un sistema: el rendimiento de un sistema se mide por su efectividad y eficiencia en alcanzar los objetivos para los cuales fue diseñado. En muchas situaciones, los objetivos se fijan en función de la efectividad en costos o la utilidad generada por el sistema. Los datos para determinar tales medidas de rendimiento suelen ser: *precios, costos, y características cuantitativas del funcionamiento del sistema*. Los objetivos del sistema se satisfacen cuando las medidas del rendimiento alcanzan los niveles deseados.

VARIABLES GLOBALES: tiempo transcurrido, número de jugadores, marcador, tamaño de la cola, número de personas en la cola, etc.

Ejemplo: Un banco está siendo estudiado, los clientes pueden ser una de las entidades, el balance de sus cuentas de cheques puede ser un atributo, y realizar los depósitos podría ser una actividad.

Ejemplos de sistemas y componentes

Sistema	Entidades	Atributos	Actividades	Eventos	Variables de Estado
Banco	Clientes	Cuenta de cheques	Realizar depósitos	Llegadas o Salidas	Número e cajeros ocupados; número de clientes esperando
Tren Rápido	Viajeros	Origen, Destino	Viajar	Llegadas a la estación y a su destino	Número de viajeros esperando en cada estación; número en tránsito
Producción	Máquinas	Velocidad; Capacidad; tasa de fallas	Soldado, estampado, fresado, cortado, etc.	Fallas	Estado de las máquinas (Ocupada, Ociosa, o descompuesta)
Comunicaciones	Mensajes	Longitud; Destino	Transmisión	Arribo al destino	Número en espera de ser transmitidos
Inventario	Almacén	Capacidad	Entradas o Salidas	Demanda	Niveles de inventario; Demanda atrasada

RESUMIENDO:

Las entidades llevan atributos y toman sobre varias actividades rutas para moverse en el sistema, usan varios recursos, y crean eventos para cambiar el estado del sistema, mientras se mantienen ciertas relaciones lógicas.

**SISTEMA:** Una sección de la realidad en forma de un conjunto de componentes conectados de tal forma que puedan realizar una función no realizable por los componentes de manera individual.

**PARÁMETROS:** Cantidades en el sistema que no cambian a menos que el analista lo desee.

**VARIABLES:** Cantidades en el sistema que son determinadas por la relación funcional y que cambian con respecto al tiempo en sistemas dinámicos.

**ESTADO DEL SISTEMA:** Una fotografía del sistema en cualquier punto en el tiempo caracterizado por los valores de algunas variables del sistema seleccionadas.

**EVENTOS:** Los cambios en el estado de un sistema discreto.

**ENTIDADES:** Objetos en el sistema dinámico cuyo movimiento dentro del sistema puede resultar en la ocurrencia de eventos.

**ATRIBUTOS:** Características y propiedades que describen entidades.

**RELACIONES:** Expresiones de la dependencia entre los elementos como variables, parámetros, y atributos de un sistema.

**ACTIVIDADES:** Elementos que consumen tiempo en un sistema cuyo inicio o termino coinciden con las ocurrencias del evento.

**RECURSOS:** Comodidades limitadas que son usadas, consumidas, o llenadas por las entidades.

**CONTROL:** Un mecanismo que dirige a un sistema dinámico hacia un conjunto de metas.

**ESTADO TRANSITORIO:** Una condición típica que impone dependencia del tiempo y perturbaciones radicales sobre el estado del sistema.

**ESTADO ESTACIONARIO:** Una condición típica en la que los cambios en el estado del sistema están dentro de un rango fijo y son independientes del tiempo.

I.17 Modelos

Para analizar un sistema, primero se debe expresar el sistema en una forma de representación. Esta representación es llamada MODELO.

Ejemplo:

Un poeta puede ver un árbol (sistema) y representarlo en palabras que describen al árbol (Representación verbal). Un pintor puede ver el mismo árbol pero expresarlo a través de una

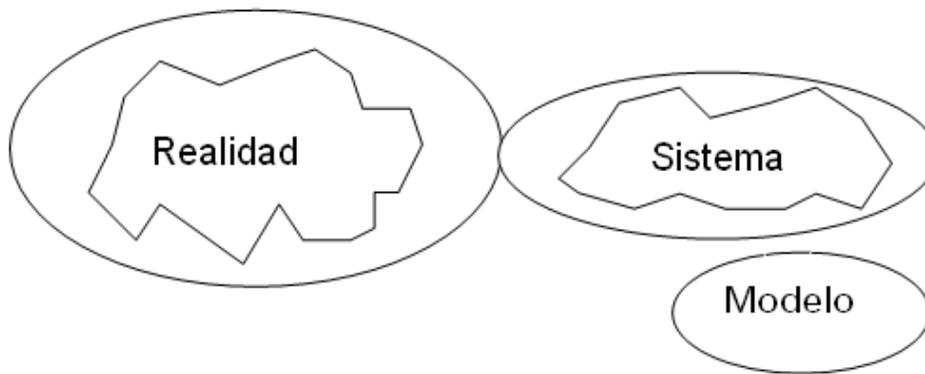
pintura (representación pictórica). Aunque la pintura y el poema son muy diferentes, ellos son modelos del mismo sistema.

Los modelos raramente combinan todos los factores acerca del sistema: por lo que son abstracciones del sistema. Ciertas formas de representación, sin embargo, son más eficientes combinando ciertos factores.

Lo que identifica a un sistema es el propósito del estudio, y una vez que el sistema es identificado, la fuerza de la representación de las diversas alternativas de modelación puede ser usada para identificar el modelo entre los modelos candidatos.

Los modelos son necesarios para en análisis de los sistemas. El estudio de los sistemas puede tener como objetivo comprender el comportamiento de los sistemas existentes o de los sistemas hipotéticos futuros.

Identificación basada en el propósito de estudio



### **Abstracción basada en la eficiencia de la representación**

En general los estudios requieren experimentación y manipulación que son obviamente imposibles de implementar en los sistemas hipotéticos inexistentes. También, en el caso de los sistemas existentes, esta experimentación y manipulación puede resultar muy costosa de implementar sobre el sistema mismo, debido a que puede involucrar actividades que consumen tiempo y recursos. Estos pueden perturbar la operación actual del sistema, o en algunas ocasiones puede resultar en la destrucción del sistema.

Ejemplos:

Remodelar una sala.

EL mejor tiempo de un semáforo

Capacitación, entrenamiento y evaluación de la tripulación de vuelo.

EL diseño de una presa.

Los ejemplos anteriores sugieren que debe existir una mejor forma de realizar el análisis y diseño de los sistemas que experimentando con el sistema mismo.

Hasta el momento se ha encontrado que los modelos sirven para situaciones más atractivas.

**UN MODELO ES UNA REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA, QUE PUEDE SER EXPERIMENTADO Y MANIPULADO PARA CON PROPÓSITO PRINCIPAL DE ESTUDIAR EL SISTEMA.**

En esencia, los modelos pueden ser usados para tres cosas:

- 1.- Estudiar los sistemas existentes sin perturbar sus operaciones.
- 2.- Estudiar los sistemas existentes sin destruirlos.
- 3.- Estudiar sistemas futuros no existentes.

Clasificación de los modelos

Los modelos pueden variar desde ser maquetas físicas aparentemente exactas de un sistema hasta ser una representación matemática abstracta.

Los modelos de los sistemas pueden ser clasificados como:

Físicos  
Gráficos, o  
Simbólicos

**Modelos Físicos:** También llamados Icónicos, pueden ser de la misma escala del sistema mismo. El modelo de la cabina de pilotaje de un avión usado para el entrenamiento de pilotos. Una planta operacional piloto para estudiar la manufactura de una nueva línea de un producto previa a la producción a gran escala.

Los modelos pueden ser de menor escala que el sistema que representan:

Las maquetas de estructuras usadas por los arquitectos y maquetas de plantas químicas.

Los modelos a escala de sistemas tridimensionales pueden ser bidimensionales como plantillas usadas en la distribución de planta o en la elaboración de los diagramas de flujo.

**Modelos Gráficos:** Estos modelos pueden ser representaciones del sistema en dos o tres dimensiones.

Estos pueden ser estáticos, tales como, dibujos sobre papel, o dinámicos, como las películas o gráficas por computadora. Las representaciones gráficas generalmente facilitan las comunicaciones y mejoran el comportamiento de los modelos abstractos. (Un dibujo vale más que mil palabras.). Por lo esto, muchos modelos simbólicos son soportados por representaciones gráficas e interfaces.

**Modelos simbólicos:** Son representaciones abstractas de los sistemas y como tales no se parecen a los sistemas que representan. En muchas aplicaciones estos modelos son medios más efectivos de representación del sistema debido a la facilidad de su construcción y manipulación. Por ejemplo; una descripción verbal de un sistema es un modelo simbólico que puede expresado en cualquier idioma (inglés, Francés, Español, etc.). Un modelo verbal en ciertas aplicaciones es suficiente y más fácil de construir que un modelo físico del sistema.

Los modelos verbales son comunes para ciertas aplicaciones, pero son molestos e ineficientes para usarse cuando la estructura del sistema y la relación dentro del se vuelve compleja y abrumadora. Abstracciones mayores pueden requerir que se exprese mejor la relación dentro del sistema en estudio.

Representaciones abstractas y organizadas de los hechos y las reglas dentro del sistema son de la forma procedimientos estructurados en idiomas semi-naturales, relaciones matemáticas y/o programas de computadoras que son formas comúnmente usadas por los modelos simbólicos. (Expresiones que usan parámetros, variables, relaciones, etc.)

Experimentación de Modelos

Recordemos que el propósito de construir un modelo no es únicamente representarlo, si no también experimentar con el modelo las diferentes configuraciones y valores de los parámetros que conduzcan a conclusiones útiles con relación al desempeño del sistema bajo estudio. En este nivel el modelo debería ser evaluado o resuelto para revelar el comportamiento del sistema.

En el caso de los modelos Gráfico y Físicos, estas soluciones pueden ser observadas y medidas. En el caso de los sistemas Simbólicos, las soluciones serán ocultas en un modelo de estructura abstracta. Por ejemplo, en una representación gráfica de la demanda pronosticada para una compañía, las crestas de la demanda y sus tiempos de ocurrencia pueden ser fácilmente observadas en la gráfica, pero cuando la misma relación de la demanda y el tiempo es representada matemáticamente, el ver la función encontrada no revela mucha información sobre los puntos máximos de la función. En el último de los casos el modelo deberá ser resuelto para obtener la información deseada.

Los métodos de solución para los modelos simbólicos son analíticos o experimentales. El método analítico se aplica generalmente a modelos matemáticos como a otras formas de modelos simbólicos. Los métodos analíticos requieren un razonamiento deductivo de las teorías matemáticas que se aplican al problema en cuestión. Este método generalmente resulta en soluciones precisas y rápidas. Las soluciones analíticas son generales, pero los métodos experimentales son específicos y se aplican únicamente a un dado problema.

El método experimental para la solución de problemas en general usa enfoques simplificados y a veces enfoques de sentido común, en lugar de teorías matemáticas sofisticadas. El intercambio de esta simplicidad y facilidad de uso, generalmente (no siempre) requiere tiempos de cálculo grande y/o soluciones imprecisas. Sin embargo, como la mayoría de los problemas del mundo real son complejos, los métodos experimentales frecuentemente son las únicas. Un ejemplo de Métodos experimentales son las técnicas de prueba y error (Newton-Rapshon, Bisección, Gauss-Seiddel, técnicas de búsqueda, etc.) otro ejemplo es el uso de la técnica de Monte Carlo que se basa en la generación de muestras aleatorias y que se refiere a problemas estáticos.

Siendo racionales, los métodos analíticos son más precisos que los métodos experimentales. Como regla general, cuando se trate con un problema, primero se deberá explorar la posibilidad de usar métodos analíticos. Si en el esfuerzo de encontrar una solución analítica esta falla (o una razonable aproximación del problema por uno que conduzca a una solución analítica), entonces un método experimental deberá ser considerado

### Ejercicios

1. Para cada uno de los siguientes sistemas identifique dos posibles propósitos de estudios, y para cada propósito identifique influencias externas y sus componentes principales que deberían ser incluidos en las fronteras del sistema: a) Un restaurante; b) Un cruce peatonal; c) Una computadora; d) Un café Internet; e) Un lavado de autos; f) Un centro de computo
2. De un ejemplo de una realidad particular que puede ser vista como un sistema estático por un analista y como uno dinámico por otro. Identifique los propósitos de estudio posibles para cada analista.
3. De un ejemplo de una realidad única que puede ser vista como un sistema discreto por un analista y como uno continuo por otro. Identifique los propósitos de estudio posibles para cada analista.
4. Para cada uno de los siguientes estudios indique como y porque usted clasificaría los correspondientes sistemas como continuo, discreto, o combinado: a) Un estudio de la población de conejos en un laboratorio; b) Un estudio de la población de una ciudad; c) El análisis del desempeño de una máquina forradora de alambre; d) El pronostico de un sistema ecológico; e) El diseño de un área de servicio de una estación de gasolina; f) El control de inventario de una agencia de autos; g) El control de inventario de una gasolinera.
5. Analice el sistema de un CIBER-CAFÉ que ofrece los servicios de Internet, correo electrónico, impresión de documentos y gráficas, cafetería y capacitación en el manejo del Internet. Elabore un esquema ilustrativo de este sistema que contenga a los subsistemas, sus interrelaciones el sistema del que forma parte y en la realización de cierto estudio indique sus entidades, actividades, atributos, eventos recursos y cuales serían los parámetros y cuales las variables. Además indique que información podría obtener como resultado de experimentar sobre este modelo para la mejora del sistema.

6. Analice el sistema de un Centro de FOTOCOPIADO que ofrece los servicios de Fotocopiado, Engargolado, Enmicado y venta de artículos para oficina. Elabore un esquema ilustrativo de este sistema que contenga a los subsistemas, sus interrelaciones el sistema del que forma parte y en la realización de cierto estudio indique sus entidades, actividades, atributos, eventos recursos y cuales serían los parámetros y cuales las variables. Además indique que información podría obtener como resultado de experimentar sobre este modelo para la mejora del sistema
7. Analice el sistema de un Centro de Cómputo que ofrece los servicios de Reservado de equipo, uso de equipo, y equipo usado para uso de: paquetería, programación, consultas en Internet, impresión y consulta y envíos de e-mails. Elabore un esquema ilustrativo de este sistema que contenga a los subsistemas, sus interrelaciones el sistema del que forma parte y en la realización de cierto estudio indique sus entidades, actividades, atributos, eventos recursos y cuales serían los parámetros y cuales las variables. Además indique que información podría obtener como resultado de experimentar sobre este modelo para la mejora del sistema
8. Extraer de la siguiente descripción las entidades, atributos, eventos, retrasos, colas y actividades del sistema. A un puerto llegan barcos que atracan junto a un muelle, si está disponible; en caso contrario, esperan hasta que se libere uno. Los descargan varias cuadrillas de trabajo cuyos tamaños dependen del tonelaje de la nave. Una bodega contiene una nueva carga para el barco. Se carga el barco y luego se hace a la mar. Sugerir dos eventos exógenos (distintos a las llegadas) que pueda ser necesario tomar en cuenta.
9. Nombre tres o cuatro de las principales entidades, atributos o actividades que debe de considerar si se le pide simular la operación de a) una estación gasolinera, b) una cafetería, c) una peluquería.
10. Extraer de la siguiente descripción las entidades, atributos, eventos, retrasos, colas y actividades del sistema: Considere un banco con cuatro cajas. Las cajas 3 y 4 atienden solamente cuentas empresariales, en tanto que las cajas 1 y 2 atienden cuentas generales. Los clientes arriban al banco a una razón de uno cada 3 1 minuto. Del total de clientes, el 33% son de tipo empresarial. Los clientes escogen aleatoriamente entre las dos cajas disponibles para cada tipo de cuenta. Se supone que se escoge una caja independientemente de la longitud de su cola de espera. Las cuentas empresariales toman 15 10 minutos en ser atendidas y las cuentas generales toman 6 5 minutos para completarse.

#### Referencias Bibliográficas:

- Azarang, M. R. y García Dunna, E., (1996), *Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos* McGrawHill/Interamericana de México, S.A. de C.V., México.
- Banks, J. y Carson, J.S., (1984), *Discrete event system simulation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J..
- Bratley, P., Fox, B.L., Schrage, L.E. (1983) *A Guide to Simulation*. Springer Verlag
- Concebís B., *Discrete Systems Simulation*, Mc. Graw Hill
- Coss Bu Raúl, (2002), *Simulación Un enfoque práctico*, Limusa
- Davis y Mc kewon, *Modelos Cuantitativos para la Administración*, Mc. Graw-Hill
- Gerez, V. y Grijalva, M., (1980), *El Enfoque de Sistemas*, Ed. Limusa, México
- Gottfried, B.S., (1984), *Elements of Stochastic Process Simulation*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Gordon, G., (1989), *Simulación de Sistemas*, Editorial Diana, México.
- Hillier, F.S. y Lieberman, G.J., (2003), *Introducción a la Investigación de Operaciones*, 5ª. Edición, , McGrawHill/Interamericana de México, S.A. de C.V., México.
- Harrell Ch. Ghosh B., Bowden R., , *Simulation using PROMODEL w/CD-ROM*, promodel.Harrell
- Charles R., Bateman Robert E., Gogg Thomas J. and, . Mott Jack R.A., *System Improvement Using Simulation*, Promodel Corporation., 1996.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P. y Sadowski, D.A., (2002), *Simulation with Arena*, 2a. Edición, McGrawHill, USA.

Law A. y Kelton W. , *Simulation Modeling and Análisis*, Mc. Graw-Hill  
Naylor, Balintfy y Burdick, *Técnicas de Simulación de computadoras*, Limusa.  
Ross, S., (1997), *Simulation*, 2a Edición, Academic Press, USA  
Shdmit y Taylor, *Análisis y Simulación de Sistemas Industriales*, Trillas.  
Taha, H.A., (1991), *Investigación de Operaciones*, 2ª Edición, Alfaomega S.A., México.  
Thierauf, *Investigación de Operaciones* , Limusa.  
Winston, *Investigación de Operaciones*, Gpo. Editorial Iberoamérica.