

# Simulación a Eventos Discretos

Obligatorio 3

Informe

Andrés Baranzano 4.384.771-6

Emiliano Prigue 4.696.389-6

## Ejercicio 14

### *Resolver el ejercicio 7.7.2 del libro del curso.*

Nota\* : En esta sección, se utilizará la nomenclatura “parte a” al modelo que tiene a todos los mecánicos con la misma media, y “parte b” al modelo que tiene a 1 mecánico experimentado, 2 promedios y 1 inexperto.

Según la especificación en el capítulo 6 del libro, las salidas de interés de la simulación es el “tiempo muerto” de las máquinas y las variables de decisión son la cantidad de recursos (mecánicos y equipos). Por lo que nos creamos un Histograma de tipo Observation (los cuales se guardan en los archivos “Downtime.txt” en las carpetas correspondientes) que registra para cada vez que se rompe una máquina, el tiempo que esta permaneció sin uso. Analizando los histogramas obtenidos, se puede ver que la media de downtime (tiempo muerto) es un ligeramente más baja en la parte b (del orden de 1 minuto en una media de aproximadamente 27 minutos), como también lo es la varianza. Por otro lado, a pesar de que el tiempo de downtime máximo en la parte b es menor, si se considera la cantidad de máquinas que estuvieron menos de 25 minutos en downtime, en la parte a es superior al obtenido en la parte b.

Luego, en la especificación también se comenta que otras salidas de interés son el uso de los recursos del sistema, mecánicos y equipos. Para ello se realizaron dos Histogramas de tipo TimeWeighted (los cuales se guardan con los nombres “UseOfMechanics.txt” y “UseOfEquipment.txt” en las carpetas correspondientes) donde se registran los tiempos en los que los recursos estuvieron en uso.

Con respecto al uso de los equipos, el tiempo de uso es similar, ambos con una media que ronda los 1,3 minutos, con la diferencia que en la parte b se registró que hubo más tiempo sin que ningún equipo estuviera en uso. Asimismo, con respecto al uso de mecánicos, el tiempo de uso en ambos casos también es muy similar, con una media que ronda los 3,8 minutos y varianza 0,35. Por lo que con estos histogramas no se puede apreciar diferencia entre ambas partes.

Para más comparaciones, se realizaron dos Histogramas TimeWeighted (“largoColaToRemove.txt” y “LargoColaToRepair.txt”) para registrar el largo de las colas de máquinas tanto para remover piezas como para reparar y dos Histogramas Observation (“HistogramaTiempoEsperaToRemove.txt” y “HistogramaTiempoEsperaToRepair.txt”) para registrar el tiempo de espera de las máquinas en las colas antes mencionadas. Analizando los Histogramas se puede observar que los relacionados a la cola para remover, son prácticamente iguales, lo cual tiene mucho sentido porque el tiempo de remover piezas es el mismo para ambos casos. Sin embargo, en los histogramas relacionados a la cola para reparar, se muestra una media de largo de cola y una media de tiempo de espera bastante superior, de un orden de diez veces mayor en la parte b con respecto a la parte a, lo cual puede ser consecuencia de que el máximo tiempo de reparación en la parte b es mayor al máximo tiempo de reparación en la parte a.

Además, como se puede ver en los Histogramas “Downtime.txt”, “HistogramaTiempoEsperaToRemove.txt” y “HistogramaTiempoEsperaToRepair.txt”, en la parte b se procesó una máquina más que en la parte a, lo cual puede decir que la parte b es ligeramente mejor que la parte a.

Este comportamiento es esperado, ya que a pesar de que la parte b tiene un mecánico más rápido, también tiene un mecánico igualmente más lento, lo cual hace que ambos modelos se comporten de forma muy similar. La leve superioridad del modelo de la parte b puede ser consecuencia de la prioridad que se les dio a los mecánicos en la implementación realizada, tomando primero al mecánico más rápido, si este no está disponible, a alguno de los mecánicos promedio y por último al mecánico más lento.

## Ejercicio 15

*Resolver el ejercicio 8.6.1 del libro del curso, solamente para el caso del hospital simple*

El método antitético se basa en las llamadas “variables antitéticas” y en la hipótesis de que si un torrente de números pseudoaleatorios produce resultados de valores altos, entonces el torrente opuesto producirá resultados bajos, y por lo tanto, se puede decir que estarían correlacionados negativamente. Si tenemos un torrente de números pseudoaleatorios ( $u_1, u_2, \dots, u_N$ ), entonces el torrente ( $1 - u_1, 1 - u_2, \dots, 1 - u_N$ ) también será pseudoaleatorio; ambos torrentes son muestras de lo que se denomina variables antitéticas.

La idea es utilizar dos torrentes de variables antitéticas para una determinada simulación y realizar  $N$  pares de corridas de dicha simulación con ambos torrentes esperando que el promedio de los resultados sea más cercano al valor esperado que el promedio de  $2N$  corridas utilizando torrentes de números independientes.

Esta estrategia es válida y funciona en modelos simples, pero cuando la tasa de entrada a una actividad depende de la salida de otra actividad, los resultados pueden ser adversos.

A continuación se muestran los resultados de la implementación de esta estrategia para el caso del Hospital Simple. Para las variables antitéticas se tomó el generador de números pseudoaleatorios MT19937 y una clase implementada por nosotros llamada ANTHITETICMT19937, que resta a 1 el número generado por MT19937 y lo devuelve, produciendo que éstos dos sean variables antitéticas. Se realizaron 30 corridas independientes utilizando el generador MT19937 y luego 15 pares como describe el método antitético. Los datos obtenidos fueron los siguientes:

- **Normal 30, iteraciones**

Media largo cola = 32,7112

Varianza largo cola = 68,2419

Media tiempo de espera = 180,852

Varianza tiempo espera = 2073,89

- **Método de reducción de varianza, 15 pares de iteraciones**

Media largo cola = 32,4222

Varianza largo cola MT19937 = 86,7867

Varianza largo cola ANTHITETICMT19937 = 74,4224

Covarianza largo cola = -59,2617

Cálculo de reducción de varianza = 0,402348

-----  
Media tiempo de espera = 182,672

Varianza tiempo de espera MT19937 = 2536

Varianza tiempo de espera ANTHITETICMT19937 = 1789,88

Covarianza tiempo de espera = -1492,22

Cálculo de reducción de varianza = 14,6556

Como se puede observar, con el método de reducción de varianza, ésta disminuye considerablemente tanto para el caso del largo de la cola como para el tiempo de espera. Esto se debe a que la covarianza en ambos casos dio negativa y como la nueva varianza se calcula en base a la ecuación:

$(V(X)+V(Y)+2COV(X,Y))/(N-1)$ , está claro que va a disminuir. Otro detalle que se puede apreciar, es que las medias en ambos casos son muy similares; la diferencia puede ser consecuencia de que, utilizando el método antitético, la media tiende a acercarse más al valor esperado real.

En conclusión, se puede decir que el sistema era lo suficientemente simple como para que, al aplicarle el método antitético, la reducción de varianza funcione correctamente y no genere efectos adversos.

## Ejercicio 16

*Diseñar e implementar una salida visual para el caso de estudio de transporte público.*

Luego de mucho pensar, se consideró que el siguiente diseño de interfaz es el más representativo como salida visual para el caso de estudio de transporte público:



Como cada parada tiene un número que la identifica, se decidió representarlas con dicho número (en color blanco) y posicionarlas en el mapa según las coordenadas dadas en el archivo paradas.txt (normalizadas para el correcto posicionamiento dentro del tamaño del display).

Luego, se buscó y seleccionó una imagen para la representación de los ómnibus, la cual se modificó de forma tal que se pudiera distinguir a que línea pertenece cada ómnibus. Para ello se designó un color a cada línea y se crearon 13 imágenes de ómnibus con distintos colores para realizar el display correspondiente. En la esquina superior derecha de la pantalla, se muestra una referencia indicando el ícono que representa a los ómnibus de cada línea, mostrando además el tamaño de la flota actual para cada una de ellas.

Por otra parte, para la representación de los pasajeros, no se decidió utilizar ninguna imagen, sino que como cada ómnibus tiene pasajeros dentro y cada parada tiene una cola de pasajeros, se representarán como un número asociado a cada ómnibus y a cada parada. Para los ómnibus, el ícono tendrá un número dentro que indicará cuántos pasajeros se encuentran dentro del mismo; y en la esquina superior izquierda, se muestra para cada parada, la cantidad de pasajeros que están esperando en su cola.

En el correr de la simulación, se muestra como los ómnibus se crean en la primera parada de su recorrido, y se van moviendo en el tiempo correspondiente a cada parada de su recorrido; mientras al mismo tiempo, el número asociado a ellos va cambiando a medida que suben y bajan pasajeros. Por otro lado, en la esquina superior izquierda se muestran cómo evoluciona la cantidad de pasajeros en cada parada; y en la esquina superior derecha se muestra cómo, a medida que la frecuencia lo requiera, va aumentando la flota de ómnibus de cada línea.

#### NOTA:

Para la realización de esta interfaz, se tuvo que modificar la librería eosim en 2 instancias. La primera fue que, por cómo estaba implementada, las imágenes siempre estaban en una capa superior que el texto, por lo que no podíamos mostrar la cantidad de pasajeros en cada ómnibus. La solución encontrada fue modificar la función display para el TextSprite para que acepte un “z-index”. Dicho z-index puede valer 1 o 0, si vale 1, el texto queda en una capa superior que las imágenes, en caso de valer 0, el texto queda en una capa inferior.

La segunda modificación fue el color del texto, para lo cual se “re-utilizó” la variable z-index; en caso de valer 1, el color del texto será de color negro y en caso de ser 0, de color blanco.

## Ejercicio 17

*Implementar el método thinning para describir la variación de la demanda según el tiempo en el caso de estudio de transporte público. En las 16 horas de simulación, utilizar los datos de demanda del archivo matrizOD\_hp1.txt durante las horas 2 y 3, el archivo matrizOD\_hp2.txt durante las horas 11 y 12 y el archivo matrizOD.txt en las restantes horas.*

El método de thinning es un método que ayuda a realizar modelos más realistas, resolviendo el problema de que en los sistemas que describen el comportamiento humano, tienen períodos de tiempo activo o de baja actividad que varían cíclicamente. La implementación se encuentra en la carpeta Ej\_17 en el proyecto llamado Ejercicio 17.

Para su implementación, se realizó una función “fun”, que es la función continua a trozos, que recibe 3 valores de media y un tiempo de simulación y realiza los cálculos correspondientes para encontrar el valor con el cual comparar con el número sorteado (con una distribución uniforme) entre 0 y 1.

Vale aclarar que la realización de la poda es cuando el número uniforme sorteado es estrictamente mayor al número que devuelve la función “fun”. Además, si el tiempo sobre el cual se quiere calcular “fun” es mayor al tiempo de simulación (960), la función de thinning acepta directamente el valor, ya que si el tiempo es mayor a 960, el evento agendado no se ejecutará en la simulación.

El análisis de resultados se realiza en el Ejercicio 18.

## Ejercicio 18

*En base a la simulación construida en el Ejercicio 13 y a las mejoras incorporadas en los Ejercicios 16 y 17, construir una tercera versión de la simulación del sistema de transporte público.*

### Objetivos

Estudiar el impacto de modificaciones de las frecuencias en los tiempos de espera de los pasajeros y en el tamaño de la flota requerida (la cantidad de ómnibus operando en forma simultánea en el sistema).

### Hipotesis de Trabajo

1. Cada línea utiliza la cantidad de ómnibus que sea necesaria para realizar los recorridos con la frecuencia establecida.
2. Un mismo ómnibus está siempre asignado a la misma línea.
3. Para líneas con recorridos de ida y vuelta, un ómnibus realiza estos dos recorridos sin ninguna pausa entre ellos y al regresar al punto de partida espera la hora de la próxima salida, de acuerdo a la frecuencia de la línea.
4. Para líneas con recorridos circulares, existe una parada inicial, que cumple el rol de la primera parada del recorrido de ida, a los efectos de las esperas para la próxima salida.
5. Un pasajero esperando en una parada sube al primer ómnibus que pasa por la misma, cuyo recorrido incluye a su parada destino, en la sección que resta por recorrer.
6. En recorridos circulares, los pasajeros pueden bajarse en cualquier parada luego de subirse al bus
7. Los ómnibus no se rompen.
8. Los ómnibus no se quedan sin combustible.
9. El costo de ir de una parada a otra se describe mediante una Distribución Normal con media definida para cada paradas[i][j].
10. La frecuencia no se ve afectada por ninguna variable.
11. La subida y bajada de pasajeros consume 0 unidades de tiempo.
12. Los arribos de los pasajeros se describen mediante una Distribucion Exponencial Negativa con Lambda definido para cada [origen][desitno].
13. Los costos para ir de una parada i a una parada j se describen mediante una Distribución Normal, con una media y una desviación estándar dada para cada recorrido i-j

### Variables de Decision

Frecuencia de salida de los Ómnibus.

### Respuestas

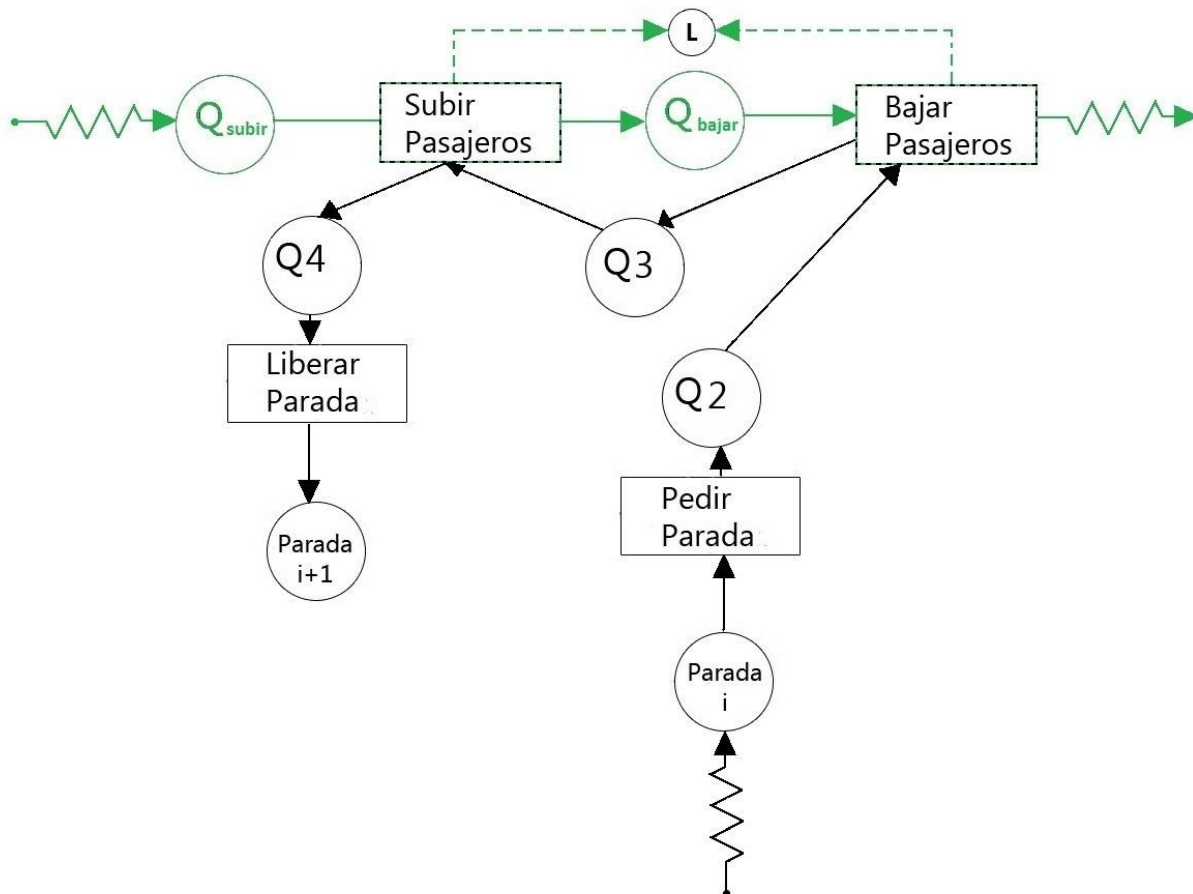
Tiempo de espera de pasajeros y tamaño de flota requerida para cada línea, dado un conjunto de frecuencias. Además, se proporciona una interfaz gráfica donde se muestra la evolución del sistema a lo largo de la simulación.

### Duraciones de actividades

Los valores de duración de las actividades están descritos en minutos.

- Los arribos de los pasajeros se describen, para un pasajero con parada de origen  $i$  y parada de destino  $j$ , mediante una Distribucion Exponencial Negativa. Para realizar un modelado más realista, se implementó el método de thinning de forma tal que en las 16 horas de simulación, se utilizan los datos de demanda del archivo matrizOD\_hp1.txt durante las horas 2 y 3, los datos del archivo matrizOD\_hp2.txt, durante las horas 11 y 12 y los datos del archivo matrizOD.txt en las restantes horas.
- Los costos para ir de una parada  $i$  a una parada  $j$  se describen mediante una Distribución Normal (costoo) , con una media igual al valor  $i-j$  del archivo conexiones.txt (en metros) y una desviación estándar de  $\text{media}/5$ . Por lo que la duración corresponde a  $(\text{costo} / 13000) * 60$
- El tiempo entre la salida de un ómnibus de una línea y la siguiente salida de un ómnibus de la misma línea es  $1/\text{frecuenciaLinea}$ , donde frecuenciaLinea es la frecuencia obtenida del archivo recorridos.txt para la línea correspondiente.

## Diagramas de actividades



### **A. Implementar un programa que ejecute lo especificado.**

Se actualizó la implementación del Sistema de transporte público entregada en el laboratorio anterior, agregando las modificaciones hechas en el ejercicio 17 (que inculye las modificaciones pedidas en el ejercicio 16) y realizando las correcciones especificadas en la devolución de la entrega anterior. Además, para facilitar el análisis de datos, se creó un archivo llamado "Datos.txt" con la información necesaria que contiene la media de la cantidad de flota, su desviación e intervalo de confianza y la media de tiempo de espera global de los pasajeros, también con su desviación estándar e intervalo de confianza.

### **B. Analizar los resultados a partir de varias replicaciones. Discutir según las hipótesis realizadas en la especificación.**

Se realizaron 5 ejecuciones independientes, de las cuales se recuperaron los datos observados en los archivos "LogCasoDeEstudioX.txt", "TiempoEsperaGlobalX.txt" (siendo X el número de ejecución) y "Datos.txt" para su posterior análisis.

Según lo obtenido, la media de los tiempos de espera global es de 14.2243 con una desviación estándar de un 1%, que comparándolos con los datos obtenidos en el ejercicio 13 donde existía un tiempo de espera medio de 12.8841 con una desviación estándar también rondando en 1%, se ve que el tiempo del modelo más realista es ligeramente superior (aproximadamente 1 minuto mayor). Al igual que en el otro modelo, este tiempo no es para nada malo, considerando la frecuencia de los ómnibus, aunque implica que el modelo más realista, con la misma cantidad de ómnibus, puede llegar a tener más problemas. El tamaño medio de la flota es de 34,8 ómnibus con una desviación de 0.447227 (el cual permanece invariante con respecto al ejercicio 13 ya que no se modificaron las frecuencias y la distribución normal utilizada para los costos entre las paradas es la misma), lo cual, al igual que se comentó en el otro modelo, no es un tamaño para nada abultado considerando la cantidad de paradas y la distribución de estas.

Sabiendo el problema encontrado anteriormente, se pasó a realizar un análisis un poco más profundo y detallado, y a pesar de que la mayoría de los pasajeros tienen un tiempo de espera aceptable (menor a 60 minutos), observando los resultados obtenidos para cada ejecución, se reveló que los tiempos de espera máximos para cada ejecución fueron de 109.824, 112.691, 137.27, 124.216 y 115.384, lo cual tiene una media de 119,877 y una desviación estándar de 22,231, e implica un grave problema en el sistema de transporte modelado, ya que el tiempo de espera de 137 minutos implica que por lo menos pasaron 2 ómnibus llenos por la parada de ese pasajero.

Para buscar soluciones al problema, se hicieron pruebas modificando las frecuencias de las líneas 10 y 12, ya que la línea 10 es la única que tiene a las paradas más congestionadas en su viaje de ida y la línea 12 que tiene un recorrido circular con ambas paradas al comienzo de su recorrido, para intentar reducir los tiempos de espera máximo. Realizando las ejecuciones, se observó que el tamaño de la flota aumentó a una media de 37 con una desviación estándar de 1.36479e-05 y los tiempos de espera máximos disminuyeron a una media de 116 y una desviación estándar de 13,4. Además la media de Tiempo de Espera global bajó a 13.2991 con una desviación estándar de 0.1. A pesar de que la solución encontrada mejoró ligeramente el problema, habría que analizar con más detalle los archivos matrizOD donde se encuentran las frecuencias de arribo de los pasajeros según parada de origen y parada destino por que quizás sería más productivo modificar algún recorrido, o agregar nuevas líneas para intentar mejorar el TiempoEsperaGlobal sin aumentar mucho los costos.