

## EJEMPLO DE UNA SIMULACIÓN DE EVENTO DISCRETO

Antes de proseguir con los detalles del modelado de la simulación, será útil trabajar con un ejemplo sencillo de simulación para ilustrar algunos conceptos básicos en simulación de eventos discretos. El modelo que hemos escogido como ejemplo inicial es un sistema de cola de espera con un solo servidor (empleado). A este sistema llegan los clientes que proceden de determinada población y son atendidos de inmediato si el empleado está desocupado, o se forman en cola para esperar que el empleado se desocupe. Recuerden que este mismo modelo se estudia en líneas de espera M/M/1, pero supusimos que los tiempos de llegadas y salidas eran exponenciales. En la práctica no suele ser así, las llegadas al mostrador de una aerolínea tienden a ser por lotes de personas, debido a factores como llegadas de autobuses de trasbordo y de vuelos de conexión. Para un sistema como esos, se debe usar una distribución empírica de tiempos de llegada, lo cual significa que el modelo analítico de la teoría de colas ya no es factible. Con la simulación se puede usar cualquier distribución de tiempos entre llegadas y de tiempos de servicio, dando con ello mucho más flexibilidad al proceso de simulación.

### Supuestos de este ejemplo

Para este sistema de un solo empleado, suponemos que las llegadas se toman de una población infinita que necesita el servicio. La capacidad de la sala de espera es ilimitada y los clientes se atienden en el orden que lleguen. Además, suponemos que las llegadas se efectúan una vez de modo aleatorio y que los tiempos entre llegadas se distribuyen de acuerdo a la tabla 1. Todas las llegadas se atienden finalmente con la distribución de tiempos de servicio como se muestra en la segunda parte de la tabla 1. También se supone que los tiempos de servicio son aleatorios.

### Explicación

Una vez vistos esta teoría preliminar, comenzaremos ahora la simulación al iniciar todas las variables. Como se supone que la primera llegada tiene lugar en el momento 0, hacemos  $TL = 0$ . También suponemos que el sistema está vacío en el tiempo 0 y, por lo tanto, hacemos  $ES = 0$ ,  $LC = 0$  y  $TS = 9999$ . Nótese que  $TS$  debe ser mayor que  $LTS$ : esto significa que nuestra lista de eventos ahora consiste en dos eventos programados: una llegada en el tiempo 0 y una salida virtual en el tiempo 9999. Con esto se completa el proceso de inicio y obtenemos la representación de computadora que muestra la tabla 3.

Estamos listos para la primera acción en la simulación: búsqueda en la lista de eventos para determinar el primer evento. Como nuestra simulación consiste en sólo dos eventos, únicamente determinamos el primer evento al comparar  $TL$  y  $TS$ . En otras simulaciones podríamos tener más de dos eventos, de modo que deberíamos tener un sistema eficaz de búsqueda por la lista de eventos. Una llegada está definida como  $TL < TS$ ; una salida por  $TS < TL$ . En este punto  $TL = 0$  es menor que  $TS = 9999$ , lo cual indica que a continuación tendrá lugar una llegada. Identificamos este evento como 1. Esto es hacemos que  $HS = 0$ .

La llegada cuando el tiempo es 0 encuentra vacío al sistema, lo cual se indica por el hecho de que  $ES = 0$ . En consecuencia, el cliente es atendido de inmediato. Para esta parte de la simulación hacemos primero que  $ES = 1$  para indicar que el empleado se encuentra ocupado ahora. A continuación generamos un tiempo de servicio y establecemos el tiempo de salida para este cliente. En la tabla 2 vemos que  $TSG$  para el cliente 1 es 3.

Como  $HS = 0$  en este punto, hacemos que  $TS = 3$  para el primer cliente. En otras palabras, el cliente 1 saldrá del sistema a la hora 3. Por último, para completar todas las acciones del procesamiento de una llegada, programamos la siguiente llegada al sistema al generar un tiempo entre llegadas,  $TLG$  y establecer la hora de esta llegada mediante la ecuación  $TL = HS + TLG$ . Como  $TLG = 2$ , hacemos  $TL = 2$ . Esto es, la segunda llegada tendrá lugar en la hora 2. Al final

del evento 1 la representación de la simulación en computadora será como se muestra en la tabla 3.

En esta etapa de la simulación nos vamos percatando de que HS ha rebasado el tiempo especificado para la simulación, LTS. Si es así, imprimimos los resultados y detenemos la ejecución del modelo de simulación. Si este no es el caso, continuamos con la simulación. Ejecutamos este proceso al final de cada evento. Sin embargo para este ejemplo, suponemos que LTS es muy grande. En consecuencia de aquí en adelante, no describiremos el proceso completo de terminación, sólo algunos eventos de este problema.

Nos regresamos para determinar el siguiente evento. Como  $TL = 2$  y  $TS = 3$ , el siguiente evento que es 2, será una llegada a la hora 2. Una vez determinado el siguiente evento, adelantamos la simulación a la hora de esta llegada al actualizar esta llegada a la hora 2 ( $HS = 2$ ).

La llegada cuando el tiempo es 2 encuentra al empleado ocupado, de modo que ponemos a este cliente en la cola de espera al actualizar LC de 0 a 1. Como el evento actual es una llegada, programamos la siguiente llegada al sistema. Dado que  $TLG = 2$  para la llegada 3, la siguiente llegada tiene lugar a la hora 4. Con esto se terminan las acciones necesarias para el evento 2. Procedemos a determinar las acciones para el evento siguiente. De acuerdo con la representación de la computadora del sistema en la tabla 3, vemos que en este punto, final del evento 2,  $TS = 3$  menor que  $TL = 4$ . Esto indica que el evento siguiente, 3, será una salida a la hora 3. Adelantamos el reloj a la hora de esa salida; esto es actualizamos HS a 3.

Cuando el tiempo es 3 procesamos la primera salida del sistema. Con la salida, el empleado queda libre. Comprobamos el estado de la cola de espera para ver si hay clientes que esperen servicio. Como LC es 1, tenemos un cliente en espera. Quitamos este cliente de la cola, hacemos que  $LC = 0$  y lo atendemos al generar un tiempo de servicio, TSG, y ajustamos el tiempo de salida mediante la relación  $TS = HM + TSG$ . En la tabla 2 vemos que para el cliente 2,  $TSG = 3$ . Como  $HM = 3$ , hacemos que  $TS = 6$ . Hemos completado todas las acciones para el evento 3, obteniendo la representación de computadora que muestra la tabla 3.

De aquí en adelante dejamos que el estudiante repase la lógica de la simulación para el resto de los eventos de este ejemplo. La tabla 3 muestra el estado de la simulación al final de cada uno de esos eventos. Nótese que al final de los eventos 8, 10 y 14, salidas, el sistema queda desocupado. Durante la secuencia de acciones para esos eventos Hacemos que  $ES = 0$  y  $TS = 9999$ . En cada caso, el sistema permanece desocupado hasta que se tiene una llegada.

Este ejemplo sencillo muestra algunos de los conceptos básicos de la simulación y el modo en que se puede usar ésta para analizar un problema determinado. Aunque no es probable que este modelo se use para evaluar muchos casos de importancia, ha proporcionado un ejemplo específico y, más importante, ha presentado distintos conceptos claves de simulación.

**Tabla 1. Distribución de tiempos de llegadas y servicios**

Tiempo entre llegadas (minutos)	Probabilidad
1	0.20
2	0.30
3	0.35
4	0.15

Tiempo de servicio (minutos)	Probabilidad
1	0.35
2	0.40
3	0.25

**Tabla 2. Tiempos entre llegadas y de servicio, generados**

Cliente Número	Tiempo entre llegadas (TL)	Tiempo de servicio (TS)
1	-----	3
2	2	3
3	2	2
4	3	1
5	4	1
6	2	2
7	1	1
8	3	2
9	3	-----

**Tabla 3. Representación de la simulación en la computadora**

Final del evento	Tipo de Evento	Cliente número	Variables del sistema			Lista de Eventos	
			HS	ES	LC	TL	TS
0	Inicio	-----	0	0	0	0	9999
1	Llegada	1	0	1	0	2	3
2	Llegada	2	2	1	1	4	3
3	Salida	1	3	1	0	4	6
4	Llegada	3	4	1	1	7	6
5	Salida	2	6	1	0	7	8
6	Llegada	4	7	1	1	11	8
7	Salida	3	8	1	0	11	9
8	Salida	4	9	0	0	11	9999
9	Llegada	5	11	1	0	13	12
10	Salida	5	12	0	0	13	9999
11	Llegada	6	13	1	0	14	15
12	Llegada	7	14	1	1	17	15
13	Salida	6	15	1	0	17	16
14	Salida	7	15	0	0	17	9999
15	Llegada	8	17	1	0	20	19

**Para demostrar el modelo de simulación, necesitamos definir algunas variables:**

HS = hora de la simulación

TL = tiempo programado para la siguiente llegada

TS = tiempo programado para la siguiente salida

ES = estado del sistema (1 = ocupado, 0 = desocupado)

LC = longitud de la cola de espera

LTS = longitud, en unidades de tiempo, de una corrida de simulación

HM = tiempo de este momento

TSG = tiempo de servicio generado

TLG = tiempo entre llegadas generado