

# Técnicas y Herramientas Modernas I - Módulo de Simulación de Sistemas de Manufactura

Juan Manuel Pegorin<sup>a,1,\*</sup>, Analía Quiroga<sup>a</sup>, Nicolas Mondaca<sup>a,1</sup>, Franco Carricart<sup>a,1</sup>

<sup>a</sup>Centro universitario M5500 Mendoza

---

## Abstract

Este trabajo se realizó con el objetivo de ahondar en los conocimientos de los sistemas de manufactura. Para esto se realizó un resumen sobre los conocimientos básicos necesarios para aplicarlos durante el siguiente módulo.

*Keywords:* sistemas, modelos matemáticos, simulación, sistema de manufactura

---

## 1. Conceptos fundamentales y términos clave

Es necesario, antes de hablar de los temas siguientes, tener claro ahora que palabras que se escriben igual, incluso en el mismo idioma, no tienen el mismo significado en cada campo de conocimiento. Por este motivo es necesario diferenciar términos claves que utilizaremos para el tanto para el modelado como la simulación.

**Sistema:** nos referimos a un sistema cuando hablamos de cualquier fuente potencial de datos, esto puede ser desde una fábrica con máquinas, personal y almacén hasta un parque temático con atracciones, tiendas, restaurantes, trabajadores, clientes y aparcamientos.

**Experimento:** es el proceso de extraer datos de un sistema sobre el cual se ha ejercido una acción externa.

**Modelo:** es una representación de un sistema desarrollada para un propósito específico.

### 1.1. ¿Por qué utilizamos la simulación y modelos matemáticos?

Utilizamos el modelado matemático y la simulación por ordenador ya que es una forma de adquirir conocimiento acerca del comportamiento de los sistemas. Una manera de conocer el comportamiento de un sistema es experimentar con él, esto lo hacemos planteándonos preguntas acerca del comportamiento de los sistemas y respondiéndolas mediante experimentación.

Lo ideal sería experimentar directamente con el sistema real. Sin embargo, en ocasiones no es posible ya que puede ser que el sistema real aún no exista físicamente o que la escala de tiempo sea inviable. Igualmente, en todas las ramas de la Ingeniería se emplean modelos matemáticos para describir el funcionamiento de los sistemas naturales y artificiales.

En algunos casos, las relaciones matemáticas que constituyen los modelos son sencillas y puede encontrarse una solución analítica del modelo. Sin embargo, en la mayoría de los casos los modelos no pueden resolverse analíticamente y deben estudiarse con ayuda del ordenador, aplicando métodos numéricos. Este “experimento numérico” realizado sobre el modelo matemático recibe el nombre de **simulación**.

Sin embargo, aun cuando podemos experimentar de manera directa con el sistema real no siempre es óptimo o recomendable, ya que puede presentar un elevado costo o ser peligroso. Para estos casos la mejor alternativa es realizar un modelo del sistema y experimentar con el modelo. Otra de las ventajas que esto

---

\*Corresponding author

Email addresses: [juanmapegorin@gmail.com](mailto:juanmapegorin@gmail.com) (Juan Manuel Pegorin), [aniquiroga122000@gmail.com](mailto:aniquiroga122000@gmail.com) (Analía Quiroga), [gabrielmondacanicolas@gmail.com](mailto:gabrielmondacanicolas@gmail.com) (Nicolas Mondaca), [carricartfranco9@gmail.com](mailto:carricartfranco9@gmail.com) (Franco Carricart)

presenta es poder ensayar en condiciones de operación extremas que son impracticables en el sistema real, ya que los modelos matemáticos nos permiten alterar variables y obtener condiciones distintas para el mismo sistema.

## 2. Niveles en el conocimiento de los sistemas

Los niveles de conocimiento desarrollado por G.J. Klir nos sirven para identificar el conocimiento que puede poseerse de un sistema. Esto es muy útil dentro del campo de simulación y modelado. A continuación, se expresan los distintos niveles de conocimiento (sabiendo que a medida que se asciende de nivel, se conocen aspectos importantes del sistema que no se conocen en los niveles inferiores del conocimiento).

**Nivel 0** - Fuente. En este nivel identificamos la porción del mundo real a modelar y las maneras mediante las cuales vamos a observarlo. Dicha porción del mundo real, que es nuestra fuente de datos, se denomina sistema fuente.

**Nivel 1** - Datos. En este nivel disponemos de una base de datos de medidas y observaciones de nuestro sistema fuente.

**Nivel 2** - Generación. En este nivel somos capaces de recrear estos datos usando una representación más compacta. Por ejemplo, mediante fórmulas matemáticas o algoritmos. Dado que un mismo conjunto de datos puede ser generado empleando diferentes fórmulas, algoritmos u otros procedimientos, haber determinado el procedimiento para reproducir los datos es un conocimiento que no teníamos al Nivel 1 (datos).

**Nivel 3** - Estructura. En este último nivel sabemos cómo recrear los datos observados en el Nivel 1 (datos) de una manera específica.

A continuación, expresamos mediante un ejemplo el marco en el que se utilizarían los niveles.

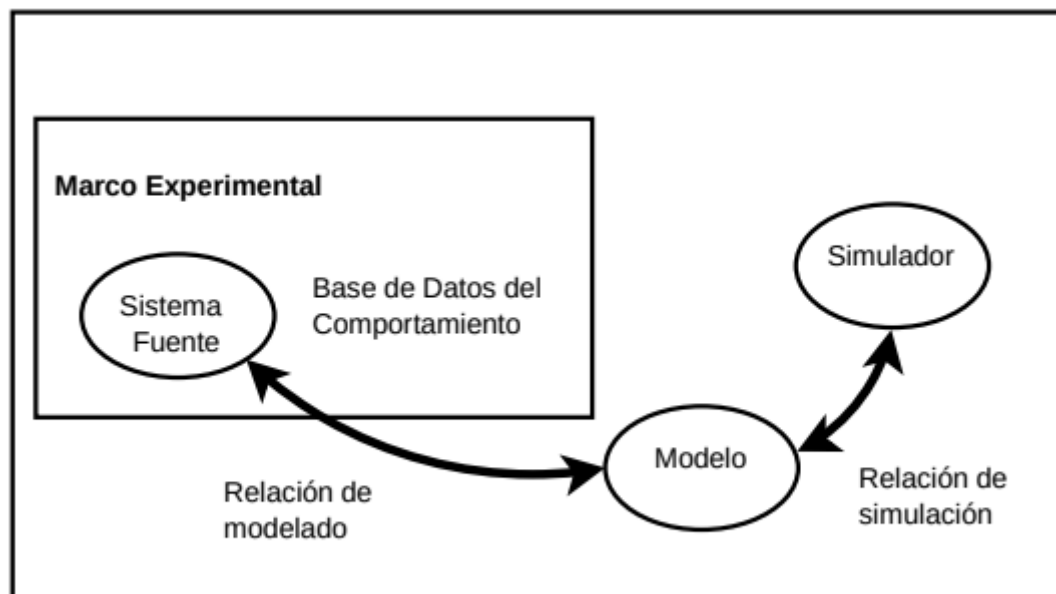


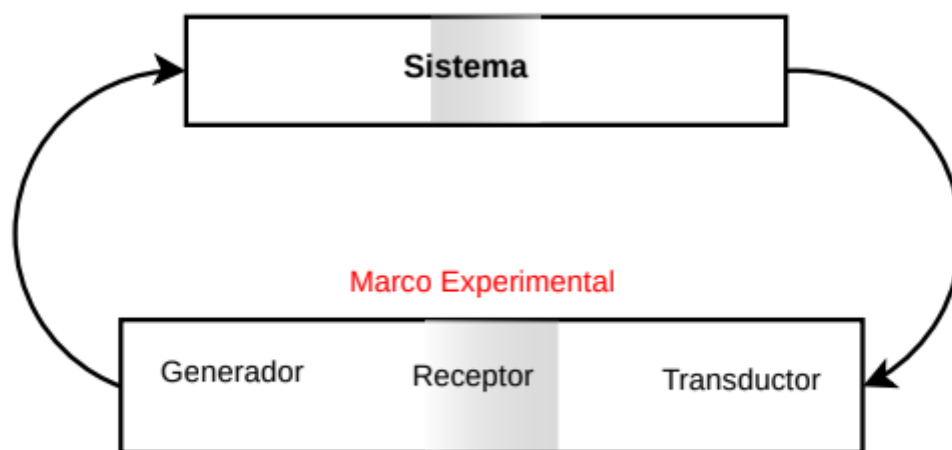
Figura 2: Entidades básicas del modelado y simulación, y su relación.

El sistema fuente es el entorno real o Virtual que estamos interesados en modelar, el cual constituye una fuente de datos observables, esto sería el Nivel 0.

Los datos que se han recogido a partir de observaciones o experimentando con el sistema se llaman base de datos del comportamiento del sistema Nivel 1 (datos). Los datos son observados o adquiridos a través de marcos experimentales de interés para quien realiza el modelo. Un marco experimental es una especificación de las condiciones bajo las cuales el sistema es observado o se experimenta con él.

Se puede entender al marco experimental como la definición del tipo de los datos que se incluirán en la base de datos del comportamiento del sistema, o bien como un sistema de componentes interconectados entre sí en el cual un sistema interactúa con el sistema de interés para obtener las observaciones bajo condiciones experimentales.

El marco experimental está caracterizado por ser un sistema de medida y observador, que típicamente está compuesto por tres componentes: generador, receptor y transductor. El generador genera las secuencias de entrada al sistema. El receptor monitoriza el experimento, para comprobar que se satisfacen las condiciones experimentales requeridas. El transductor observa y analiza las secuencias de salida del sistema.



*Figura 3: Marco experimental y sus componentes*

Es importante establecer los objetivos del estudio lo antes posible, ya que esto nos permite plantear los marcos experimentales adecuados. Una vez fijados los objetivos, presumiblemente existirá un nivel en la especificación del sistema que será el más adecuado para contestar la cuestión planteada, siendo que mientras más exigentes sean las preguntas, mayor será la resolución para contestarlas.

Por otra parte, esta clasificación permite definir en qué consisten los tres tipos básicos de problemas relacionados con el conocimiento de los sistemas: análisis, inferencia y diseño.

Al realizar el análisis de un sistema se intenta comprender el comportamiento del sistema, existente o hipotético, empleando para ello el conocimiento que se tiene de su estructura. En la inferencia sobre un sistema se intenta conocer la estructura del sistema a partir de las observaciones que pueden realizarse del mismo.

En el diseño de un sistema se investigan diferentes estructuras alternativas para un sistema completamente nuevo o para el rediseño de uno ya existente.

### **3. Clasificaciones de los modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos se clasifican según las preguntas que queremos resolver

#### *3.1. Modelo determinístico o estocástico*

Un modelo es determinista cuando todas sus variables de entrada son deterministas. Es decir, el valor de cada una de ellas es conocido en cada instante. Por el contrario, un modelo es estocástico cuando alguna de sus variables de entrada es aleatoria. Dado que las variables del modelo calculadas a partir de variables aleatorias son también aleatorias, la evolución de este tipo de sistemas debe estudiarse en términos probabilísticos. Es importante tener en cuenta que realizar una única réplica de la simulación de un modelo estocástico es equivalente a realizar un único experimento sobre el sistema real.

### 3.2. Modelo estático o dinámico

Un modelo estático es un modelo en el cual el tiempo no juega ningún papel. Los modelos estáticos pueden ser deterministas y estocásticos. El primer tipo se emplea frecuentemente en Ingeniería inversa para describir el comportamiento de los sistemas en el estado estacionario. El segundo tipo se emplea en la realización de simulaciones que emplean números aleatorios para resolver problemas estáticos. Un modelo dinámico es un modelo en el cual interviene el tiempo. Los modelos dinámicos se clasifican en tres tipos: de tiempo discreto, de eventos discretos y de tiempo continuo. En donde:

En los modelos de tiempo discreto y en los modelos eventos 'discretos el valor de las variables solo puede cambiar en instantes específicos, permaneciendo constante el resto del tiempo. Mientras que en un modelo de tiempo continuo el valor de las variables puede cambiar de manera continua a lo largo del tiempo. Estas variables se denominan variables de tiempo continuo y pueden llegar a ser infinitas en un lapso finito de tiempo.

### 3.3. Modelos de Simulación en Tiempo Discreto

Los modelos de tiempo discreto son el tipo de modelo más fácil de entender de manera intuitiva, ya que sus variables van cambiando de valor únicamente en instantes de tiempo equiespaciados. Así pues, para simular estos modelos el reloj de la simulación (que indica el valor del tiempo simulado) avanza saltando un cierto intervalo de tiempo denominado paso de avance en el tiempo, que es constante a lo largo de la simulación. Esto lo hacemos por ejemplo mediante un  $\Delta(t)$ . En cada uno de esos instantes, el modelo se encuentra en un estado, y describe unas entradas y genera unas salidas. El modelo permite calcular, a partir de su estado actual y de sus entradas actuales, cuáles son sus salidas actuales y cuál será su estado en el siguiente instante de tiempo.

## 4. Descripción del modelo

Cuando el modelo tiene un número finito de estados y sus entradas pueden tomar un número finito de posibles valores, una forma sencilla de especificar el comportamiento del modelo es mediante su tabla de transición/salidas. En cada una de ellas escribimos los valores de entrada y los posibles estados, así como los valores de salidas. Este tipo de representación se emplea frecuentemente para describir el comportamiento de los circuitos digitales.

Este tipo de modelos es muy común en los procesos de manufactura que usan rieles o ferrocarriles, en donde los estados posibles pueden ser 0 (vacío) o 1 (ocupado).

La tabla de transición/salidas es útil para representar el comportamiento de modelos sencillos, con un número pequeño de estados y unas entradas con un número pequeño de posibles valores. Una forma más general de representar el comportamiento de un modelo de tiempo discreto es indicando su función de transición de estado y su función de salida. En donde:

**\*\*\_Función de transición de estado\_\*\*:** describe cómo se calcula el estado siguiente a partir del estado

**\*\*\_Función de salida\_\*\*:** describe como se calcula la salida actual a partir del estado y la entrada

### 4.1. Simulación de modelos discretos

El siguiente algoritmo es un simulador para un modelo de tiempo discreto descrito mediante las funciones de transición de estado y de salida. El algoritmo calcula las trayectorias del estado y de salida del modelo, a partir de la trayectoria de entrada y del estado inicial.

```

IFin = 9           //índice temporal final
x(0) = 1, ..., x(9) = 0 //trayectoria de entrada
q(0) = 0          //estado inicial
i = 0             //inicialización del índice temporal

while (i <= iFin)
{
    y(i)=λ(q(i),x(i))
    q(i+1)=δ(q(i),x(i))
    i = i + 1
}

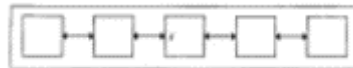
```

## 5. Autómatas celulares

El autómata celular es un tipo de modelo con dos propiedades características. La primera es que posee una estructura regular: esta compuesto de componentes iguales, conectados de acuerdo a un cierto patrón espacial. La segunda es que el comportamiento de todos los componentes está regido por el mismo conjunto de reglas.

Cada uno de los componentes iguales que compone el autómata celular se denomina una célula y el conjunto de células se denomina espacio celular. La distribución espacial de las células puede ser un mallado unidimensional, bidimensional o multidimensional.

Puede definirse un autómata unidimensional conectando las células en fila, como se muestra en la siguiente figura, de modo que cada célula tenga conectada una célula a su izquierda y otra a su derecha.



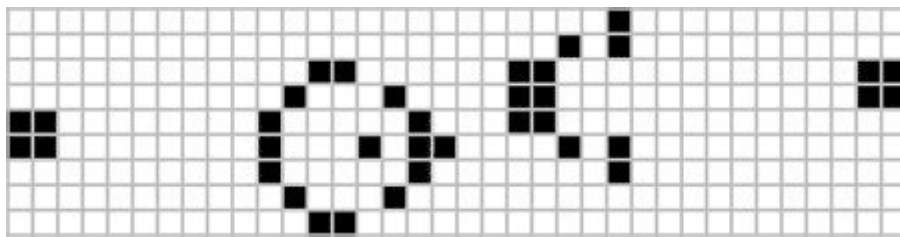
Supongamos que cada célula de este autómata unidimensional puede estar en dos estados, 0 y 1, y que recibe como entrada los estados de las células vecinas. En este caso, hay 8 posibles combinaciones de los valores de las 2 entradas y del estado de la célula. La tabla de transición de estados de la célula, que describe el nuevo estado de la célula en función de sus entradas y del estado actual tendrá la siguiente forma.

Entrada izquierda actual	Estado actual	Entrada derecha actual	Estado siguiente
0	0	0	?
0	0	1	?
0	1	0	?
0	1	1	?
1	0	0	?
1	0	1	?
1	1	0	?
1	1	1	?

La cuarta columna contiene interrogaciones dado que dicha columna tiene 8 filas y que la célula puede estar en 2 estados, por lo que hay 256 posibles tablas de transición de estados. Cada una de estas posibles tablas representan una regla. El criterio para designar las reglas es el siguiente. La cuarta columna puede interpretarse como un número binario de 8 bits, de modo que la primera fila sea el bit menos significativo y la octava fila el más significativo. Se obtiene el nombre de la regla convirtiendo este número de decimal.

Entrada izquierda actual	Estado actual	Entrada derecha actual	Estado siguiente
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

El estado de cada célula a partir del estado en el instante anterior de esa célula y de sus vecinas. Este puede tomar dos valores: 1 (Viva) y 0 (muerta). Cada una de las células puede sobrevivir (esta viva y permanece Viva), nacer (su estado permanece) o morir (cambio de estado). Los autómatas celulares unidimensionales muestran comportamientos muy interesantes y diversos (Juego de la Vida de Conway).



El mismo puede ser utilizado para visualizar el comportamiento de los autómatas celulares desde la siguiente página: <https://playgameoflife.com/>

## 6. Modelado de tiempos discretos

Los modelos de tiempo discreto y de eventos discretos comparten que las variables del modelo correspondiente cambian únicamente en determinados instantes de tiempo y se mantienen constante el resto del tiempo. La diferencia entre ambos tipos de modelo es que en los modelos de tiempo discreto estos instantes están equiespaciados en el eje temporal y por ello el reloj de la simulación avanza en pasos de tiempo de duración constante durante toda la simulación. Mientras que en los modelos de eventos discretos no existe esta restricción.

Existen varias metodologías para describir modelos de eventos discretos, a continuación, describimos dos de ellas:

### 6.1. Modelado orientado a la planificación de eventos

Una manera de definir los modelos de eventos discretos es especificando qué tipos de eventos pueden ocurrir y cuál es la relación causal entre ellos. Un evento puede producir un cambio en el estado del modelo, planificar eventos para instantes futuros y cancelar la planificación de eventos. Podemos describir el algoritmo utilizado a través de los siguientes pasos:

1. Comienza la simulación.
2. El programa principal pasa el control a la rutina de inicialización, para que ésta inicialice el reloj de la simulación, las variables de estado, el calendario de eventos y los acumuladores estadísticos. Se activa el evento "Inicio de la Simulación".

3. Una vez ejecutadas las acciones de inicialización, el programa principal transfiere el control a la rutina de tiempo. El reloj de la simulación es avanzado hasta el instante de ejecución del primer evento del calendario, que es el más inminente, el cual es entonces borrado del calendario. A continuación, se activa dicho evento.
4. El programa principal transfiere el control de la rutina correspondiente al tipo de evento activado. Las acciones realizadas por la rutina de eventos dependen de cada caso, pero en general la rutina actualizará las variables de estado, los acumuladores estadísticos y añadirá nuevos eventos al calendario de eventos o bien los eliminará del calendario de eventos. Existe un evento especial, denominado “Finalización de la Simulación”, que se activa cuando se satisfacen las condiciones fijadas para la finalización de la simulación. Por ejemplo, que se alcance determinado valor del tiempo.
5. Si el evento ejecutado es “Finalización de la Simulación”, el programa principal transfiere el control a la rutina generadora de informes. En caso contrario, el programa principal devuelve el control a la rutina de tiempo.
6. La rutina generadora de informes muestra el valor de las variables de salida de la simulación.
7. Finaliza la simulación.

Esta forma de describir los modelos de eventos discretos y de programar su algoritmo de simulación se aplica a modelos sencillos. En modelos de grandes dimensiones en lugar de intentar describir globalmente el comportamiento del sistema completo, es más sencillo realizar un análisis por reducción. Es decir, dividir el sistema en partes, modelar las partes independientemente y finalmente describir la interacción entre las partes.

Para describir modelos de manera modular y jerárquica es preciso definir los componentes que componen el modelo y especificar como los componentes interaccionan entre sí. La interacción entre los componentes del modelo puede describirse mediante los dos tipos siguientes de acoplamiento:

**Acoplamiento modular:** Cada componente tiene una interfaz, compuesta por puertos de entrada y puertos de salida, a través de los cuales se produce la interacción con el resto de componentes.

**Acoplamiento no modular:** La interacción entre los componentes se describe mediante la influencia que tiene el estado de unos componentes (componentes influenciadores) sobre la transición del estado de otros (componentes influenciados). El acoplamiento no modular no tiene interfaz.

## 6.2. Modelado orientado a los procesos

Consiste en tomar el punto de vista de las entidades y describir su circulación a través del sistema, por lo que se centra en los procesos que llevan a cabo las entidades. Los diversos entornos de simulación permiten al usuario construir el modelo instanciando módulos predefinidos (pinchando y arrastrando el icono desde la librería de módulos a la ventana de edición del modelo) y conectándolos gráficamente. La animación y otras capacidades gráficas permiten Visualizar la evolución del modelo durante la simulación.

Asimismo, algunos entornos proporcionan facilidades para el modelado estadístico de las entradas aleatorias al modelo, para definir experimentos y problemas de optimización sobre el modelo, y para analizar estadísticamente los resultados.