

Software educativo para la enseñanza de los sistemas de colas: resultados de una innovación docente.

José María del Castillo Granados

**Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos, 41092 Sevilla**
delcastillo@us.es

RESUMEN

Los sistemas de colas aparecen en numerosas situaciones del ámbito tecnológico. En los planes de estudio de Ingeniero Industrial e Ingeniero Aeronáutico, la materia de Análisis de Colas está incluida en los programas de las asignaturas de Ingeniería del Transporte y Explotación del Transporte Aéreo. El autor ha desarrollado un conjunto de programas que permite simular el comportamiento de sistemas de colas y representan gráficamente la evolución de las variables que describen el comportamiento del sistema. El simulador permite cambiar las condiciones que definen el proceso de llegadas de clientes y el tiempo de servicio. Se emplea en clase como herramienta de ayuda a la docencia. En concreto, los resultados de la simulación se comparan con los del modelo simplificado en el que se supone que las llegadas de clientes y el servicio suceden de manera determinista. La experiencia acumulada con el uso del simulador en los últimos siete cursos, permite afirmar que el empleo del mismo es de gran utilidad para la docencia de la materia. El alumno puede comparar visualmente los resultados de la simulación con la aproximación teórica cuyos fundamentos se enseñan previamente en clase.

INTRODUCCION

La materia que se puede encuadrar bajo la denominación de “Análisis de Colas” es objeto de estudio en numerosas asignaturas de diversas titulaciones del campo de las Ingenierías y de las Ciencias. En concreto, esta materia está incluida en los programas de las asignaturas de Ingeniería del Transporte de la titulación de Ingeniero Industrial y de Explotación del Transporte Aéreo de la titulación de Ingeniero Aeronáutico. La importancia de la correcta adquisición de conocimientos sobre esta materia por parte del alumno radica en la diversidad de aplicaciones posibles de la misma. La necesidad de que los estudiantes de Ingeniería cuenten con una formación sólida en Sistemas de Colas ha sido puesta de manifiesto desde hace tiempo (Ramalhoto, (1990)). Por otra parte, diversos trabajos (Fang y Pines (2007), De Giusti et al. (2008)) ponen de manifiesto la gran utilidad pedagógica que tiene la simulación en la enseñanza de materias cuyos contenidos son susceptibles de ser impartidos al menos parcialmente mediante el empleo de software de simulación. Un caso en el que la simulación es una herramienta pedagógica de gran utilidad es en general el análisis de sistemas cuya evolución esta regida por una sucesión de eventos, tal como ocurre en los sistemas de colas. Finalmente, la simulación puede ser integrada en un marco pedagógico más amplio que abarque la realización de un caso práctico sobre gestión de un sistema de colas. Un ejemplo de este uso de la simulación integrada dentro de un caso práctico de proceso de fabricación se detalla en Petty et al. (2001).

Numerosos sistemas en las más variadas áreas tecnológicas, constan de un flujo o un conjunto de flujos de un determinado producto tangible o intangible que circula a través de una serie de estaciones o servidores que componen el sistema. Los productos que circulan por el sistema sufren una serie de transformaciones o procesos en cada uno de los servidores estaciones. Por ejemplo, los clientes pueden ser personas que esperan en una cola de un establecimiento, vehículos que llegan a un cruce, aviones que desean aterrizar en un aeropuerto, piezas en un proceso de fabricación que han de pasar por una etapa del mismo, personas que llaman a un servicio de emergencia, paquetes de información que se transmiten por una red informática, etc. En cada uno de estos casos el servidor sería el establecimiento, el cruce, el control del aeropuerto, la máquina que procesa las piezas, el servicio de emergencia y el ordenador de la red en cuestión. Por otra parte, la cola no tiene que ser necesariamente una línea física formada por los clientes, sino una cola tan solo a efectos de espera.

El sistema más simple que cabe concebir consta de un servidor o etapa. La figura 1 muestra el esquema de dicho sistema y las partes que lo constituyen. El paso de cualquier cliente a través dicho sistema queda plenamente descrito si se conocen los siguientes tres instantes de tiempo:

1. el instante de tiempo en el que el cliente llega al sistema
2. el instante de tiempo en el que el cliente comienza a ser servido
3. el instante de tiempo en el que el cliente abandona el sistema.

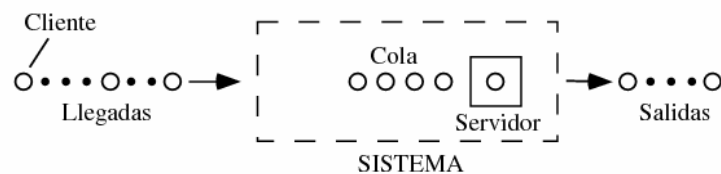


Figura 1: esquema de un sistema de un solo servidor.

Uno de los pasos más importantes a la hora de describir y modelar un sistema de colas es la transposición de la caracterización genérica de un sistema, descrito esquemáticamente en la figura 1, al caso real. Así por ejemplo, en el contexto del transporte aéreo existen dos situaciones de especial importancia en las que se producen fenómenos de colas. Una de ellas es el proceso de facturación del equipaje y la otra es el proceso constituido por las operaciones e aterrizaje y despegue de las aeronaves. En el caso de la facturación, la cola se forma ante los mostradores de facturación que serían los servidores. En general, al alumno no le resulta complicado transponer el esquema genérico de un sistema para el caso de los mostradores de facturación. En otras palabras, el alumno identifica claramente la cola de clientes ante el mostrador de facturación y el servidor, el empleado que factura el equipaje.

En el caso de las operaciones de aterrizaje y despegue, la identificación de las distintas partes del sistema ya no es tan directa y debe ser concretada y por ello explicada debidamente. Obviamente, en este caso, los clientes serían las aeronaves que desean aterrizar o despegar. En el primero de los casos, la entrada en el sistema de una aeronave que deseara aterrizar se produciría cuando pasa a estar bajo el control del aeropuerto y la salida del sistema se produciría cuando ha dejado libre la pista para la próxima operación. El servicio que el servidor da a la aeronave sería el constituido por el aterrizaje propiamente dicho. Por ejemplo, podría adoptarse como instante de tiempo en

el que la aeronave comienza a ser “servida” como el instante en el que ésta sobrevuela la radiobaliza exterior. La cola de aeronaves en espera de aterrizar estaría formada por las aeronaves que se encuentran volando en los diferentes circuitos de espera que tenga establecido el aeropuerto. La figura 2 muestra esquemáticamente el sistema y sus partes, así como la correspondencia entre éstas y las del sistema genérico.

El objetivo de la enseñanza de la materia de colas es lograr la comprensión por parte del alumno de los conceptos anteriormente descritos y dotarle a éste de las técnicas y métodos necesarios para describir la evolución del sistema. Este viene caracterizado por un conjunto de variables que son en principio:

1. el número de clientes en el sistema
2. el número de clientes en la cola
3. el tiempo de permanencia de cada cliente en el sistema
4. el tiempo de espera de cada cliente en la cola

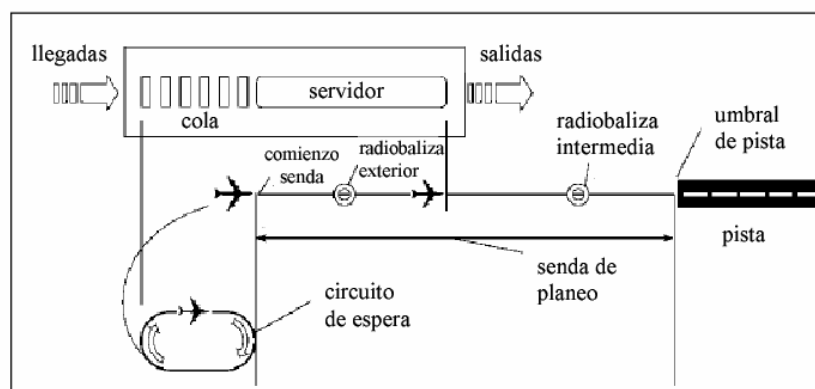


Figura 2: sistema formado por la pista y las aeronaves que desean aterrizar.

ENFOQUE ADOPTADO

El caso más sencillo que se presenta es aquel en el que el sistema se encuentra en estado estacionario, por lo que los valores medios de ninguna de las variables descriptivas depende del tiempo ni del cliente considerado. Para este tipo de situaciones la “Teoría de Colas” proporciona un cuerpo de conocimiento muy completo que permite describir una gran cantidad de sistemas. El libro de Gross y otros (2008) puede servir de texto de referencia para Teoría de Colas. Desafortunadamente, en numerosos casos reales, el sistema no se encuentra en estado estacionario por lo que una descripción del mismo empleando los resultados estacionarios es completamente incorrecta y puede dar lugar a graves errores.

En general una fuente muy importante de falta de estacionariedad es la debida al proceso de llegadas de clientes al sistema. Este, en general, es no estacionario ya que la intensidad de las llegadas depende fuertemente del instante de tiempo considerado. Por ejemplo, en el caso de aterrizajes de aeronaves, la intensidad de llegadas es muy baja al comienzo del día y sube fuertemente a partir de las 8:00 para alcanzar su máximo valor durante la mañana y parte de la tarde. Por ello, es un error grave emplear los resultados de la Teoría de Colas para casos de sistemas claramente no estacionarios. Además, es importante que el alumno aprenda a distinguir las situaciones reales que no pueden ser consideradas como estacionarias.

En el caso no estacionario un enfoque posible pasa por describir la evolución del sistema mediante la obtención del número de clientes que desde un instante de tiempo inicial hasta el instante de tiempo en consideración han llegado al sistema. Esta curva se denomina “curva de llegadas acumuladas” y se representa por $A(t)$. Por ello $A(t)$ es el número de clientes que han llegado al sistema desde el instante inicial hasta el instante t . Similarmente, se puede definir la “curva de salidas acumuladas” $D(t)$ por el número de clientes que han abandonado el sistema desde el instante inicial hasta t . Finalmente, se puede definir la “curva de salidas acumuladas de la cola” $D_q(t)$ por el número de clientes que han abandonado la cola desde el instante inicial hasta t . La figura 3 muestra un ejemplo de curva de llegadas acumuladas junto con la curva media de llegadas acumuladas que se obtendría promediando un número muy elevado de realizaciones concretas.

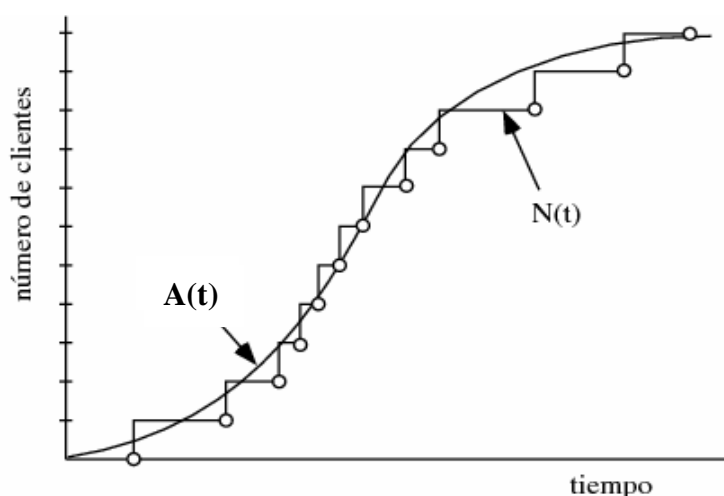


Figura 3: ejemplo de curvas de llegadas acumuladas $N(t)$ y media $A(t)$.

El enfoque de las curvas acumuladas es el adoptado en Hall (1997) para el análisis de las colas que aparecen en numerosas situaciones de interés en el mundo de la Ingeniería. Igualmente, en Horonjeff y McKelvey (2009) se emplea este enfoque para las colas que aparecen en las operaciones de aterrizaje y despegue. Finalmente Daganzo (1997) hace uso del enfoque en curvas acumuladas para analizar la evolución del tráfico de vehículos en determinadas situaciones. Los libros anteriormente citados son los textos de referencia que emplea el autor para la docencia de Ingeniería del Transporte y de Explotación del Transporte Aéreo. De todos ellos es especialmente destacable el texto de Hall ya que gran parte de mismo está dedicado a la aproximación resultante de despreciar la aleatoriedad en las llegadas de los clientes y en la distribución del tiempo de servicio. Esta aproximación se conoce como “aproximación determinista” y permite resolver numerosos problemas de gestión de colas. La aproximación determinista es especialmente útil para el Ingeniero debido al buen equilibrio que proporciona entre complejidad matemática contenida y efectividad en la resolución de los problemas planteados.

Por las razones anteriores, el enfoque adoptado para la docencia de la materia de “Análisis de colas” ha sido el de las curvas acumuladas. En particular, el tratamiento analítico de los problemas mediante la aproximación determinista es posible hasta cierto punto. Cuando la aleatoriedad no puede ser despreciada, es necesario recurrir a la simulación para obtener resultados fiables. El software desarrollado para la docencia de

esta materia tiene como objetivo facilitar el aprendizaje de los conceptos que se introducen y permitir que el alumno pueda comparar los resultados de la simulación con los resultantes de despreciar la aleatoriedad.

APLICACIONES DOCENTES EXISTENTES

Existe un conjunto relativamente amplio de software con fines docentes destinado a la enseñanza de la materia de sistema de colas. No obstante, la mayoría de aplicaciones desarrolladas solo tocan contenidos de la Teoría de Colas por lo que su aplicación solo tiene sentido para aquellos casos en los que el sistema se encuentra en estado estacionario. En general, las salidas de estas aplicaciones son cantidades medias como el número medio de clientes en el sistema y tiempo medio de permanencia en el sistema. Igualmente, en aquellos casos en los que la expresión analítica está disponible, proporcionan los valores de la distribución de probabilidad del número de clientes en el sistema. Este tipo de aplicaciones son las desarrolladas por García Linares (2008) y Vega J. L. (2004). En realidad, estas aplicaciones se pueden definir encuadrar mejor dentro de la categoría de “formularios” más que como software de simulación para apoyo a la docencia.

Dentro de la categoría de simuladores de colas con fines docentes cabe destacar las aplicaciones desarrolladas por Ingolfsson y Grossman (2002), García y Mollá (2003), Ortega y García (2005) y Dobson y Shumsky (2006). De los anteriores desarrolla es JESK, el software desarrollado por García y Mollá es de espectro más amplio. En realidad JDESK es un paquete de simulación de sistemas que puede ser empleado para fines docentes por el profesor y los estudiantes en su modo de empleo más sencillo. No obstante, debido a la potencia desplegada por JDESK, este programa excede con mucho tanto la capacidad requerida para la docencia como la complejidad deseable. Desarrollos mucho más modestos y con fines exclusivamente docentes son los otros tres citados anteriormente. En concreto, Dobson y Shumsky han desarrollado un applet que permite la simulación de una cola con un servidor en la que el tiempo de servicio y el intervalo entre llegadas siguen una distribución gamma. El applet visualiza las llegadas y salidas de los clientes mediante figuras humanas en movimiento. El resultado de la simulación es el tiempo de espera que se representa gráficamente.

En una línea parecida se encuentra el software desarrollado por Ortega y García (2005). Este está orientado a la realización de videos en los que se visualiza el flujo de piezas en procesos de producción y fabricación y se aplica en la enseñanza de colas en este tipo de procesos. El software desarrollado por Ingolfsson y Grossman (2002) en Excel es el más parecido al que se presente en este trabajo, no obstante el tiempo entre llegadas y tiempo de servicio siguen una distribución estacionaria. Desde el punto de vista de su uso en docencia, el rasgo más interesante es la visualización de las llegadas y salidas de los clientes en forma acumulativa como gráfico de barras. Además, se permiten uno o varios servidores y se representa el estado de éstos. Sin embargo, la simulación es única, o sea, solo se genera una realización por lo que no es posible promediar varias realizaciones para obtener las medias. Por ello, no puede ser empleado para enseñar la aproximación determinista de una cola no estacionaria, que es uno de los principales objetivos perseguidos por el software desarrollado por el autor.

SOFTWARE DESARROLLADO Y METODO DE SIMULACION

Oke (2004) ha demostrado la utilidad del uso de la hoja de cálculo para diversas aplicaciones docentes en Ingeniería. Más concretamente, Court (2004) emplea macros de Excel para simular colas como ayuda a la docencia de esta materia. Aunque el empleo de Excel está bastante extendido entre los estudiantes de Ingeniería y en la práctica profesional, el autor considera que un lenguaje de programación como Matlab ofrece una flexibilidad mucho mayor a la hora de simular un sistema de colas y en general para cualquier aplicación que requiera una labor compleja de cálculo numérico y/o de tratamiento de estructuras de datos. Además, el autor considera que el empleo de Matlab por los alumnos de los últimos cursos de las diversas titulaciones de Ingeniería, puede contribuir a que se extienda su empleo en el ámbito de las empresas de Ingeniería. Actualmente, su empleo en el mundo profesional es relativamente limitado, lo que se traduce en numerosos casos en pérdida de productividad y de potencia de cálculo para resolver problemas. Por ello, los programas han sido desarrollados en Matlab.

Se han desarrollado tres programas que permiten simular tanto el proceso de llegadas de los clientes como la evolución de la cola. Los programas tienen el formato de función de Matlab, lo que puede permitir su empleo como componentes de un simulador de mayor alcance. En primer lugar la función *simullega* genera los instantes de tiempo en los que se produce la llegada de los clientes al sistema. Dichos instantes de tiempo reproducen una realización de un proceso de Poisson de intensidad constante sobre un cierto periodo de tiempo. En consecuencia, el input de la función son dos vectores. Uno de ellos da el conjunto de intensidades del proceso y el otro especifica la duración del periodo en el que la intensidad es la dada por cada uno de los elementos del primer vector. El método de generación de los instantes de llegada se basa en el hecho de que el intervalo temporal entre llegadas sigue una distribución exponencial. Por ello, la función puede ser fácilmente extendida para generar llegadas distribuidas de acuerdo con otra distribución.

La segunda función desarrollada es *simucola* y permite la simulación de una cola de un servidor en la que la disciplina de servicio es FCFS, o sea, los clientes son servidos en el mismo orden en el que han llegado al sistema. Bajo esta disciplina, resulta sencillo la obtención de los instantes de salida de la cola de los clientes. Para ello es necesaria la generación previa de los instantes de llegada al sistema y del tiempo que cada cliente tarda en ser servido. Este tiempo puede no ser constante sino seguir una determinada distribución. La función además permite la opción de considerar que el servidor permanece inactivo durante una serie de periodos de tiempo especificados por el usuario. Esta opción es muy importante ya que en numerosos casos el servidor se comporta de esa manera.

Finalmente, la tercera función desarrollada *simucolavs* es una generalización de la anterior para el caso en el que el sistema consta de varios servidores. El paso de un servidor a varios, no es trivial ya que si el tiempo de servicio es aleatoria puede ocurrir que haya clientes que habiendo llegado antes al sistema, lo abandonen más tarde. Los detalles técnicos sobre el algoritmo de simulación se pueden consultar en Del Castillo (2008).

Las tres funciones anteriormente descritas vuelcan los resultados de la simulación de modo gráfico, para que sean más fácilmente interpretables por el alumno. La salida

gráfica consta de dos figuras. En una de ella se representan las curvas de llegada y de salida del sistema y en la otra se representa la evolución del número de clientes en el sistema en función del tiempo. En el caso de *simucolavs* se representa adicionalmente el número de servidores ocupados en función del tiempo. Sobre la representación gráfica de las curvas de salida y llegada al sistema, se superpone la curva de salida resultante de aplicar la aproximación determinista. Esta salida gráfica adicional es especialmente importante para que el alumno capte la influencia de la aleatoriedad en la evolución del sistema y compare la calidad de la aproximación determinista frente a posibles desviaciones más o menos importantes respecto de la media. Finalmente, en el uso de las funciones se especifica como input el número de realizaciones a simular y para cada una de ellas se generan las curvas de llegada y salida del sistema. Esto permite que el alumno entienda que la aleatoriedad es decisiva y que puede dar lugar a evoluciones considerablemente dispares unas de otras.

EMPLEO DEL SOFTWARE

Las funciones desarrolladas son empleadas en las clases en las que se expone el tema de simulación y posteriormente son usadas por los alumnos para la realización de un trabajo individual. El tema de simulación de colas se imparte en la asignatura de Ingeniería del Transporte y en la asignatura de Explotación del Transporte Aéreo. Este tema consta de tres secciones que son:

1. Simulación de un proceso de Poisson
2. Simulación de una cola con un servidor
3. Simulación de una cola con varios servidores

El tiempo empleado en el tema es de unas 3 horas. La exposición de cada una de las secciones consta de una parte descriptiva de los objetivos y métodos empleados y de una segunda parte en la que se emplean las funciones de Matlab anteriormente descritas para ejecutar un ejemplo que ilustra la materia explicada previamente. En concreto, se propone un ejemplo de sistema con un solo servidor en el que las llegadas siguen proceso de Poisson cuya intensidad $\lambda(t)$ viene dada por:

$$\lambda(t) = \begin{cases} 10, & \text{si } 0 \leq t \leq 3 \\ 30, & \text{si } 3 < t \leq 5 \\ 5, & \text{si } 5 < t \leq 9 \end{cases}$$

y en el que el tiempo de servicio a los clientes sigue una distribución exponencial cuya media es el inverso de la intensidad $\mu(t)$ que también depende del tiempo de este modo:

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq t \leq 1.5 \\ 40, & \text{si } 1.5 < t \leq 3 \\ 0, & \text{si } 3 < t \leq 4.5 \\ 40, & \text{si } 4.5 < t \leq 6 \\ 0, & \text{si } 6 < t \leq 7.5 \\ 40, & \text{si } 7.5 < t \leq 9 \end{cases}$$

La figura 4 muestra dos realizaciones particulares de la evolución del sistema. En concreto, se muestra las dos curvas de llegas de clientes al sistema, $A_1(t)$ y $A_2(t)$ y las dos curvas correspondientes de salida de sistema: $D_1(t)$ y $D_2(t)$. Adicionalmente, en la figura 4 se han representado la curva media de llegadas $\Lambda(t)$ y la curva media de salidas

que se obtendría si la intensidad de llegadas de clientes al sistema superara en cualquier instante a la intensidad de servicio $\mu(t)$. En este supuesto, la curva media de salidas acumuladas del sistema sería $\int_0^t \mu(\tau) d\tau$. En la figura 5 se ha representado el número de clientes en la cola para diversas realizaciones y la media resultante de la aproximación determinista.

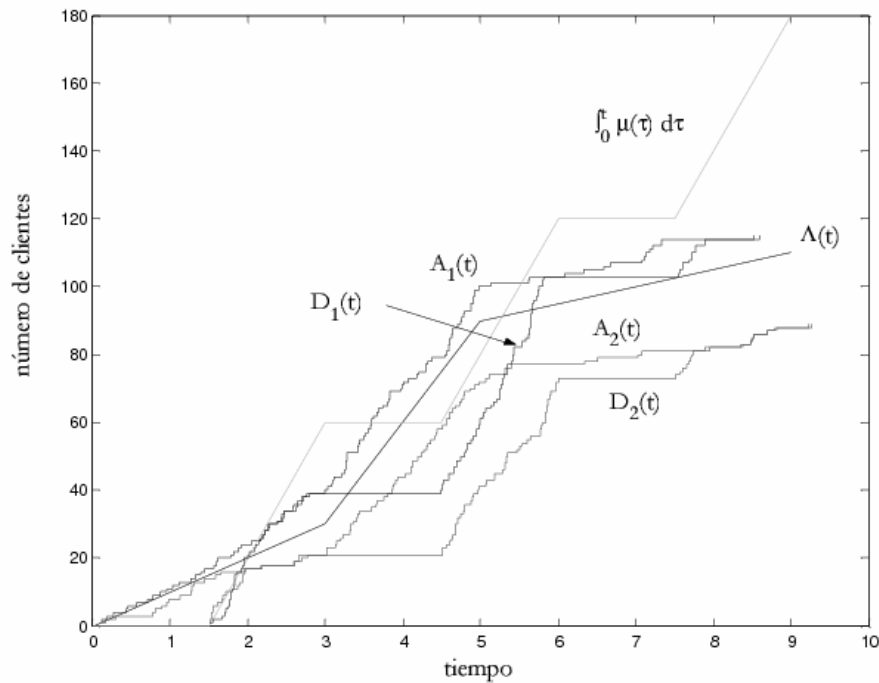


Figura 4: salida de resultados de la simulación de la cola con un servidor.

En realidad, las clases se imparten con la ayuda de un ordenador en el que se realizan las simulaciones una vez que el contenido de la sección correspondiente ha sido explicado. En concreto, tanto para la cola de un servidor como para la de varios servidores, se realizan al menos dos simulaciones cada una de ellas con varias realizaciones de la cola. De este modo, el alumno puede visualizar mejor el efecto de la aleatoriedad de las llegadas y del tiempo de servicio.

Una vez que el tema de simulación se ha expuesto, se propone la realización de un trabajo a cada alumno. El trabajo debe realizarse en horario no lectivo y tiene carácter individual. Para ello el alumno debe emplear las funciones *simucola* y *simucolavs*. Para el trabajo el alumno debe simular un sistema en el que se conoce la intensidad de las llegadas y varios escenarios posibles para la intensidad de servicio y número de servidores. El alumno debe obtener mediante simulación la curva media de salidas del sistema y compararla con la curva media que proporciona la aproximación determinista. Igualmente debe obtener el percentil del 90% del número de clientes en el sistema. De esta manera, la distribución del número de clientes en el sistema es descrita por dos parámetros, la media y dicho percentil. Esta descripción sintética tiene como objetivo que el alumno perciba correctamente el grado de incertidumbre que la aleatoriedad impone en la evolución del sistema. Además, se trata de una descripción muy apropiada para un estudiante de Ingeniería y futuro ingeniero ya que por un lado da la media y por otro lado da una cantidad lo suficientemente elevada como para que tan solo en un 10% de las ocasiones se supere dicha cantidad. Por ello, se le explica al alumno que el percentil del 90% puede ser empleado como variable de diseño para dimensionar el

espacio físico del sistema en el que los clientes tienen que esperar a ser servidos, si dicho espacio físico realmente existe.

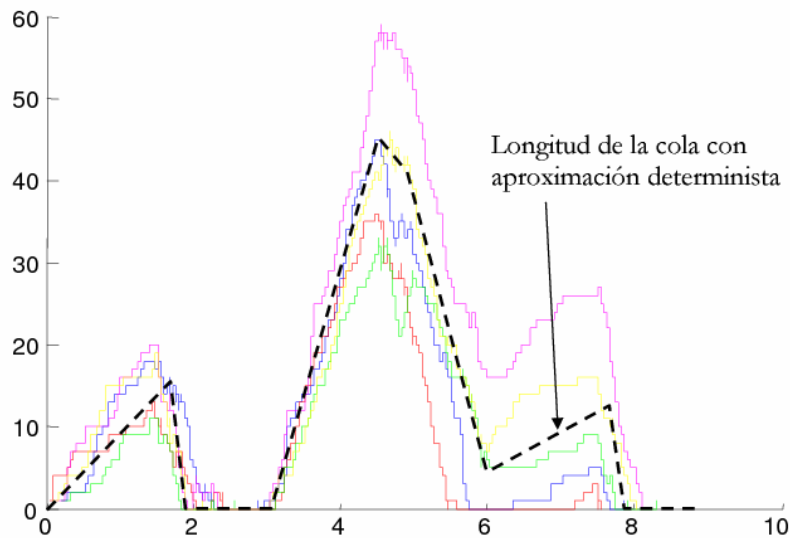


Figura 5: longitud de la cola para diversas realizaciones de la simulación.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación pedagógica que permite la simulación de un sistema de colas de uno o varios servidores bajo la disciplina de servicio FCFS (el primero que llega es el primero en ser servido). Dos son las principales diferencias que presenta la aplicación desarrollada respecto de otras anteriores. En primer lugar se pueden simular situaciones no estacionarias, o sea, situaciones en las que tanto la intensidad de las llegadas como la intensidad de servicio varíen con el tiempo, pudiendo incluso tomar el valor de cero. En segundo lugar, resulta posible simular varias realizaciones y visualizar el resultado de las mismas en forma de curvas de llegadas y salidas acumuladas. Esta posibilidad permite comparar cualitativamente de manera visual los resultados de la simulación en el resultado de la aproximación determinista. Esta posibilidad es de especial relevancia a la hora de introducir la aproximación determinista a los alumnos y de posteriormente explicar el efecto de la aleatoriedad en la evolución del sistema.

Se he descrito el empleo conjunto de los programas desarrollados con la exposición de los contenidos en los que se basan. Los programas se emplean no solo como medio de visualización de la evolución de la cola sino también como muestra concreta de la implementación informática del método de simulación enseñado en clase. Por todo ello, los programas desarrollados y su empleo conjunto con la exposición de contenidos en clase, suponen una innovación docente que ayuda a los alumnos en la adquisición y comprensión de la naturaleza de un sistema de colas.

REFERENCIAS

Court M. C. (2004) The Impact of Using Excel Macros for Teaching Simulation Input and Output Analysis. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 20, 966-973.

Daganzo C. F. (1997) *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*, Pergamon.

De Giusti M. R., Lira A. J., Villarreal G. L. (2008) Simulation framework for teaching in modeling and simulation areas. *European Journal of Engineering Education*, Vol. 33, 587-596.

Del Castillo J. M. (2008) *Análisis de colas*. Monografía editada por el autor.

Dobson G., Shumsky R. (2006) Web-based Simulations for Teaching Queueing, Little's Law, and Inventory Management. *INFORMS Transactions on Education*, Vol. 7., 106-123.

Fang F. C., Pines D. (2007) Enhancing Transportation Engineering Education with Computer Simulation. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 23, 800-815.

García Linares E. (2008) *Diseño de una página web sobre teoría de colas*. Proyecto de Fin de Carrera, Dpto. de Matemática Aplicada IV, Universidad Politécnica de Cataluña.

García I., Mollá R. (2003) *JDESK: Simulador de eventos Discreto Basado en Web*. IX Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática, Cádiz.

Gross D., Shortle J. F., Thompson J. M., Harris C. M. (2008) *Fundamentals of Queueing Theory*, 4ª edición, Wiley.

Hall R. W (1997). *Queueing Methods for Services and Manufacturing*, Prentice Hall.

Horonjeff R., McKelvey F. X. (2009) *Planning and design of airports*, McGraw-Hill.

Ingolfsson A., Grossman T. A. (2002) Graphical Spreadsheet Simulation of Queues. *INFORMS Transactions on Education*, Vol. 2, 27-39.

Oke S. A. (2004) Spreadsheet Applications in Engineering Education: A Review. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 20, 893-901.

Ortega M., García A.. (2005) Video Edition With Witness: A Tool For Teaching. *ITHET 6th Annual International Conference*, contribution S3C-22.

Petty D. J., Hooker S. J., Barber K. D. (2001) The Federal-Mogul Business Game: The Development and Application of an Educational Aid for Planning and Control. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 17, 546-557.

Ramalhoto M. F. (1990) Queueing Theory. *European Journal of Engineering Education*, Vol. 15, 233-241.

Vega J. L. (2004) *Diseño e implementación de una herramienta para la enseñanza y aprendizaje de la teoría de colas*. Proyecto de Fin de Carrera, Dpto. de Matemáticas, Universidad de A Coruña.