

# Conceptos y elementos de simulación con eventos discretos

[9.1] ¿Cómo estudiar este tema?

[9.2] Conceptos en la simulación con eventos discretos

[9.3] Transiciones o mecanismos de avance

[9.4] Medidas del rendimiento de un sistema

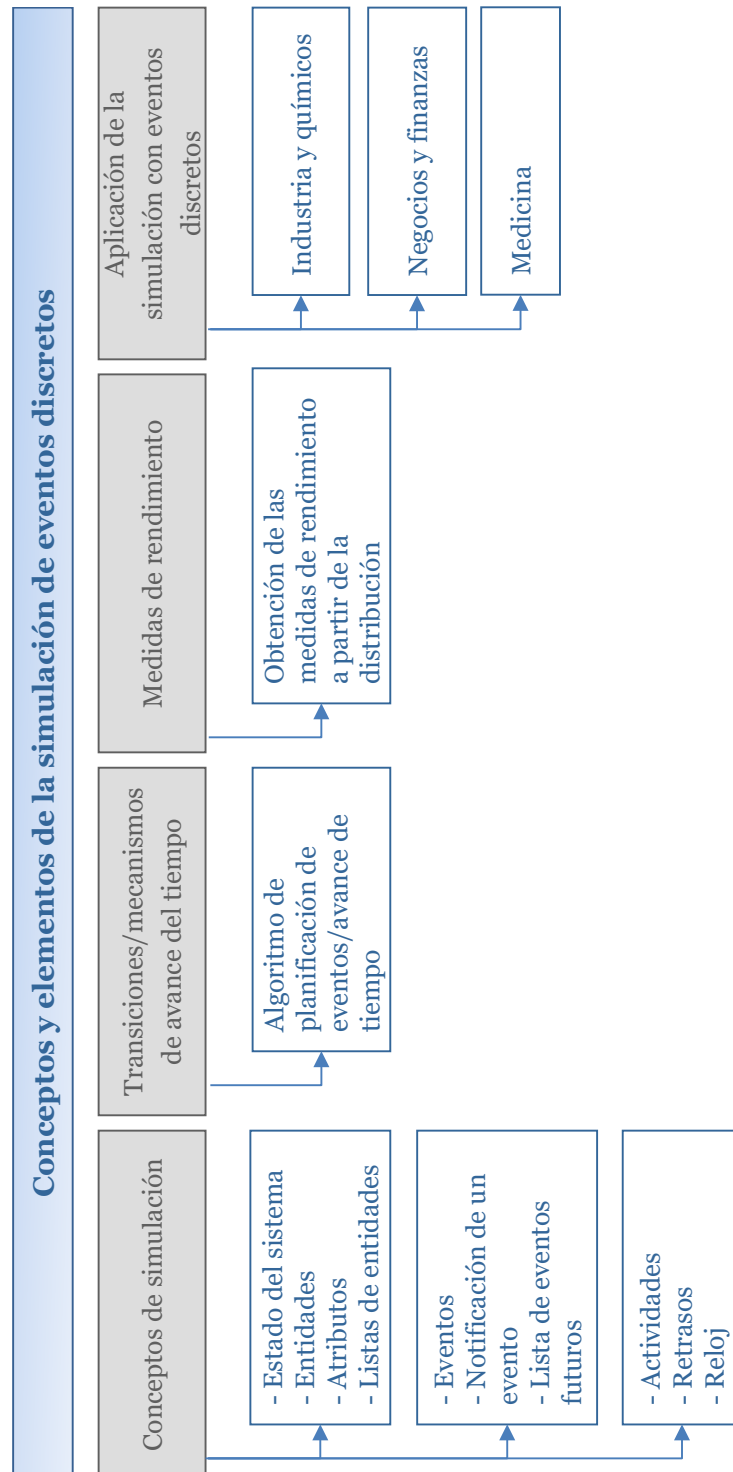
[9.5] Aplicaciones de la simulación de eventos discretos

[9.6] Referencias bibliográficas

9

T E M A

# Esquema



## Ideas clave

---

### 9.1. ¿Cómo estudiar este tema?

Para estudiar este tema lee las **Ideas clave** que encontrarás a continuación.

Para poder aplicar de forma conveniente la simulación con eventos discretos es necesario conocer los conceptos fundamentales asociados y los elementos que integran los modelos de simulación.

Las ideas claves de este tema son:

- » **Conceptos fundamentales.** Sistema, modelos, estado del sistema, entidades y sus atributos, listas de entidades, eventos y su notificación, lista de eventos futuros, actividades, retrasos, tiempo y reloj.
- » Avance del tiempo.
- » Planificación de eventos.
- » Medidas des rendimientos de un sistema y sus distribuciones.
- » Aplicaciones de la simulación con eventos discretos.

### 9.2. Conceptos en la simulación con eventos discretos

Para definir **los conceptos principales para sistema sistemas estocásticos que cambian de forma discreta**, lo que implica el uso de elementos aleatorios y de tiempo, se tomara las definiciones y ejemplos dados por Banks(Banks, Carson, & Nelson, 1996).

- » El **sistema** es un conjunto de entidades (personas o máquinas) que interactúan entre sí a lo largo del tiempo con el objeto de llevar a cabo determinados objetivos.
- » Un **modelo** de simulación es la representación abstracta del sistema, que generalmente contiene relaciones estructurales, lógicas o matemáticas y que describen al sistema en términos de su estado, de las entidades y sus atributos, procesos, eventos, actividades y retrasos.

- » El **estado** del sistema, está representado por un conjunto de variables que contiene toda la información necesaria para describirlo en cualquier instante de tiempo.
- » Las **entidades** del sistema son cualquier objeto o componente que requiere representación explícita en el modelo como por ejemplo un servidor, un cliente o una máquina.
- » Los **atributos** son las propiedades de una entidad, como por ejemplo, la prioridad en la cola de espera de los clientes.
- » Una **lista** es cualquier colección de entidades asociadas (permanentemente o temporalmente) que están ordenadas de alguna manera lógica, tales como los clientes en una línea de espera ordenado de forma «primero en entrar, primero en salir» o por prioridades. Dependiendo del contexto pueden llamarse colas, pilas o cadenas.
- » Un **evento o suceso** es una ocurrencia instantánea que cambia el estado de un sistema como puede ser la llegada de un nuevo cliente.
- » La **notificación de un evento** es el registro de un evento que ocurre en el momento actual o en el futuro, junto con los datos asociados que son necesarios para ejecutar el evento. El registro debe incluir como mínimo el tipo de evento y el tiempo del evento.
- » La **lista de eventos** es una lista de notificaciones de eventos para eventos futuros ordenados por momento de ocurrencia. Se conoce también como lista de eventos futuros (LEF). Esta lista siempre aparece clasificada por la del evento almacenado en la notificación.
- » Una **actividad** representa un intervalo de tiempo de una longitud determinada de que cuando empieza ya se conoce, aunque puede ser definida en términos de una distribución estadística. Un ejemplo de actividad es el tiempo de servicio o el tiempo entre llegadas. Las actividades suelen ser definidas por el modelador y su duración se puede especificar de diferentes formas: de forma determinista (tiempo exacto), de forma estadística (mediante un sorteo entre cantidades con la misma probabilidad) o en función de variables del sistema y/o entidades (el tiempo de carga de una barco que depende del peso de la carga y de la velocidad de carga por hora).

- » Un **retraso** es un intervalo de tiempo de longitud indefinida no especificada que no se conoce hasta que termina, como por ejemplo el tiempo de espera de los clientes en una línea de espera último-en-llegar-primero-en-salir que depende de la llegada de nuevos clientes. La duración de un retraso no se especifica de antemano sino que se determina por las condiciones del sistema.

Es habitual que se mida la duración del retraso y se considera como una de las salidas deseadas tras la ejecución del modelo. Por ejemplo, el tiempo de espera de un cliente en una línea de espera puede depender del tiempo de servicio de los clientes anteriores o de la disponibilidad los servidores o equipos.

- » El **reloj** es una variable que representa el tiempo simulado.

Es importante entender la relación y diferencias entre los conceptos más importantes como son los eventos, las actividades y los retrasos, porque son los que representan la naturaleza dinámica de los sistemas.

En ocasiones, los retrasos y las actividades son denominadas **esperas condicionales** y **esperas incondicionales**, respectivamente.

La realización de una actividad es un evento que generalmente se conoce como **evento primario** y que se gestiona mediante la colocación de una notificación de evento en la lista de eventos futuros.

Los retrasos se gestiona mediante la colocación de la entidad asociada en otra lista, que puede representar una línea de espera, hasta que las condiciones del sistema permiten su procesamiento. Por tanto los retrasos no se representan mediante notificaciones de eventos y no aparecerán en la lista de eventos futuros. La realización de un retraso se llama, en ocasiones, **evento condicional o secundario**.

**Ejemplo de un *call-center*, con dos operadores A y B.**

Los operadores reciben llamadas y prestan un servicio. Se identificarán los distintos elementos.

**Estado del sistema.** Representado por

- » Número de llamadas esperando a ser atendidas en un instante  $t$ .
- » El operador A está inactivo u ocupado en el instante  $t$  (puede ser representado por 0 ó 1).
- » El operador B está inactivo u ocupado en el instante  $t$  (puede ser representado por 0 ó 1).

**Entidades.** Las entidades son representadas en términos de sus variables de estado, no de forma explícita.

**Eventos.** Se distinguen tres tipos de eventos: Llegada de una llamada, finalización del servicio del operador A y finalización del servicio del operador B.

**Actividades.** Las actividades están relacionadas con los eventos y se consideran: tiempo entre llamadas, tiempo de servicio del operador A y tiempo de servicio del operador B. Son cantidades que se conocen previamente y se define la distribución de probabilidad de cada uno de los tiempos considerados.

**Retrasos.** Espera de una llamada en la cola, mientras uno de los operadores queda libre.

En las implementaciones de modelos de simulación de sistemas con eventos discretos, ya sea mediante la utilización de un lenguaje de programación de propósito general o una aplicación y lenguaje específico para simulación, se identifican una serie de características comunes a todas ellas (Fishman, 2001)

- » Implementación de un generador de muestras de números aleatorios que estén uniformemente distribuidos entre (0,1).
- » Implementación de un generador de muestras de variables aleatorias con distribuciones específicas.
- » Implementación de los mecanismos de control y flujo del tiempo que tendrán lugar durante la simulación.

- » Implementación del algoritmo de planificación de eventos/ avance de tiempo que :
  - Determine el suceso que ocurrirá a continuación del actual.
  - Almacenamiento, eliminación o actualización de las notificaciones de eventos en la lista de eventos futuros.
- » Recolección y análisis de los datos que se han generado a raíz de la simulación.
- » Elaboración de informes y análisis de sensibilidad sobre los resultados obtenidos.
- » Detección de las posibles condiciones de error.

### 9.3. Transiciones o mecanismos de avance

La lista de eventos futuros es un elemento esencial del modelo de simulación ya que gracias a ella, se puede implantar el mecanismo que permite avanzar el tiempo de simulación y garantizar que todos los eventos se producen en el orden cronológico. Como ya se ha expuesto, esta lista contiene todas las notificaciones de los eventos que están programadas. **La programación de un evento futuro consiste** en que, en el instante que comienza una actividad, se calcula su duración o bien se establece como una muestra de una distribución estadística; y a partir de esto se almacena el evento de final de actividad junto con su tiempo de la prueba.

El **algoritmo de planificación de eventos/ avance de tiempo** determina la secuencia de acciones que debe realizar un simulador para hacer avanzar el reloj y construir una nueva instantánea del sistema en la que se muestra su estado, entidades y atributos y su lista de eventos futuros.

Se debe de establecer lo que sería la primera instantánea del sistema, inicializando el reloj a 0 y estableciendo las condiciones iniciales del sistema al determinar, entre otras cosas, los instantes de ocurrencia de los eventos futuros más cercanos en el tiempo.

Partiendo de estas condiciones, los pasos que se deben realizar son:

<b>Paso 1</b>	Eliminar de la lista de eventos futuros, la notificación del evento inminente o más próximo.
<b>Paso 2</b>	Avanzar el reloj para hacerlo coincidir con el instante de ocurrencia del evento más próximo.
<b>Paso 3</b>	Ejecutar el evento correspondiente y actualizar las variables de estado del sistema ya que se ha producido un evento, se realizan convenientemente los cambios en los atributos de las entidades y otros valores.
<b>Paso 4</b>	Si es necesario, generar nuevos eventos futuros y almacenar su notificación en la lista de eventos futuros clasificados por su tiempo de ocurrencia.
<b>Paso 5</b>	Actualizar contadores y elementos estadísticos.

Los pasos se repiten hasta que se alcance una condición determinada o se llegue al tiempo de simulación fijado.

Instantánea del sistema al inicio		
Reloj	Estado del sistema	Lista de eventos futuros
$t_0=0$	(3,2)	(tipo 1, $t_1$ ) (tipo 3, $t_2$ ) (tipo 1, $t_3$ )
<p><i>Siguiente evento, tipo 1 en <math>t_1</math></i>  <i>Se genera un evento futuro tipo 3 con tiempo entre <math>t_2</math> y <math>t_3</math></i></p>		
Instantánea del sistema en el instante $t_1$		
Reloj	Estado del sistema	Lista de eventos futuros
$t_1$	(3,3)	(tipo 3, $t_2$ ) (tipo 3, $t_1$ ) (tipo 1, $t_3$ )

Figura 1. Avance del tiempo de simulación y actualización del sistema.

Luego como se muestra en la «Figura 1», se puede determinar que cada iteración del algoritmo da lugar a que el tiempo avance desde el instante en el que ha tenido lugar un evento hasta el instante en el que se producirá el próximo evento y los incrementos de tiempo no tienen que tomar siempre el mismo valor.



En la siguiente figura se resume el proceso completo que se realiza en una prueba de simulación.

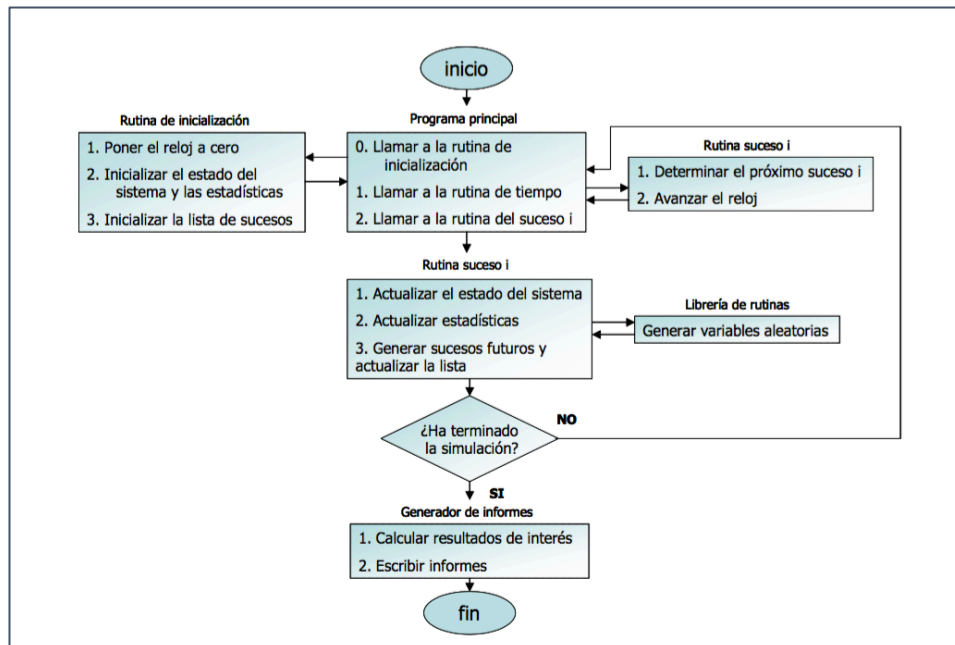


Figura 2. Diagrama de flujo de una simulación. Fuente: García-Sánchez y Ortega-Mier, 2006.

## 9.4. Medidas del rendimiento de un sistema

Una de las **características más importantes de la simulación es que permite recoger datos sobre el estado del sistema simulado en cada instante de tiempo**. A partir de la información recogida se pueden estimar los parámetros de rendimiento del sistema, que son distintos en cada tipo de sistema. Por ejemplo, en la simulación de un sistema con colas de espera, las medidas de rendimiento son, entre otras, la longitud media de la cola de espera, el tiempo medio de espera en la cola.

Para el cálculo de estas medidas, es necesario considerar las distribuciones que siguen los eventos de llegada y el tiempo de servicio, ya que estas medidas dependen fuertemente de la probabilidad de que ocurran eventos extremos.

Generalmente la distribuciones de llegada y la de los tiempos de servicio, suelen ser de *Poisson* o exponenciales, pero el hecho de que puedan ser de otros tipos como la distribución normal o la *Erlang*, no afecta a la metodología que se usa para la

simulación sino a la forma de extracción de las muestras aleatorias de las distribuciones de probabilidad correspondientes.

**La obtención de estas medidas de rendimiento es uno de los objetivos primarios de la simulación.** Desde esta perspectiva, la simulación se debe ver como un experimento estadístico, ya que en particular, una estimación es una cantidad aleatoria, que es la salida de una medición en un sistema. La incertidumbre se debe únicamente a la variación estadística, el grado de cuantificación mediante medidas de dispersión estadísticas estándar tales como el intervalo de confianza o la varianza del estimador.

Así mismo **se recomienda hacer un análisis de la robustez para verificar la sensibilidad de la medida del rendimiento del sistema que se simula con respecto a la forma de las distribuciones de entrada**, que aunque es costoso y difícil de interpretar, es un requisito indispensable para que el estudio de simulación sea creíble.

Estas medidas se deberán expresar numéricamente para facilitar la toma de decisiones.

## 9.5. Aplicaciones de la simulación de eventos discretos

La simulación se aplica para el estudio de sistemas de naturaleza muy diversa. En general, **la simulación se recomienda para resolver problemas operativos en sistemas que ya existen o para procedimientos de mejora del comportamiento del sistema.**

**Los modelos de simulación se consideran modelos de entrada y salida**, por lo que el objetivo es obtener resultados que se producen tras el efecto de una o más entradas en el sistema. Actualmente, la simulación es una técnica muy extendida y que se utiliza en una multitud de dominios. Entre otros, la simulación se usa para:

- » La simulación de procesos industriales.
- » La simulación de procesos financieros y análisis de inversiones.
- » La simulación de procesos hospitalarios y médicos.
- » El análisis del impacto ambiental que origina distintos procesos industriales, químicos y otros.

- » El análisis y diseño de sistemas de producción, cadenas de montaje.
- » El análisis y diseño de redes y sistemas de comunicación.
- » La evaluación de sistemas de servicios públicos.
- » El análisis de sistemas de transporte.
- » El análisis de sistemas de computación y cálculo intensivo.
- » El análisis de sistemas tácticos o de defensa.
- » La localización de instalaciones como almacenes, equipos, etc.
- » El análisis de proyectos de todo tipo.
- » El análisis y la gestión de inventarios.
- » La simulación y el análisis del rendimiento de sistemas de espera.

## 9.6. Referencias bibliográficas

Banks, J., Carson, J. S., y Nelson, BL. (1996). *Discrete-Event System Simulation*. (2a ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Fishman, G. S. (2001). *Discrete-Event Simulation*. New York, NY: Springer New York.  
Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-3552-9>

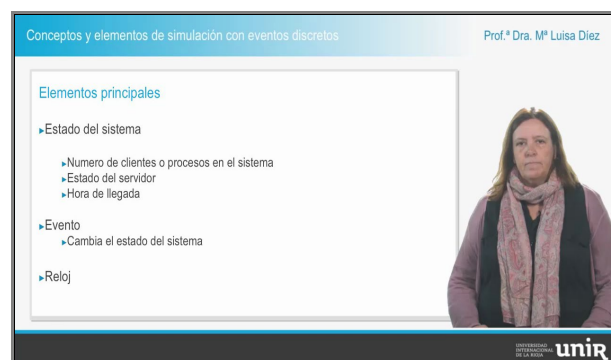
García Sánchez, A. y Ortega Mier, M. (2006). *Simulación de eventos discretos*.  
Recuperado de <http://www.iol.etsii.upm.es/arch/simulacion.pdf>

## Lo + recomendado

### Lecciones magistrales

#### Conceptos y elementos de simulación con eventos discretos

En la siguiente lección magistral vamos a hacer un repaso de los elementos principales que intervienen en un modelo de simulación de eventos discretos, así como de los procesos que se llevan a cabo en estos modelos.



Accede a la lección magistral a través del aula virtual

No dejes de leer...

#### Aplicación de un modelo de simulación discreta en el sector del servicio automotor

Ceballos, J. A., Restrepo, E. D. y Fernández-Ledesma J.D. (2013). Aplicación de un modelo de simulación discreta en el sector del servicio automotor. *Revista Ingeniería Industrial*, 1(1), 56-61.

Artículo en el que se muestra de forma práctica los pasos que se deben seguir para la construcción de un modelo de simulación.

Accede al artículo a través del aula virtual o desde la siguiente dirección web:

<https://revistas.upb.edu.co/index.php/industrial/article/view/2308/2058>

## **Análisis de colas para el diseño de una cafetería mediante simulación de eventos discretos**

Fernández-Pérez y J. Riaño, G. (2007). Análisis de colas para el diseño de una cafetería mediante simulación de eventos discretos. *Revista de Ingeniería*, 25.

Artículo en el que se describe la aplicación de un modelo de simulación de eventos discretos para el análisis de las colas en una cafetería.

Accede al artículo a través del aula virtual o desde la siguiente dirección web:

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=SO121-49932007000100002&script=sci\\_arttext&tln](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=SO121-49932007000100002&script=sci_arttext&tln)

## **Conceptual modeling for simulation**

Artículo en el que se define la terminología que ayuda al modelado conceptual, de un proyecto de simulación.

Accede al artículo a través del aula virtual o desde la siguiente dirección web:

<http://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/o32.pdf>

## + Información

---

A fondo

### **Simulación de sistemas discretos**

Barceló, J. (1996). Simulación de sistemas discretos. Madrid: Isdefe.

Libro sobre simulación de sistemas discretos.

Accede al artículo a través del aula virtual o desde la siguiente dirección web:

[https://jrvargas.files.wordpress.com/2010/02/libro-simulacion de sistemas discretos.pdf](https://jrvargas.files.wordpress.com/2010/02/libro-simulacion-de-sistemas-discretos.pdf)

### **Sistemas de simulación física y sistemas complejos**

Artículo sobre las herramientas de software, algoritmos y hardware, desarrolladas recientemente para generación de sistemas de simulación física y sistemas complejos aplicados a la generación de imagen.

Accede al artículo a través del aula virtual o desde la siguiente dirección web:

[http://www.biopus.com.ar/tarcisio/PIROTTA\\_sistemas simulacion.pdf](http://www.biopus.com.ar/tarcisio/PIROTTA_sistemas_simulacion.pdf)

## Bibliografía

Banks, J., Carson, J. S. y Nelson, B. L. (1996). *Discrete-Event System Simulation*. (2a ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Barceló, J. (1996). *Simulación de sistemas discretos*. Madrid: Isdefe.

Fishman, G. S. (1978). *Principles of discrete event simulation*. . Nueva York: John Wiley and Sons.

Fishman, G. S. (2001). *Discrete-Event Simulation*. New York: Springer New York.

# Test

---

1. La notificación de un evento:
  - A. Es la ejecución del evento.
  - B. Es un registro que almacena información sobre un evento que se producirá en el futuro.
  - C. Es la información que se obtiene tras la ejecución del evento.
  - D. Ninguna es verdadera.
  
2. Un retraso:
  - A. Se almacena en la lista de eventos futuros.
  - B. No se almacena.
  - C. Se almacena en una lista de espera.
  - D. Se almacena en la lista de eventos futuros antes de que se produzca.
  
3. Un evento secundario:
  - A. Es la realización de una actividad que se encuentra en segunda posición en la lista.
  - B. Es la realización de un retraso.
  - C. Es la realización de una actividad que se ejecuta en la última posición.
  - D. Ninguna de las anteriores es verdadera.
  
4. El algoritmo de planificación de eventos/ avance de tiempo:
  - A. Determina en cada iteración únicamente el siguiente evento que va a ocurrir.
  - B. Únicamente gestiona en cada iteración la lista de eventos futuros.
  - C. Ninguna es verdadera.
  - D. Realiza las dos acciones A y B.
  
5. El tiempo de las notificaciones de la lista de eventos futuros (dos correctas):
  - A. Representa el instante en el que se produjo un evento.
  - B. Cambia para cada evento tantas veces como se producen transiciones de estado.
  - C. Representa el instante en el que se producirá el evento.
  - D. Se determina cuando se introduce la notificación en la lista y no varía.

- 6.** En el flujo de una simulación, la actualización del estado del sistema se realiza:
- A. Cuando acaba la simulación.
  - B. Cuando se produce un retraso en el sistema.
  - C. Tras cada iteración después de ejecutarse un evento.
  - D. Ninguna de las anteriores es verdadera.
- 7.** Los intervalos de tiempo entre eventos:
- A. Siempre son iguales.
  - B. Puede que haya intervalos iguales y otros no.
  - C. Necesariamente son distintos.
  - D. Ninguna de las anteriores es verdadera.
- 8.** El reloj de simulación:
- A. Avanza de forma constante.
  - B. Cambia su valor solo al final de la simulación según la suma de tiempos de los eventos ejecutados.
  - C. Toma los valores de los tiempos especificados en las notificaciones.
  - D. No cambia de valor.
- 9.** Las medidas de rendimiento del sistema (dos correctas):
- A. Se conocen antes de la simulación y se utilizan.
  - B. Se estiman en la simulación.
  - C. No pueden ser calculadas de forma exacta por la simulación.
  - D. Ninguna de las anteriores es verdadera.
- 10.** Las distribuciones que siguen los eventos de llegada y los tiempos de servicio:
- A. No influyen en la estimación de las medidas de rendimiento.
  - B. Influye en el método de simulación usado.
  - C. Influye en la forma de extracción de las muestras aleatorias.
  - D. Ninguna de las anteriores es cierta.