

Simulación Aplicada a la Logística

Lectura Nr. 1 Introducción

Profesor:

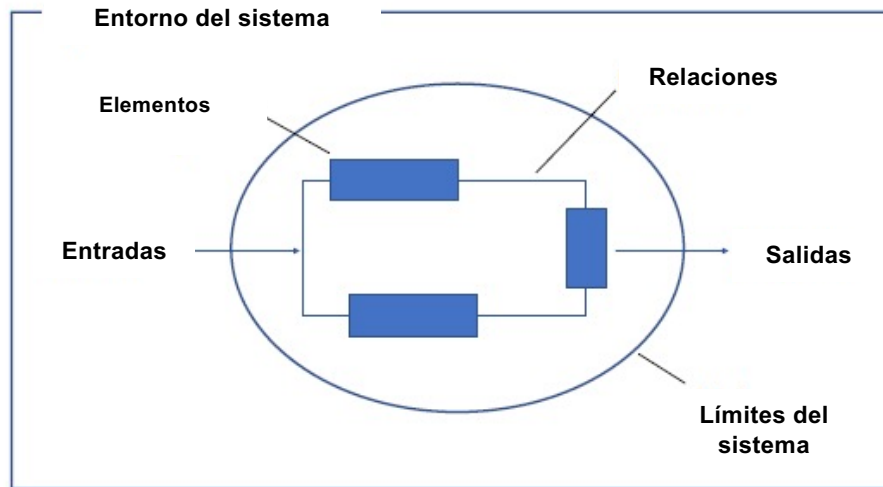
Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ ricardo.caballero@utp.ac.pa

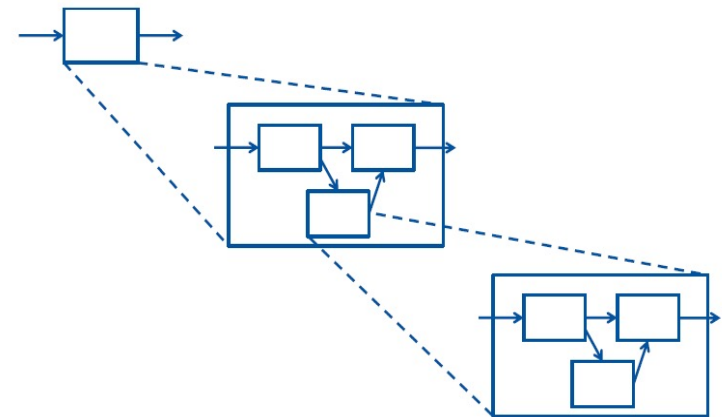


Sistema

- Conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo.
- Los elementos también pueden considerarse como subsistemas compuestos de otros elementos.
- La parte más pequeña de un sistema es el elemento del sistema.
- Los sistemas están definidos por límites.



Representación de un sistema



Descomposición de elementos en subsistemas

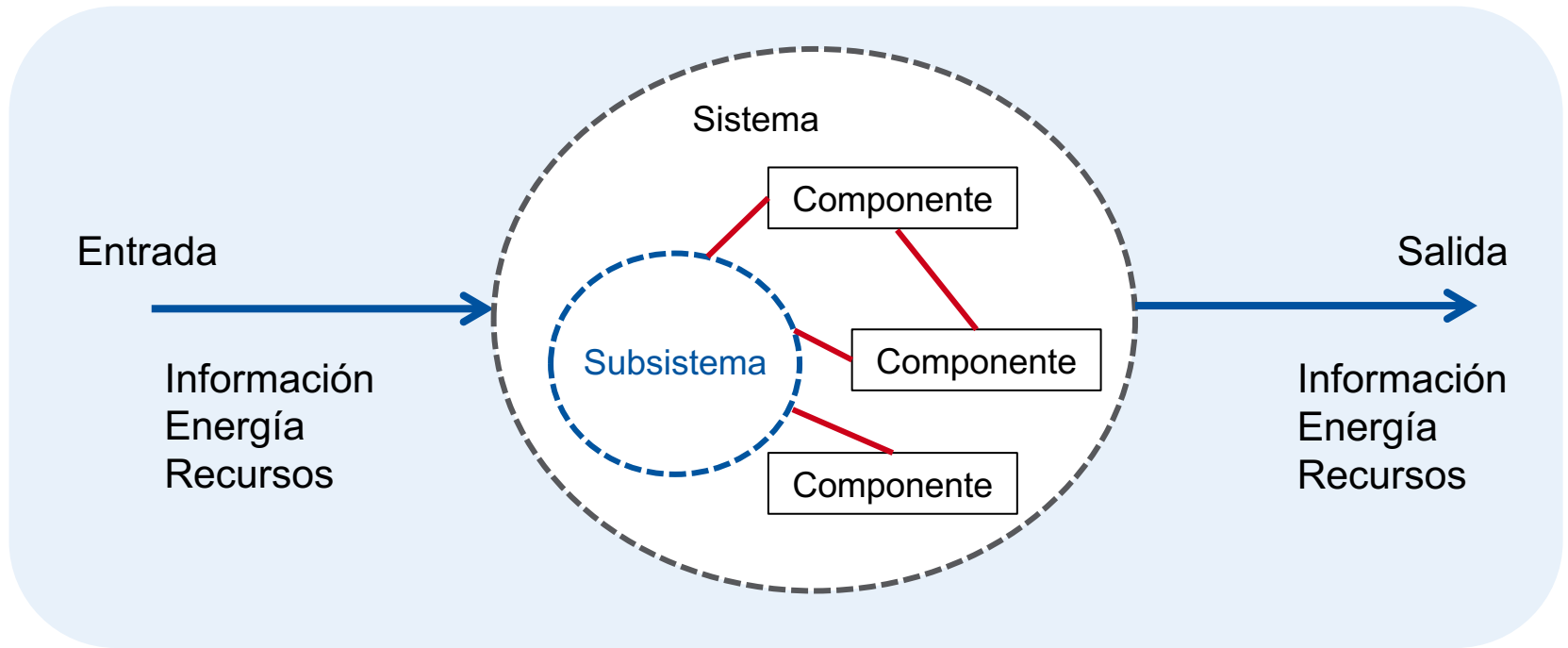
Entorno y límite del sistema

- Los sistemas cruzan sus límites al interactuar interacción con el entorno del sistema con el que intercambian material, energía e información.
- Los límites del sistema generalmente no están claramente definidos.
- Tres criterios posibles en la práctica para definir los límites del sistema son:

Criterio	Ejemplo
Límite del sistema donde las interacciones dentro del sistema son mucho más fuertes que las del entorno.	Cadena de suministro con fabricante, centro de distribución, mayorista, minorista y cliente final
Límite del sistema donde los acoplamientos con el entorno no son funcionalmente relevantes.	Productividad de una máquina NC modular en línea de transferencia
Límite del sistema donde los efectos del entorno en el sistema no están determinados por el sistema en sí ni pueden modificarse mediante retroalimentación.	Subcontratista en una producción just-in-time

Variables del sistema

- Las variables son condiciones cuyos valores se crean y modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones.
- Las variables pueden ser de tipo continuas o discretas.
- Existen variables de entradas que afectan el comportamiento general del sistema.



Otras definiciones relacionadas al concepto de sistema

Entidad: representación de los flujos de entrada y salida en un sistema.

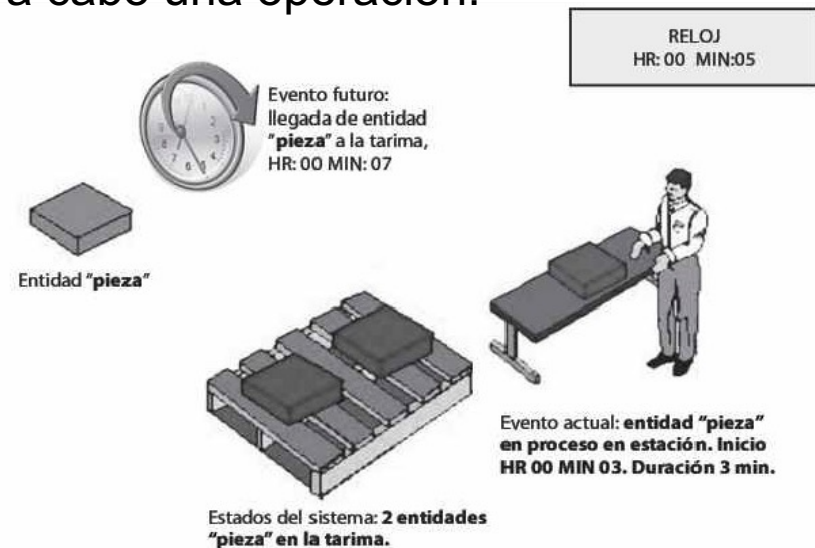
- *Clientes*
- *Piezas*

Atributo: característica de una entidad.

- *Color*
- *Tamaño*
- *Peso*

Recursos: Dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación.

- *Montacargas*
- *Herramientas*
- *Maquinarias*



Los **atributos** de una **entidad** definen su **estado** y los estados de las entidades más importantes definen el **estado del sistema**.

La perspectiva de la cadena de suministro vista como un sistema

- Permite entender qué es una variable, en qué debo basar mi decisión, cuáles son mis limitaciones o restricciones
- Permite entender que se puede controlar y que puede ser complejo.



Dentro del análisis de la cadena de suministro cómo un sistema se pueden encontrar los siguientes desafíos:

- **Métricas**

¿Cómo se medirá este nuevo sistema?

- **Políticas**

¿Quién gana y quién pierde influencia, y cuáles son los efectos?

- **Visibilidad**

¿Dónde se almacenan los datos y quién tiene acceso?

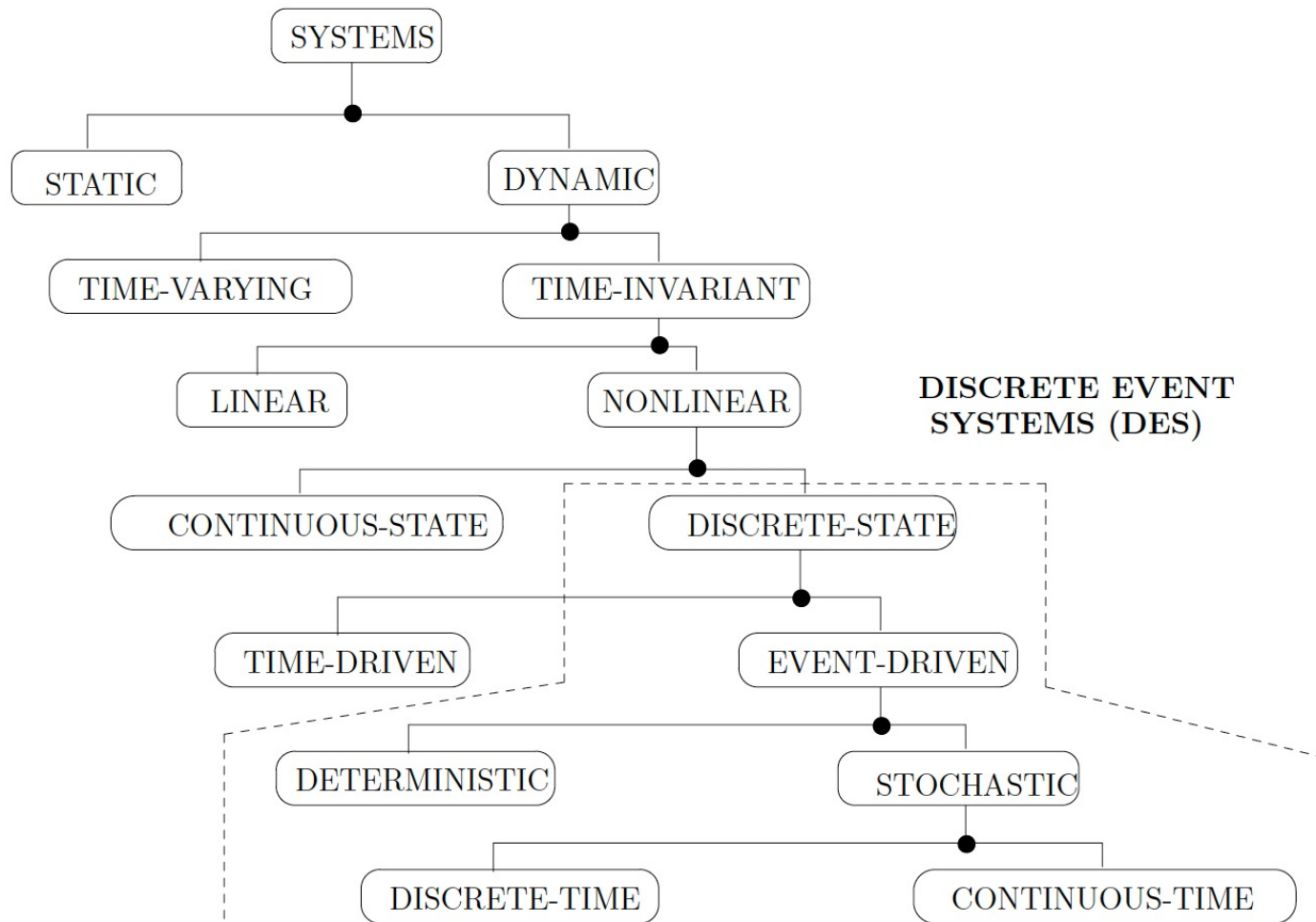
- **Incertidumbre**

Factores como plazos de entrega, demanda de clientes y rendimiento

- **Operaciones globales**

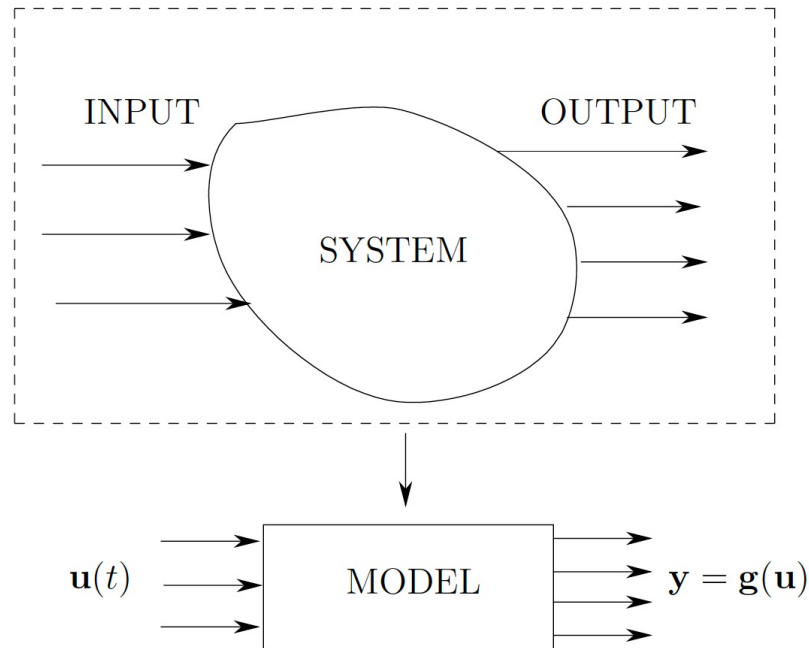
Muchas empresas abastecen y venden en todo el mundo

Clasificación de los sistemas



Modelo

- Un modelo es una representación comprensible y simplificada de la realidad.
- Sirve para comprender mejor las conexiones entre la realidad y el dominio de la complejidad.
- Un modelo puede ser representado mediante ecuaciones matemáticas, mapas, imágenes, etc.



Clasificación de modelos de acuerdo a su perspectiva estratégica y nivel de certidumbre

	Evaluación de estrategia	Generación de estrategia
Certidumbre	Simulación determinística Modelos econométricos Modelos de Entrada – Salida Sistemas de ecuaciones	Programación Lineal Modelos de Redes Programación Lineal Entera y Mixta Programación No Lineal Teoría de Control
Incertidumbre	Simulación Monte-Carlo Modelos econométricos Procesos estocásticos (Cadenas de Markov) Teoría de colas	Teoría de decisiones Modelos de inventario Programación Dinámica Programación estocástica

Los modelos se pueden clasificar en tres según su enfoque:

- **Descriptivo** → *¿Qué ha sucedido?*
- **Predictivo** → *¿Qué podría pasar?*
- **Prescriptivo** → *¿Qué debemos hacer?*

Un modelo válido es aquel que representa de manera aproximada pero representativa las características más importantes del sistema o problema a analizar.

Funciones matemáticas

Es la relación entre un conjunto de entradas y el conjunto de salidas permisibles con la propiedad de que cada entrada esta relacionada exactamente con una salida.

Las funciones pueden ser: lineales, cuadráticas, exponenciales, etc.

$$y = f(X)$$

“f de x” o “y es una función de x”

Dado un valor para x , se puede computar el valor para y

Ejemplo: $f(x) = x^2$

$x = 2$ entonces

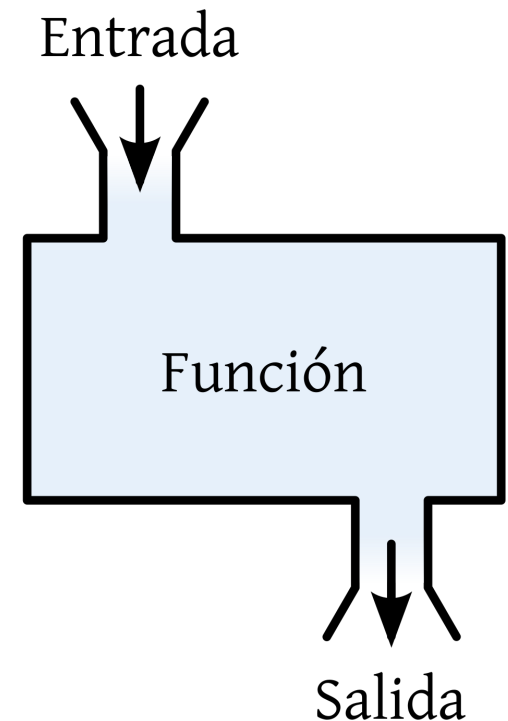
$$y = f(2) = 2^2 = 4$$

$x = 3.4$ entonces

$$y = f(3.4) = 3.4^2 = 11.56$$

$x = -2$ entonces

$$y = f(-2) = -2^2 = 4$$



Funciones matemáticas

Costos de transporte de camiones

$$\text{costo} = f(\text{distancia}) = \$200 + 1.35 \text{ \$/km} * (\text{distancia})$$

Costos de almacenamiento

$$\text{costo} = f(\# \text{ cajas}) = \$2,500 + 2.5 \text{ \$/case} * (\# \text{ cajas})$$

Ecuación de utilidades

$$\text{Utilidades} = f(\text{unidades}) = (r - c) * v - d$$

donde:

r = ingresos(\$/unidad)

c= costo por unidad (\$/unidad)

v = unidades vendidas

d = costo fijo (\$)

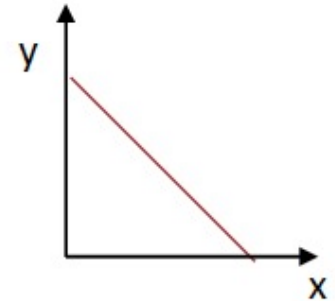
Ejemplo: función para calcular el precio de un producto

Una empresa manufactura el Artículo XYZ y desea determinar que precio colocarle al producto. Se cuenta con la siguiente información, los costos fijos de la empresa representan \$ 500,000 y el costo variable es de \$ 75

$$\text{costos totales} = CT(x) = \$500,000 + 75x$$

El comportamiento de la demanda viene representada con la siguiente función lineal de la demanda en función del precio

$$\text{unidades vendidas} = x(p) = 20,000 - 80p$$



Por consiguiente, la ecuación de ganancias se formula como

$$\text{Ingresos}(I) = \text{unidades vendidas} * \text{precio}$$

$$I = (20,000 - 80p)p = 20,000p - 80p^2$$

$$\text{Costos totales}(CT) = \text{costo fijo} + \text{costo variable} * \text{unidades vendidas}$$

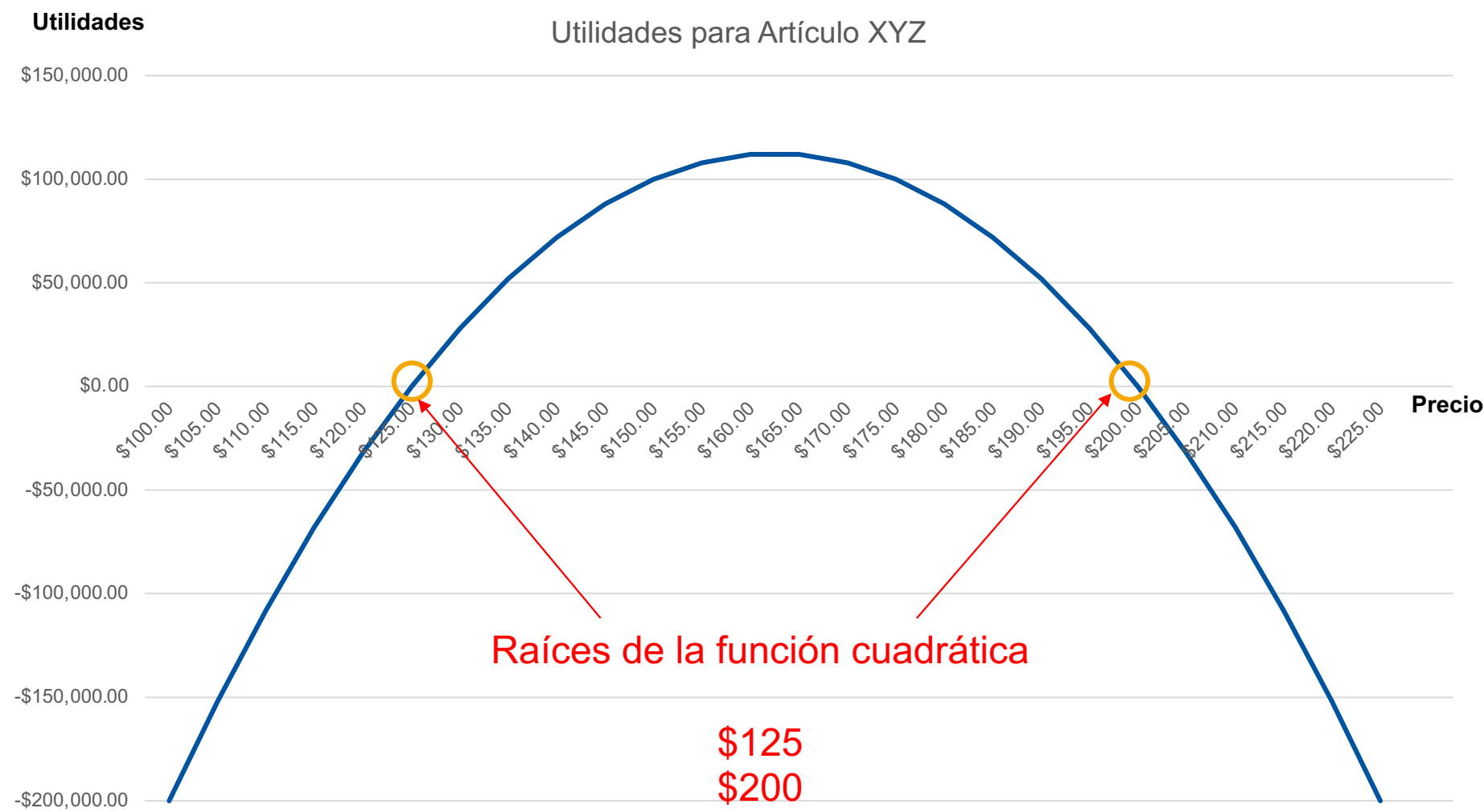
$$CT = 500,000 + 75(20,000 - 80p) = 2,000,000 - 6,000p$$

$$\text{Utilidades}(U) = \text{Ingresos} - \text{Costos Totales}$$

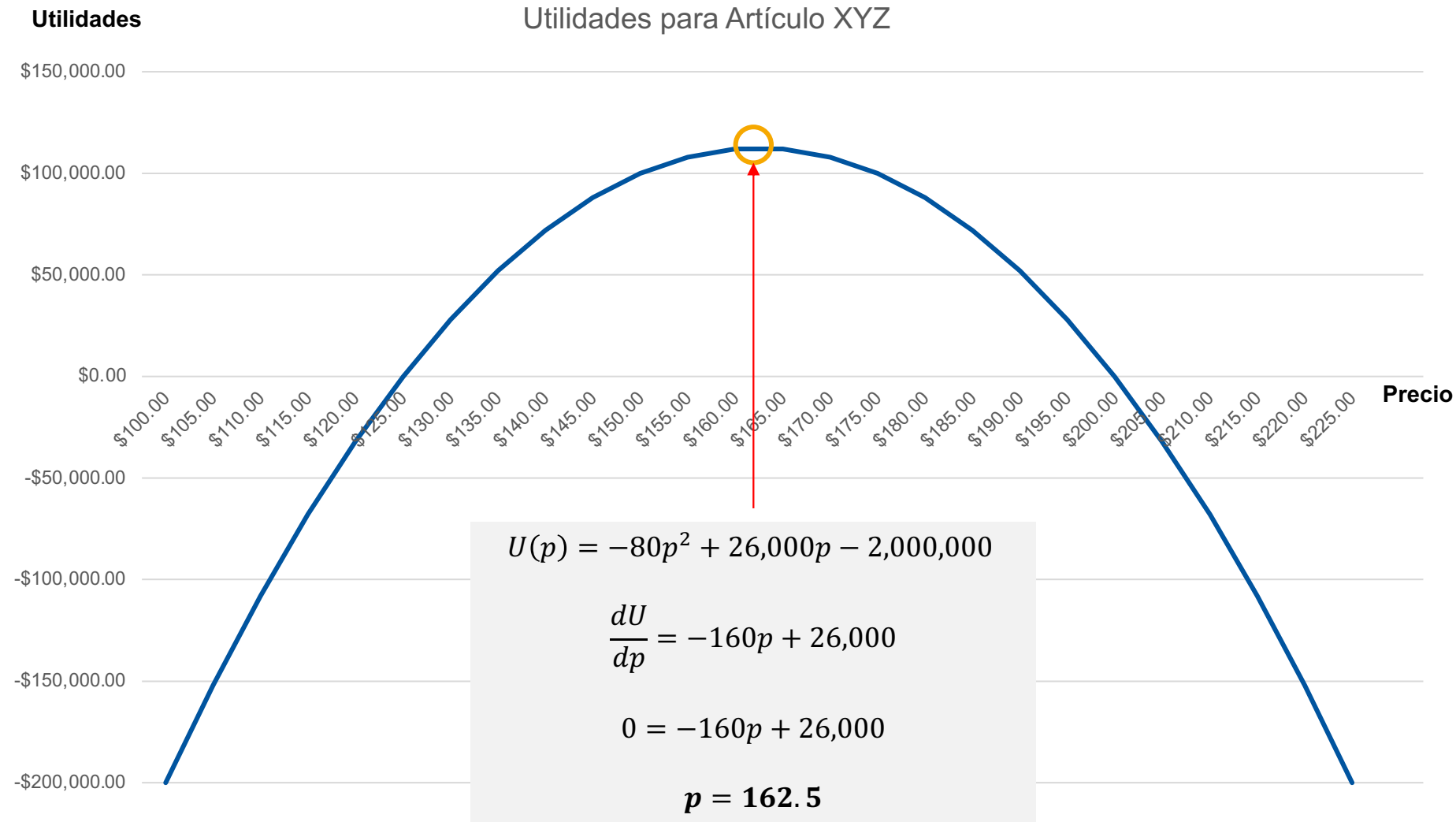
$$U = 20,000p - 80p^2 - (2,000,000 - 6,000p)$$

$$U(p) = -80p^2 + 26,000p - 2,000,000$$

Ejemplo: función para calcular el precio

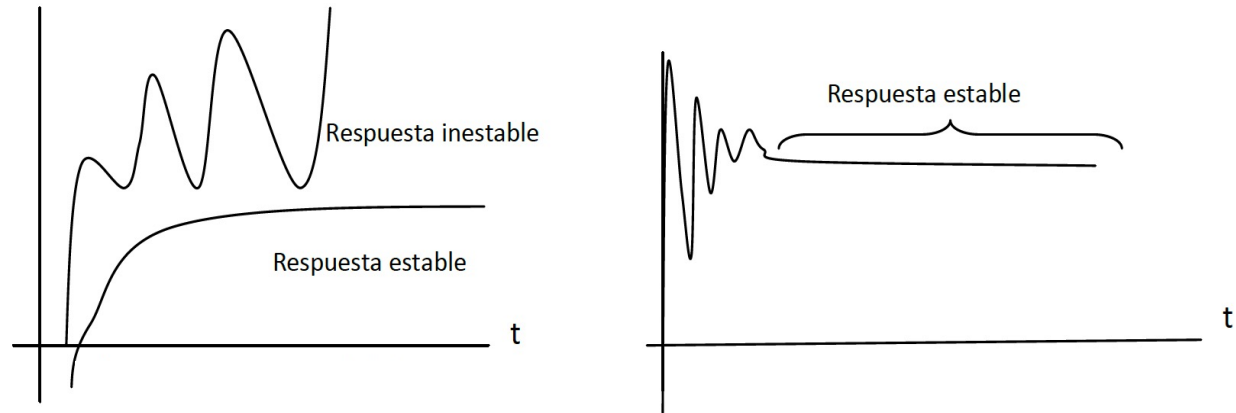


Ejemplo: a qué precio debo fijar Artículo XYZ para obtener una máxima utilidad?



El concepto de “Estado”

- Condición que guarda el sistema bajo estudio en un momento de tiempo determinado.
- El espacio de estado es el conjunto de todos los valores posibles que el estado puede tomar.



Estado transitorio

- Se presenta al principio de la simulación
- Hay mucha variación entre los valores promedio de las variables de decisión del modelo
- Cuando una variable o variables de proceso se han cambiado y el sistema aún no ha alcanzado un estado estable
- Formular decisiones es complicado

Estado estable

- Los valores de las variables de decisión permanecen muy estables
- Presentan variaciones poco significativas
- Las variables de estado que definen el comportamiento del sistema son invariables en el tiempo
- Respuesta que permanece constante
- Se pueden tomar decisiones confiables

Simulación

Proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experimentos con este modelo con el propósito de comprender el comportamiento del sistema y sus casos subyacentes o de evaluar diseños serios de un sistema artificial o estrategias para la operación del sistema

“...se refiere al uso de una computadora para llevar a cabo experimentos en un modelo de un sistema real.” Chase

“La idea básica de la simulación es la construcción de un dispositivo experimental, o simulador, que “actuará como” (simulará) el sistema de interés en ciertos aspectos importantes, de una manera rápida y redituable.” Eppen

“El acto de reproducir el comportamiento de un sistema, utilizando un modelo que describa los procesos de dicho sistema.” Krajewski

“Método de aprender sobre un sistema real experimentando con un modelo que lo representa.” Anderson



La idea de la simulación es imitar una situación del mundo real con un modelo matemático que no afecte las operaciones

La simulación puede utilizarse para los siguientes propósitos

- Permite el estudio y la experimentación del comportamiento de un sistema complejo.
- Se pueden simular cambios informativos, organizacionales y ambientales, y se puede observar el efecto de estas alteraciones en el comportamiento del modelo.
- Al cambiar las entradas de simulación y observar las salidas resultantes, se pueden obtener valiosos conocimientos sobre qué variables son más importantes y cómo interactúan las variables.
- Se puede utilizar para verificar soluciones analíticas.
- Al simular diferentes capacidades para una máquina, se pueden determinar los requisitos
- Los sistemas modernos son tan complejos que las interacciones solo pueden tratarse mediante simulación.

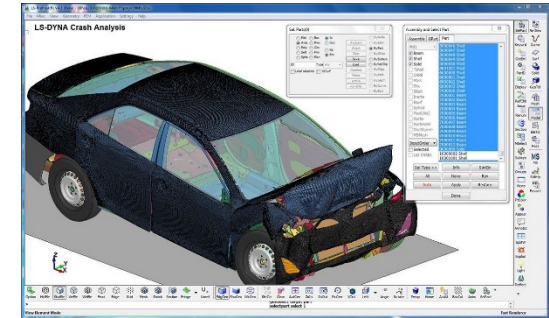
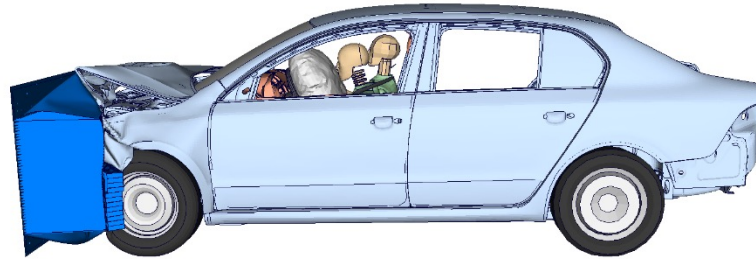
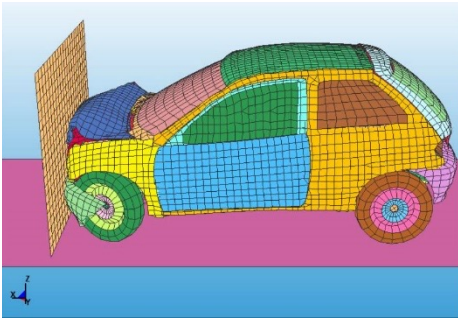
Simulación: ventajas y desventajas

- Se pueden comparar diferentes escenarios en forma paralela.
- Los softwares hacen que los modelos sean fáciles de desarrollar
- Sirve para analizar situaciones grandes y complejas
- Permite formular preguntas tipo ¿Qué pasaría si...?
- Las simulaciones no interfieren con el sistema del mundo real (se pueden explorar nuevas políticas, procedimientos operativos, etc.)
- Un nuevo diseño puede ser probado sin comprometer recursos.
- Permite estudiar el efecto interactivo de componentes o variables individuales para determinar cuáles son importantes

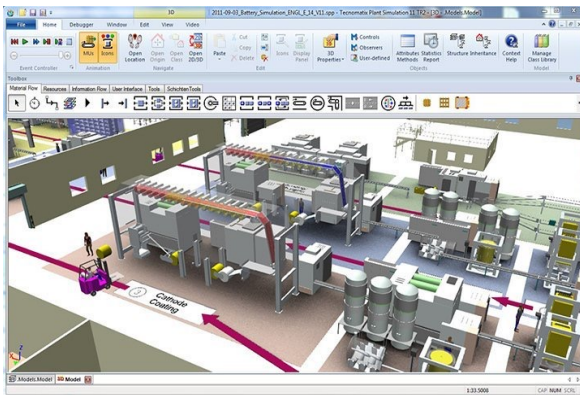
- Altos costos
- Desarrollar un modelo es un proceso largo y complicado (toman mucho tiempo)
- No genera soluciones óptimas a los problemas (enfoque de ensayo y error)
- Cada modelo es único
- Se requiere entrenamiento especial y experiencia.
- Un modelo siempre se basa en el conocimiento individual del modelador.
- Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar

Algunos ejemplos de simulaciones

Simulación de choque automovilístico



Simulación de instalaciones de producción



Simulador de vuelo



Una investigación sobre el sistema real llevaría demasiado tiempo, sería demasiado costosa, éticamente inaceptable o demasiado peligrosa

Simulación vs Optimización

En un **modelo de optimización**, los valores de las variables de decisión son resultados.

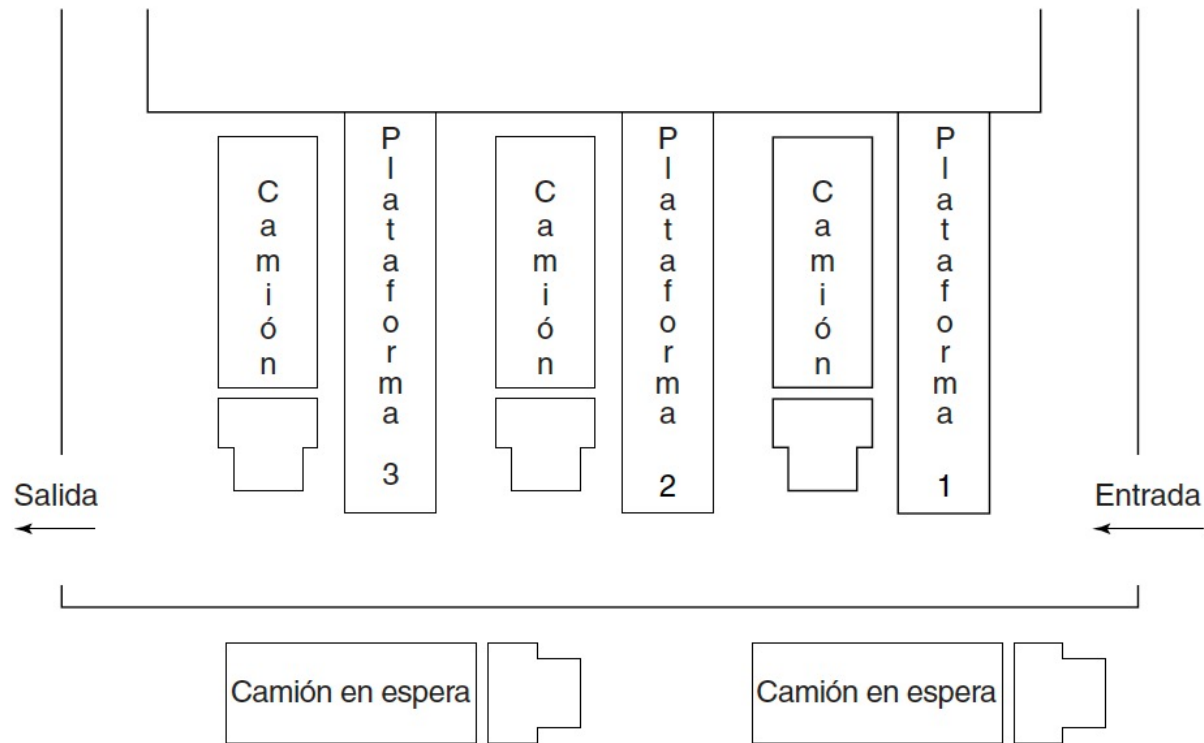
Esto es, el modelo proporciona un conjunto de valores para las variables de decisión que maximiza (o minimiza) el valor de la función objetivo.

En un **modelo de simulación**, los valores de las variables de decisión son entradas.

El modelo evalúa la función objetivo en relación con un conjunto particular de valores.

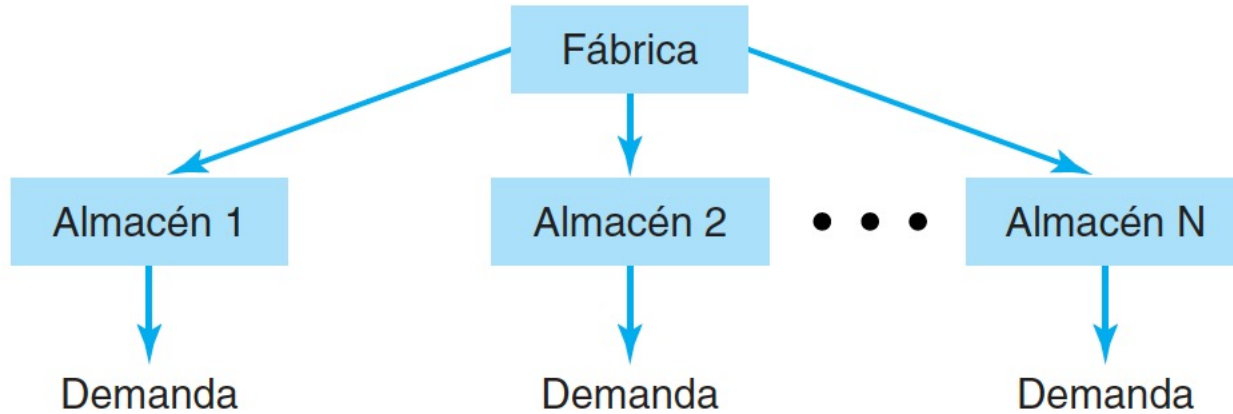


Simulación: diseño de instalaciones para descarga



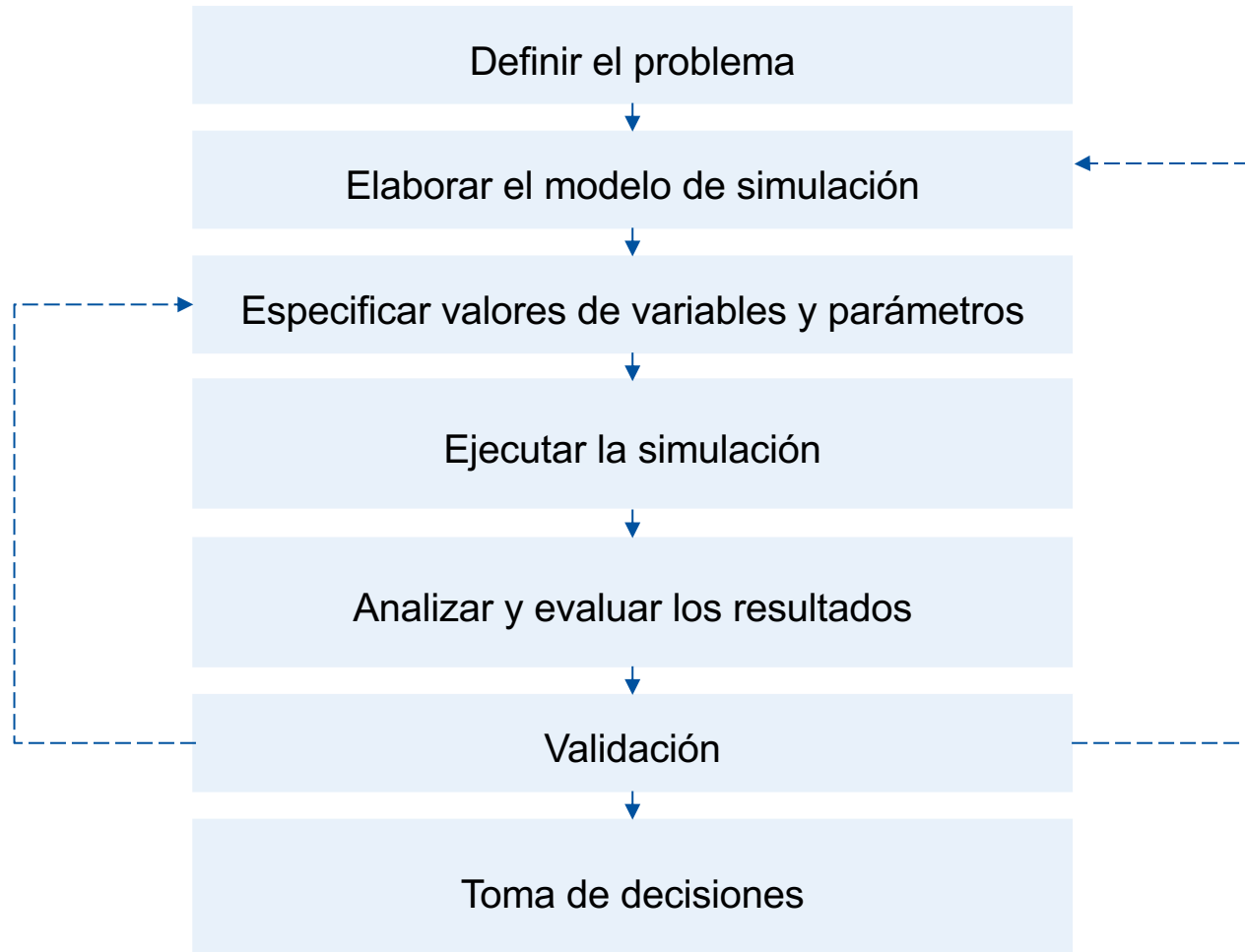
- ¿Cuántas plataformas se deben construir?
- ¿Qué tipo y cantidad de equipo para manejo del material se requiere?
- ¿Cuántos trabajadores se requieren y en qué periodos?

Simulación: determinación de políticas de control de inventario



- ¿Cuándo debe un almacén emitir una reorden a la fábrica, y por cuánto?
- ¿Qué existencias debe mantener la fábrica para satisfacer las órdenes de los almacenes?

Proceso de simulación



Las técnicas de simulación pueden resumirse en:

Simulación Monte Carlo

- Simulaciones que experimentan con elementos probabilísticos de un sistema, generando números aleatorios para crear valores para esos elementos.
- Basada en el muestreo sistemático de variables aleatorias.

Simulación por eventos discretos

- Se define el modelo cuyo comportamiento varía en instantes del tiempo dados.
- Los momentos en los que se producen los cambios son los que se identifican como los eventos del sistema o simulación.

Simulación continua

- Los estados del sistema cambian continuamente su valor. Estas simulaciones se modelan generalmente con ecuaciones diferenciales.
- Los cambios en el estado del sistema ocurren continuamente en el tiempo
- Ejemplo: simulación de vuelo

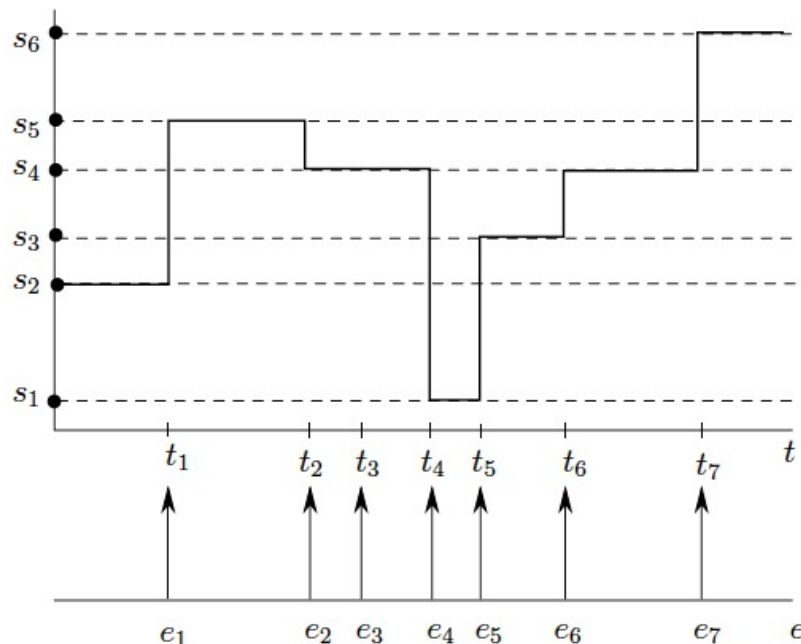
Dinámica de sistemas

- Metodología para analizar y modelar el comportamiento de sistemas complejos a través del tiempo.
- Se basa en la identificación de bucles de realimentación entre elementos, flujos y retrasos de información y materiales dentro del sistema.

Sistemas de eventos discretos (DES)

Son sistemas cuyo espacio de estado es discreto y cuyo estado solo puede cambiar como resultado de eventos instantáneos que ocurren de forma asíncrona a lo largo del tiempo. Sus propiedades son:

- El espacio de estado es un conjunto discreto
- El mecanismo de transición de estado es impulsado por eventos



$$X = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$$

Un **evento** debe ser pensado como algo que ocurre instantáneamente y provoca transiciones desde un valor del estado a otro.

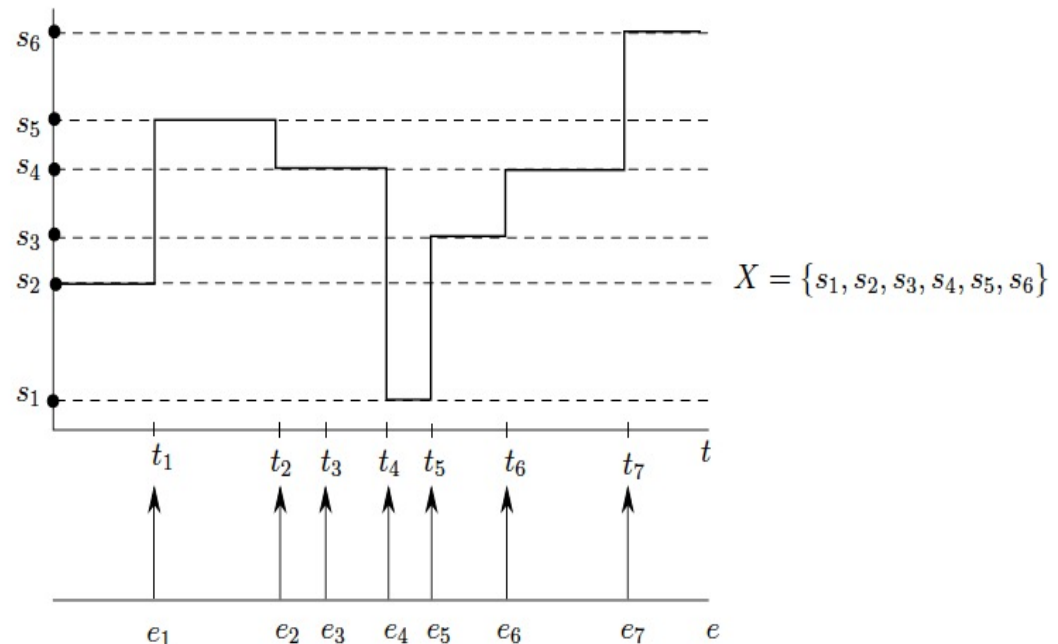
Ejemplos

- Estado de una máquina: {ON,OFF} o {OCUPADA, OCIOSA, FINALIZADO}.
- Un computador ejecutando un programa: {ESPERANDO ENTRADA,EJECUTANDO, FINALIZADO}.
- Cualquier tipo de inventario: {0,1,2, . . . }.

Sistemas de eventos discretos (DES)

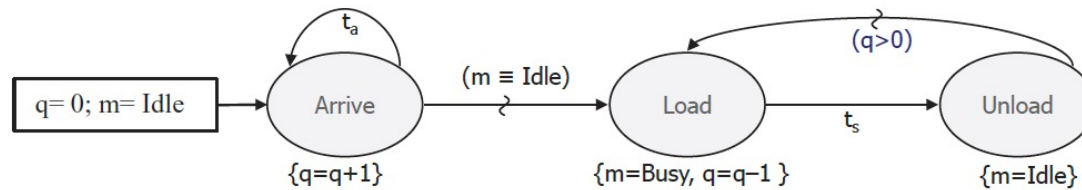
Un sistema de eventos discretos (DES) es un sistema con estados discretos s_i que son elementos de un conjunto de estados finitos X ($s_i \in X, i = 1 \dots |X|$) y eventos discretos e_j que son elementos de un conjunto de eventos finitos E ($e_j \in E, j = 1 \dots |E|$), que es controlado por eventos y, por lo tanto, los cambios de estado son causados por la ocurrencia de eventos asíncronos a lo largo del tiempo a través de transiciones instantáneas.

- Para el DES, el espacio de estado es un conjunto discreto $X = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$.
- La ruta de muestra solo puede saltar de un estado a otro cuando ocurre un evento.
- Un evento puede tener lugar, pero no causar una transición de estado, como en el caso de e_3 .
- En un DES, $x(t)$ es una función constante por partes, ya que el estado salta de un valor discreto a otro cada vez que ocurre un evento.

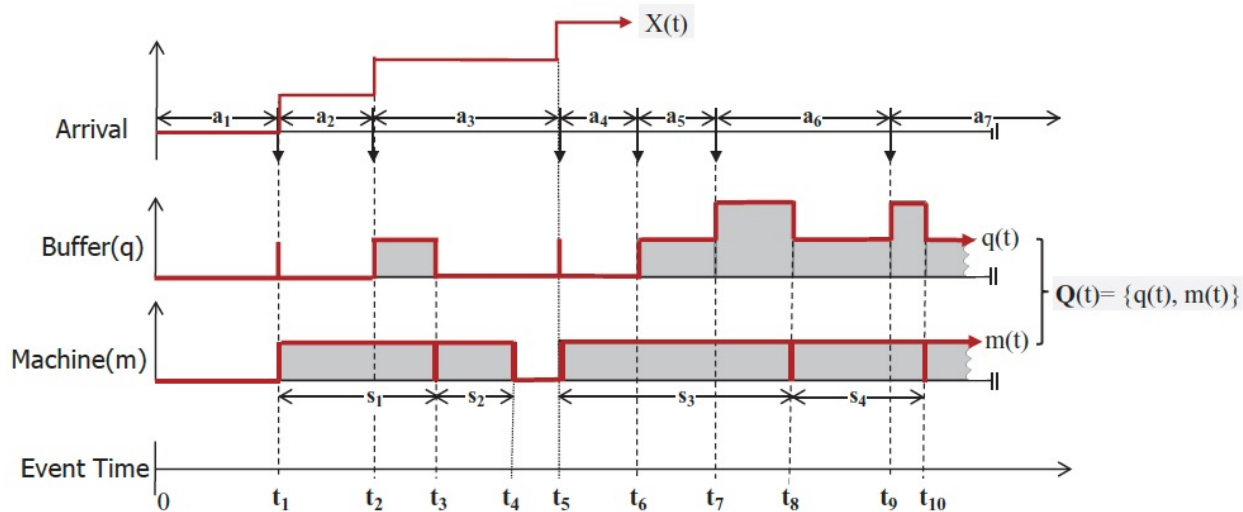


Mapa de ocurrencia de eventos de simulación en la escala de tiempo

Trayectoria de un modelo de simulación



Gráfica de eventos describiendo la dinámica de sistema de un solo servidor



Trayectoria de un modelo de simulación para un sistema de un solo servidor

Ejemplo: Sistema de una bodega

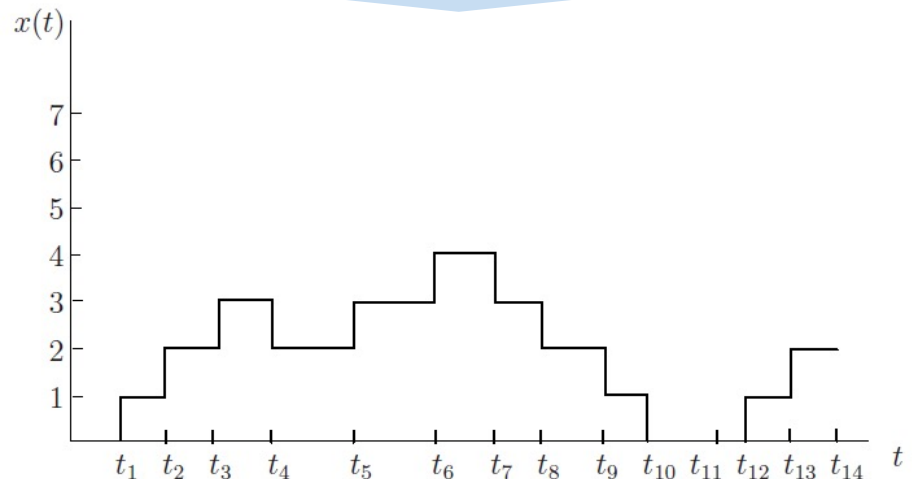
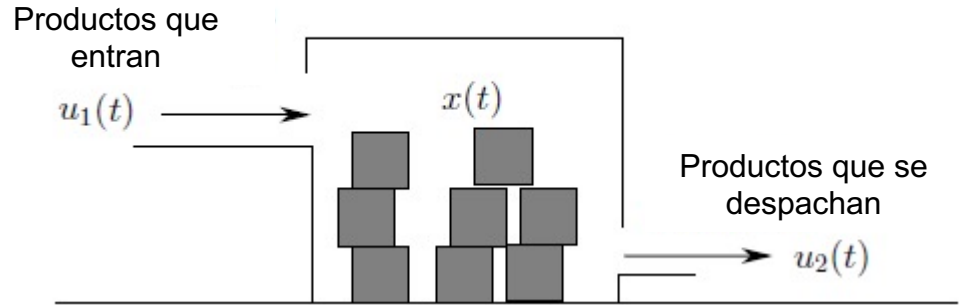
Se desea modelar el inventario de esta bodega, esto es, cuantos productos están presentes en un tiempo determinado.

Nos interesa el nivel de inventario en este almacén, es decir, cuántos productos están presentes en un momento dado

- Cuando ocurre una llegada de producto a la bodega $u_1(t)$, $x(t)$ aumenta en 1.
- Cuando ocurre una salida de un producto de la bodega, $u_2(t)$, $x(t)$ disminuye en 1.

Usamos la notación t^+ para definir un instante de tiempo “justo después” de t . Con estas observaciones y notaciones podemos escribir la ecuación de estado como

$$x(t^+) = \begin{cases} x(t) + 1 & \text{si } u_1(t) = 1 \quad u_2(t) = 0 \\ x(t) - 1 & \text{si } u_1(t) = 0 \quad u_2(t) = 1, x(t) > 0 \\ x(t) & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

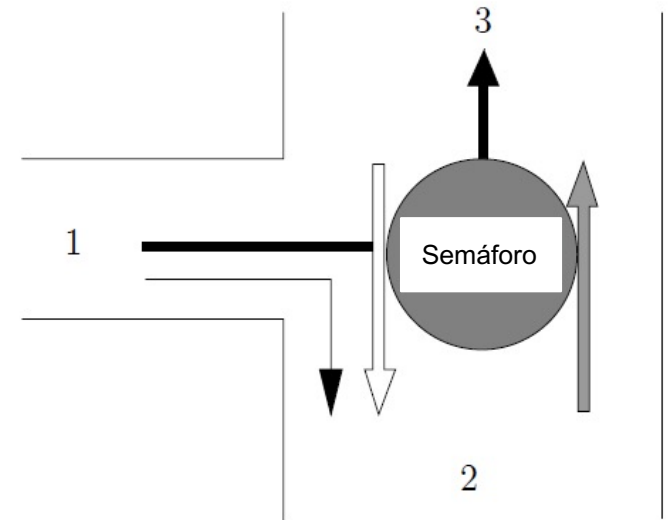


Ejemplo: Sistema de tráfico

En un entorno de tráfico, los vehículos utilizan servidores como semáforos, cabinas de peaje y el espacio físico en las carreteras.

Hay cuatro tipos de vehículos:

- (1,2) vehículos que vienen del punto 1 y giran a la derecha hacia 2,
- (1,3) vehículos procedentes de 1 y girando a la izquierda hacia 3,
- (2,3) vehículos que van directamente de 2 a 3, y
- (3,2) vehículos que van directamente de 3 a 2.



Una intersección en T controlada por un semáforo

El semáforo se configura de modo que:

- se vuelva rojo para los vehículos (1,2) y (1,3) (verde para los vehículos (2,3) y (3,2)), o
- se vuelva verde para (1,2)) y (1,3) vehículos (rojo para (2,3) y (3,2) vehículos).

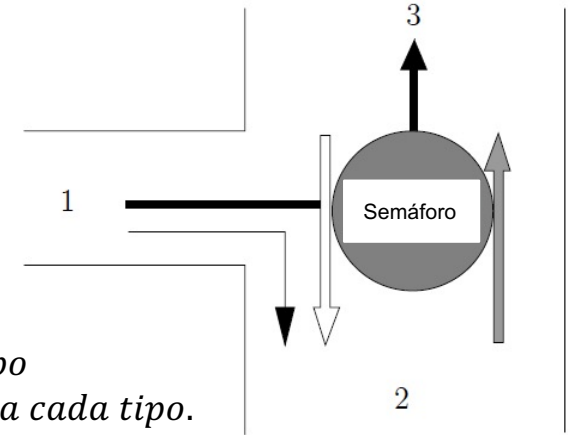
Ejemplo: Sistema de tráfico

En este caso el conjunto del evento va a ser definido por:

$$E = \{a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{32}, d_{12}, d_{13}, d_{23}, d_{32}, g, r\}$$

Donde:

- $a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{32}$ representa la llegada de los vehículos para los cuatro tipo
 $d_{12}, d_{13}, d_{23}, d_{32}$ es una salida del vehículo al despejar la intersección para cada tipo.
 g indica que el semáforo está en verde para los vehículos (1,2) y (1,3)
 r indica que el semáforo esta en rojo para los vehículos (1,2) y (1,3)



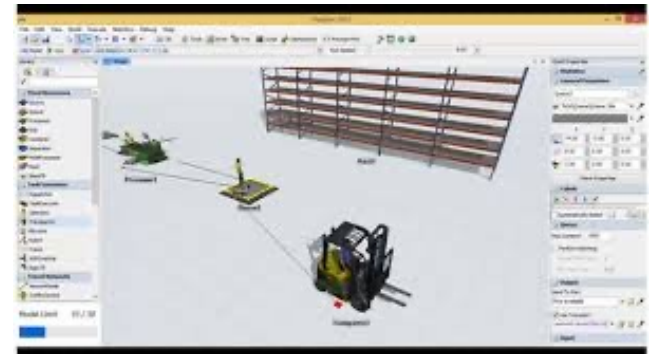
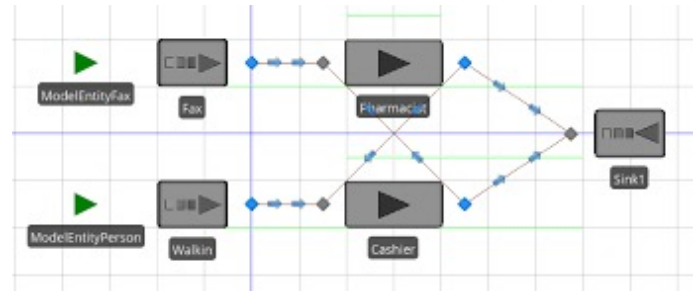
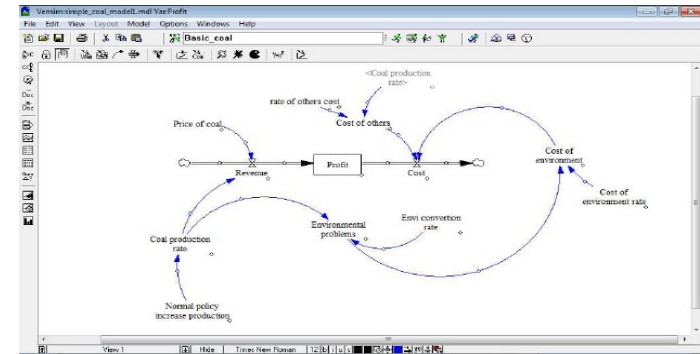
Un espacio de estado posible se define por las longitudes de cola formadas por los cuatro tipos de vehículos y el estado del semáforo en sí, es decir

$$X = \{(x_{12}, x_{13}, x_{23}, x_{32}, y) : x_{12}, x_{13}, x_{23}, x_{32} \geq 0, y \in \{G, R\}\}$$

Donde

- $x_{12}, x_{13}, x_{23}, x_{32}$ son las cuatro longitudes de la cola,
 y es el estado del semáforo (G significa verde para los vehículos (1,2) y (1,3),
 R significa rojo para los vehículos (1,2) y (1,3)).

Algunos simuladores más utilizados



Bibliografía

- Cassandras & Lafortune. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer
- García et al. (2013). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*. Editorial Pearson.
- Render, B. (2016). *Métodos cuantitativos para los Negocios*. Editorial Pearson.
- Taha, H. (2011). *Investigación de Operaciones*. Editorial Pearson.
- Schroeder et al. (2011). *Administración de Operaciones*. McGraw-Hill
- Render, B. & Heizer, J. (2014). *Principios de Administración de Operaciones*. Pearson
- Chase, R. & Jacobs, F. (2014). *Administración de Operaciones, Producción y Cadena de Suministro*. McGraw – Hill
- Hillier, F. & Lieberman, G. (2015). *Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill
- Anderson, D. & Sweeny, D. (2019). *Métodos Cuantitativos para los Negocios*. Cengage
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la Producción y las Operaciones*. McGraw-Hill
- Rees, M. (2015). *Business Risk and Simulation Modeling in Practice*. John Wiley & Sons Ltd
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill
- Winston, W. (2017) *Microsoft Excel 2016 – Data Analysis and Business Modeling*. Microsoft press
- Slack, N., et al. (2016) . *Operations Management*. Pearson
- Stevenson, W. (2015). *Operations Management*. McGraw-Hill
- Alvarez, H. (2011). *Introducción a la Simulación*. Universidad Tecnológica de Panamá
- Schaffernicht, M. (2006). *Dinámica de Sistemas – Tomo 1: Fundamentos*.
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de Sistemas*. Isdefe



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo
Facultad de Ingeniería Industrial
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: ricardo.caballero@utp.ac.pa

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>