

Simulación Aplicada a la Logística

Lectura Nr. 4 Teoría de Colas

Profesor:

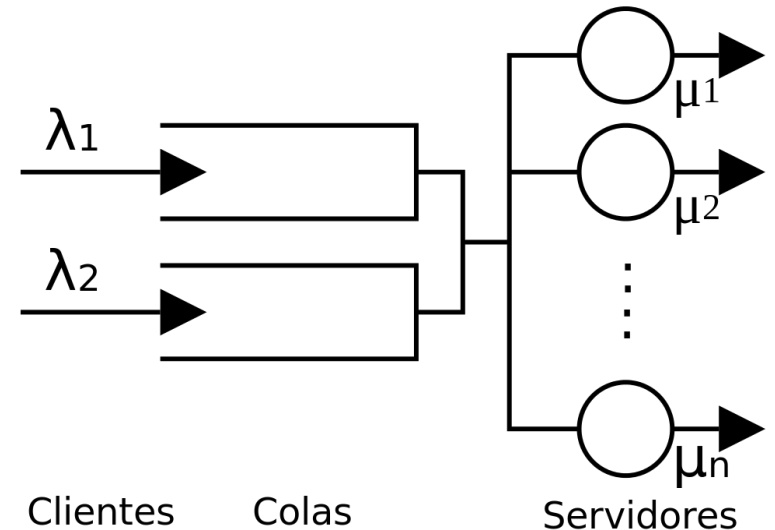
Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ ricardo.caballero@utp.ac.pa



Generalidades

- Es el estudio matemático de las colas o líneas de espera dentro de un sistema.
- Esta teoría estudia factores como el tiempo de espera medio en las colas o la capacidad de trabajo del sistema sin que llegue a colapsar.
- Los modelos son muy útiles para determinar cómo operar un sistema de colas de la manera más eficaz.
- Proporcionar demasiada capacidad de servicio para operar el sistema implica costos excesivos; pero si no se cuenta con suficiente capacidad de servicio surgen esperas excesivas con todas sus desafortunadas consecuencias.



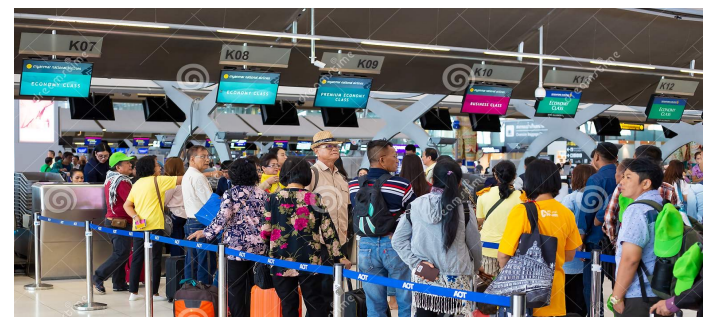
Características de un sistema de colas

Características de llegada

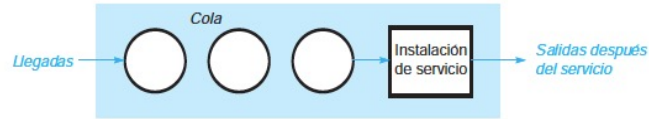
- **Tamaño de la población potencial:** en la mayoría de los modelos se suponen poblaciones infinitas
- **Patrón de llegadas al sistema:** las llegadas son aleatorias cuando son independientes entre sí y su ocurrencia no se predice con exactitud, o con algún patrón conocido.

Características de líneas de espera

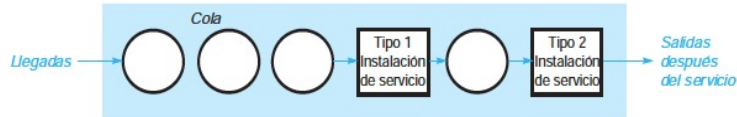
- La **longitud de la fila** puede ser **limitada o ilimitada**. Una fila ilimitada se refiere cuando su tamaño no está restringido mientras que una limitada no puede aumentar su tamaño por restricciones físicas.
- La **disciplina de la cola** (regla con la cual los clientes que están en la fila reciben el servicio) es **primero que entra primero que sale (PEPS)**



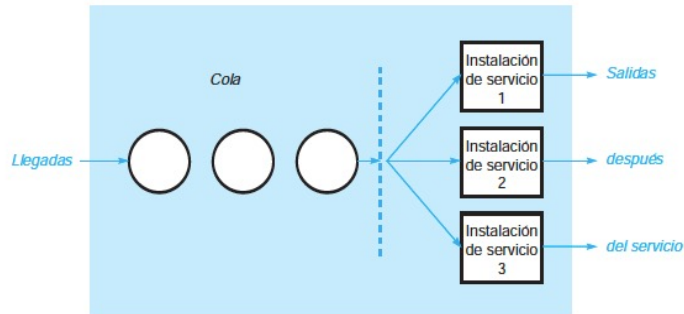
Configuraciones comunes



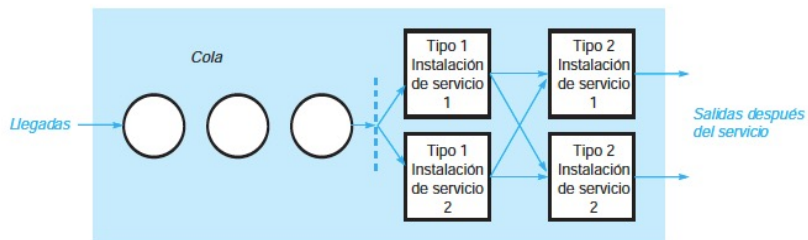
Sistema de un solo canal, una sola fase



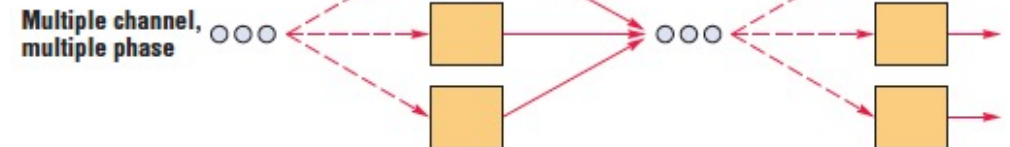
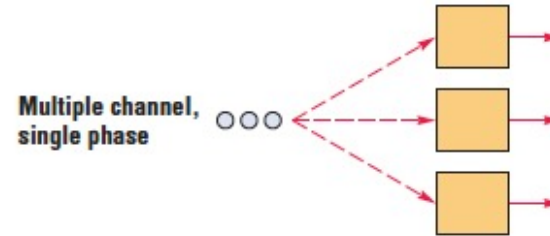
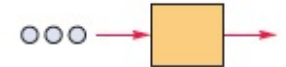
Sistema de un solo canal, multifase



Sistema multicanal de una sola fase



Sistema multicanal, multifase



Notación de Kendall

Kendall sugirió una notación que es útil cuando se trata de clasificar la amplia variedad de modelos de línea de espera diferentes que han sido desarrollados. La notación de tres símbolos de Kendall es la siguiente:

$$A/B/K$$

donde

A	denota la distribución de probabilidad de llegadas
B	denota la distribución de probabilidad del tiempo de servicio
k	denota el número de canales o servidores
M	designa una distribución de probabilidad de Poisson de las llegadas o una distribución de probabilidad exponencial del tiempo de servicio
D	designa que las llegadas o el tiempo de servicio es determinístico o constante
G	designa que las llegadas o el tiempo de servicio tiene una distribución de probabilidad con una media y varianza conocidas

Modelo de línea de espera de un solo canal (M/M/1)

Las fórmulas siguientes se utilizan para calcular las características de operación constante de una línea de espera de canal único con llegadas Poisson y tiempos de servicio exponenciales, donde

λ = número medio de llegadas por periodo de tiempo (tasa de llegadas)

μ = número medio de servicios por periodo de tiempo (tasa de servicios)

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$$

Modelo de línea de espera de un solo canal

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

Factor de utilización : Probabilidad que una unidad que llega deba esperar por servicio

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0$$

Ejemplo 1: Modelo de línea de espera de un solo canal

Para ilustrar las características básicas de un modelo de línea de espera, consideramos la línea de espera en el restaurante de comida rápida Burger King.

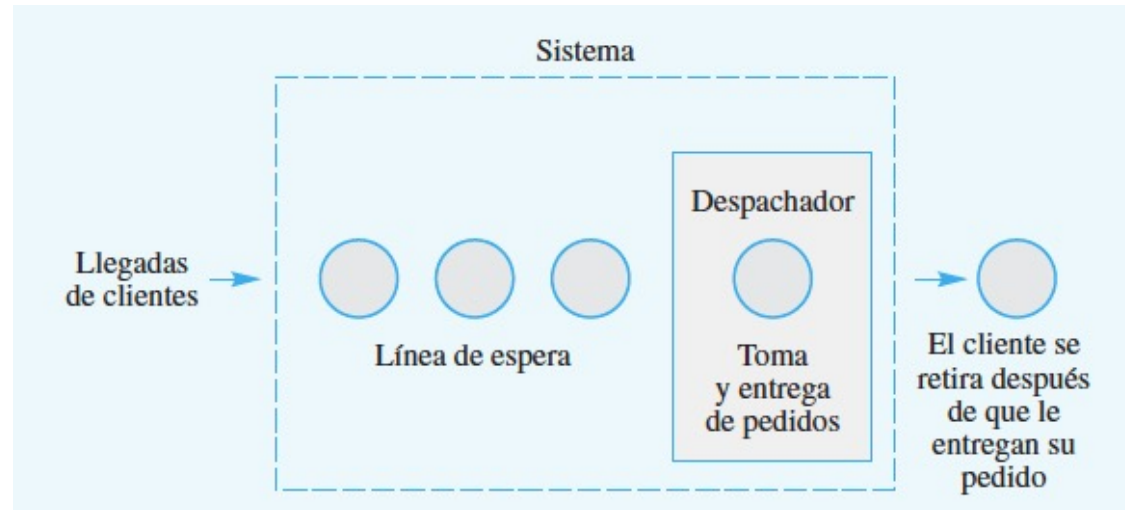
Burger King vende hamburguesas sencillas con queso, papas a la francesa, bebidas refrescantes y malteadas, así como un número limitado de artículos especiales y variedad de postres. Aunque a Burger King le gustaría atender de inmediato a cada cliente, en ocasiones llegaban más clientes de los que podían ser atendidos por el personal. Por tanto, los clientes hacían cola para hacer y recibir sus pedidos. A Burger King le preocupa que los métodos que actualmente utiliza para atender a los clientes ocasionen tiempos de espera excesivos. La gerencia desea estudiar la línea de espera para determinar el mejor método de reducir los tiempos de espera y mejorar el servicio.

En la operación actual de Burger King, un despachador toma el pedido de un cliente, determina el costo total del pedido, recibe el dinero del cliente y luego surte el pedido. Una vez que el pedido del primer cliente se surte, el despachador toma el pedido del siguiente que espera a que lo atiendan. Cada cliente que entra al restaurante Burger King debe pasar a través de un canal —una estación de toma y entrega de pedidos— para hacer un pedido, pagar la cuenta y recibir la comida. Cuando llegan más clientes de los que pueden ser atendidos de inmediato, forman una línea y esperan a que se desocupe la estación de toma y entrega de pedidos. Suponga que Burger King analizó los datos sobre llegadas de clientes y concluyó que la tasa de llegadas es de 45 clientes por hora.

En Burger King, el tiempo de servicio se inicia cuando un cliente comienza a hacer el pedido con el despachador y continúa hasta que el cliente recibe el pedido. Los tiempos de servicio rara vez son constantes. En Burger King, el número de productos y la combinación de estos pedidos varían considerablemente de un cliente al siguiente. Los pedidos pequeños pueden manejarse en cuestión de segundos, pero los grandes pueden requerir más de dos minutos. Suponga que Burger King estudió el proceso de toma y entrega de pedidos y encontró que un despachador puede procesar un promedio de 60 pedidos por hora.

Ejemplo 1: Modelo de línea de espera de un solo canal

Basado en la información previamente detallada, calcule las características de operación de la línea de espera de Burger King.



Ejemplo 1: Modelo de línea de espera de un solo canal

Línea de espera de canal único

$\lambda = 45$ clientes por hora

$\mu = 60$ pedidos por hora

$$\lambda = \frac{45 \text{ clientes por hora}}{60 \text{ minutos}} = 0.75 \text{ clientes por minuto}$$

$$\mu = \frac{60 \text{ clientes}}{60 \text{ minutos}} = 1 \text{ cliente por minuto}$$

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \frac{0.75}{1} = 0.25 \rightarrow 25\%$$

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{0.75^2}{1(1 - 0.75)} = 2.25 \text{ clientes}$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} = 2.25 + \frac{0.75}{1} = 3 \text{ clientes}$$

Ejemplo 1: Modelo de línea de espera de un solo canal

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{2.25}{0.75} = 3 \text{ minutos}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} = 3 + \frac{1}{1} = 4 \text{ minutos}$$

Probabilidad que una unidad que llega deba esperar por servicio

$$\rho = \frac{0.75}{1} = 75\%$$

Ejemplo 1: Modelo de línea de espera de un solo canal

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0$$

13.35 % de siete o más
clientes en el sistema

Number	Probability	Cumulative Probability
0	0.250000	0.250000
1	0.187500	0.437500
2	0.140625	0.578125
3	0.105469	0.683594
4	0.079102	0.762695
5	0.059326	0.822021
6	0.044495	0.866516
7	0.033371	0.899887
8	0.025028	0.924915
9	0.018771	0.943686
10	0.014078	0.957765
11	0.010559	0.968324
12	0.007919	0.976243
13	0.005939	0.982182
14	0.004454	0.986637
15	0.003341	0.989977
16	0.002506	0.992483
17	0.001879	0.994362
18	0.001409	0.995772
19	0.001057	0.996829
20	0.000793	0.997622

Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Estas fórmulas son apropiadas si existen las siguientes condiciones:

1. Las llegadas siguen una distribución de probabilidad de Poisson.
2. El tiempo de servicio de cada canal sigue una distribución de probabilidad exponencial.
3. La tasa de servicios es la misma para cada canal.
4. Las llegadas esperan en una sola línea de espera y luego se dirigen al primer canal abierto para que las atiendan.

λ = tasa de llegadas del sistema

μ = tasa de servicios de cada canal

k = número de canales

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} + \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda} \right)}$$

Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = \frac{\lambda \mu (\lambda / \mu)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$$

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Probabilidad que una unidad que llega deba esperar por servicio

$$\rho = \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda} \right) P_0$$

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema

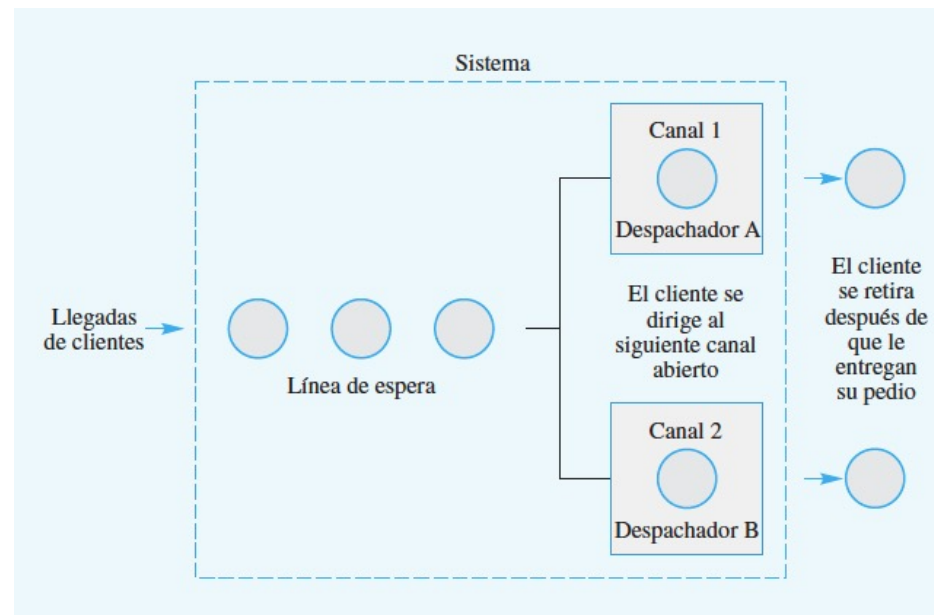
$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} P_0 \quad \text{con } n \leq k$$

$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n}{k! k^{(n-k)}} P_0 \quad \text{con } n > k$$

Ejemplo 2: Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Para ilustrar el modelo de línea de espera de múltiples canales, volvamos al problema de la línea de espera del restaurante de comida rápida Burger King. Suponga que la gerencia desea evaluar la conveniencia de abrir una estación de procesamiento de pedidos de modo que dos clientes puedan ser atendidos al mismo tiempo. Suponga una línea de espera única con el primer cliente que se dirige al primer despachador disponible.

Evalué las características de operación de este sistema de dos canales.



Ejemplo 2: Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

$\lambda = 0.75$ clientes por minuto

$\mu = 1$ cliente por minuto

$k = 2$ canales

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} + \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda} \right)} = 0.4545 \rightarrow 45.45\%$$

Ejemplo 2: Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = \frac{\lambda \mu (\lambda / \mu)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0 = \frac{(0.75)(1)(0.75)^2}{(2-1)! [(2)(1) - 0.75]^2} (0.4545) = 0.1227 \text{ cliente}$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} = 0.1227 + \frac{0.75}{1} = 0.8727 \text{ cliente}$$

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{0.1227}{0.75} = 0.1636 \text{ minuto}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = 0.1636 + \frac{1}{1} = 1.1636 \text{ minutos}$$

Ejemplo 2: Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

Ahora podemos comparar las características de operación constante del sistema de dos canales con las características de operación del sistema de canal único original

1. El tiempo promedio que un cliente pasa en el sistema (tiempo de espera m.s tiempo de servicio) se reduce de $W = 4$ minutos a $W = 1.1636$ minutos.
2. El n.mero promedio de clientes formados en la línea de espera se reduce de $Lq = 2.25$ clientes a $Lq = 0.1227$ clientes.
3. El tiempo promedio que un cliente pasa en la línea de espera se reduce de $Wq = 3$ minutos a $Wq = 0.1636$ minutos.
4. La probabilidad de que un cliente tenga que esperar a que lo atiendan se reduce

Ejemplo 2: Modelo de línea de espera de múltiples canales (M/M/k)

En este caso, Burger King adoptaría la siguiente política: en los periodos que se espera que las llegadas de clientes promedien 45 clientes por hora, Burger King abriría dos canales de procesamiento de pedidos con un empleado asignado en cada uno.

Al cambiar la tasa de llegadas para reflejar su valor a diferentes horas del día, y luego calcular las características de operación, la gerencia de Burger King puede establecer directrices y políticas que le indiquen a los gerentes cuándo programar operaciones de servicio con un solo canal, dos canales o incluso tres o más canales.

Number	Probability	Cumulative Probability
0	0.454545	0.454545
1	0.340909	0.795455
2	0.127841	0.923295
3	0.047940	0.971236
4	0.017978	0.989213
5	0.006742	0.995955
6	0.002528	0.998483
7	0.000948	0.999431
8	0.000356	0.999787
9	0.000133	0.999920
10	0.000050	0.999970
11	0.000019	0.999989
12	0.000007	0.999996
13	0.000003	0.999998
14	0.000001	0.999999
15	0.000000	1.000000

Análisis económico de los sistemas de espera

Para realizar un análisis económico de una línea de espera, se deben obtener estimaciones razonables del costo de espera y el costo del servicio.

C_w = costo de espera por periodo de tiempo de cada unidad

C_s = costo de servicio por periodo de tiempo de cada canal

L = número promedio de unidades en el sistema

k = número de canales

El costo total es la suma del costo de espera y el costo de servicio

$$TC = C_w L + C_s k$$

Ejemplo 3: Análisis costo económico

En el problema del restaurante Burger King, el costo de espera sería el costo por minuto que un cliente espera para que lo atiendan. El costo del servicio es el costo pertinente asociado con la operación de cada canal de servicio. En el problema de Burger King, este costo incluiría el salario y las prestaciones del despachador y cualesquiera otros costos directos asociados con la operación del canal de servicio. En Burger King se estima que este costo es de \$7 por hora. Además, suponga que esta empresa desea asignar un costo de \$10 por hora al tiempo de espera de un cliente.

Determine el costo total para el sistema de un solo canal y el Sistema de dos canales

Ejemplo 3: Análisis costo económico

Para obtener el costo por hora total del sistema con un solo servidor

$L = 3$ clientes

$$TC = C_w L + C_s k$$

$$TC = 10(3) + 7(1)$$

$$TC = \$37 \text{ por hora}$$

Para obtener el costo por hora total del sistema de dos servidores

$L = 0.8727$ clientes

$$TC = C_w L + C_s k$$

$$TC = 10(0.8727) + 7(2)$$

$$TC = \$22.73 \text{ por hora}$$

Por tanto, con base en los costos provistos por Burger King, el sistema de dos servidores opera de forma más económica.

Modelo de múltiples canales, con tiempos de servicio arbitrarios y sin línea de espera (M/G/k)

El modelo se basa en los siguientes supuestos:

1. El sistema tiene k canales.
2. Las llegadas siguen una distribución de probabilidad de Poisson, con tasa de llegadas λ
3. El tiempo de servicio de cada canal puede tener cualquier distribución de probabilidad
4. La tasa de servicio μ es la misma para cada canal
5. Una llegada entra al sistema solo si por lo menos un canal está disponible. Una llegada que ocurre cuando todos los canales están ocupados es bloqueada, es decir se le niega el servicio y no se le permite entrar al sistema

Probabilidad de que j de los k canales estén ocupados

$$P_j = \frac{(\lambda/\mu)^j / j!}{\sum_{i=0}^k (\lambda/\mu)^i / i!}$$

λ = tasa de llegadas

μ = tasa de servicios de cada canal

k = número de canales

P_j = probabilidad de que j de los k canales estén ocupados con $j = 0, 1, 2 \dots k$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = \frac{\lambda}{\mu} (1 - P_k)$$

Ejemplo 4: Modelo de múltiples canales, con tiempos de servicio arbitrarios y sin línea de espera (M/G/k)

Software Inc. Utiliza un sistema de ventas por teléfono para sus productos de software. Los posibles clientes hacen pedidos a Software inc por medio del número de atención al cliente de la empresa. Suponga que las llamadas a este número telefónico llegan a razón de 12 llamadas por hora. El tiempo requerido para procesar un pedido hecho por teléfono varía de forma considerable de un pedido a otro. Sin embargo, es posible que cada representante de ventas de Software Inc atienda 6 llamadas por hora. En la actualidad, el número telefónico dispone de tres líneas internas o canales, cada una operada por un representante de ventas distinto. Las llamadas recibidas se transfieren automáticamente a una línea o canal abierto si está disponible. Siempre que las tres líneas están ocupadas, los clientes reciben una señal de ocupado. En el pasado, la gerencia suponía que los posibles clientes que recibían un tono de ocupado volverían a llamar. Sin embargo, estudios recientes sobre ventas por teléfono demostraron que un número importante de posibles clientes. A los que se les negaba el acceso, ya no volvían a llamar. Estas llamadas perdidas representan pérdidas de ingresos para la empresa, por lo que la gerencia pidió que se analizara el Sistema de ventas por teléfono. En específico, la gerencia deseaba conocer el porcentaje de posibles clientes que obtenía señales de ocupado y que no tenía acceso al Sistema. Si la meta de la gerencia es contar con suficiente capacidad para atender a 90% de los posibles clientes, ¿Cuántas líneas telefónicas y representantes de ventas debía utilizar Software Inc? Suponga que se amplie a una cuatro líneas.

Ejemplo 4: Modelo de múltiples canales, con tiempos de servicio arbitrarios y sin línea de espera (M/G/k)

Probabilidad de que las tres líneas estén en uso y de que más posibles clientes no tengan acceso al sistema

$$P_3 = \frac{(12/6)^3/3!}{(12/6)^0/0! + (12/6)^1/1! + (12/6)^2/2! + (12/6)^3/3!} = \frac{1.333}{6.333} = 0.2105$$

Suponga que Software Inc amplía el sistema a cuatro líneas

$$P_4 = \frac{(12/6)^4/4!}{(12/6)^0/0! + (12/6)^1/1! + (12/6)^2/2! + (12/6)^3/3! + (12/6)^4/4!} = \frac{0.667}{7} = 0.0952$$

Con tres canales, aproximadamente 21% de los llamadas, o es bloqueada. Sólo 79% de las llamadas es atendida de inmediato por el sistema de tres líneas.

Con cuatro canales solo 9.52% de los posibles clientes no tendrán acceso al sistema, 90.48% de los posibles clients lograrán comunicarse con los representantes de ventas. Por consiguiente Software Inc debe emplear su operación de ventas por teléfono a cuatro servidores para alcanzar la meta de la gerencia de contar con suficiente capacidad para atender a por lo menos 90% de los posibles clientes.

Modelos de línea de espera con fuentes finitas

El modelo se basa en los siguientes supuestos:

1. Las llegadas de cada unidad sigue una distribución de probabilidad de Poisson, con tasa de llegadas λ
2. Los tiempos de servicio siguen una distribución de probabilidad exponencial, con tasas de servicio μ
3. La población de unidades que buscan ser atendidas es finita

Con un solo canal, el modelo de línea de espera se conoce como modelo MM/1 con una población con fuente finita.

λ = tasa de llegadas de cada unidad

μ = tasa de servicios

N = tamaño de la población

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}$$

Modelos de línea de espera con fuentes finitas

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = N - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0)$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + (1 - P_0)$$

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{(N - L)\lambda}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

Factor de utilización : Probabilidad que una unidad que llega deba esperar por servicio

$$\rho = 1 - P_0$$

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema

$$P_n = \frac{N!}{(N - n)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 \quad n = 0, 1, \dots, N$$

Ejemplo 5: Modelos de línea de espera con fuentes finitas

Fabrica Co utiliza un grupo de seis máquinas idénticas; cada una funciona un promedio de 20 horas entre descomposturas. Con las descomposturas ocurriendo al azar, se utiliza la distribución de probabilidad de Poisson para describir el proceso de llegada de máquinas descompuestas. Una persona del departamento de mantenimiento proporciona el servicio de reparación de canal único para las seis máquinas. Los tiempos de servicio exponencialmente distribuidos tienen una media de dos horas por máquina.

Calcule las características del sistema

Ejemplo 5: Modelos de línea de espera con fuentes finitas

$$\lambda = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ por hora}$$

$$\mu = \frac{1}{2} = 0.50 \text{ máquinas por hora}$$

Probabilidad de que no haya unidades en el sistema

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n} = 0.4845 \rightarrow 48.45\%$$

Número promedio de unidades en la línea de espera

$$L_q = N - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0) = 6 - \frac{0.05 + 0.50}{0.05} (1 - 0.4845) = 0.3297 \text{ máquina}$$

Número promedio de unidades en el sistema

$$L = L_q + (1 - P_0) = 0.3297 + (1 - 0.4845) = 0.8451 \text{ máquina}$$

Ejemplo 5: Modelos de línea de espera con fuentes finitas

Tiempo promedio que la unidad pasa en la línea de espera

$$W_q = \frac{L_q}{(N - L)\lambda} = \frac{0.3295}{(6 - 0.845)0.50} = 1.279 \text{ horas}$$

Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} = 1.279 + \frac{1}{0.50} = 3.279 \text{ horas}$$

Factor de utilización : Probabilidad que una unidad que llega deba esperar por servicio

$$\rho = 1 - P_0 = 1 - 0.4845 = 0.5155$$

Ejemplo 5: Modelos de línea de espera con fuentes finitas

Probabilidad de que haya cualquier número de máquinas en el sistema de reparación

Number, n	Probability	Cumulative Probability
0	0.4845149	0.4845149
1	0.2907089	0.7752238
2	0.1453545	0.9205783
3	0.0581418	0.9787201
4	0.0174425	0.9961626
5	0.0034885	0.9996511
6	0.0003489	1

Las características de operación muestran que una máquina descompuesta espera un promedio de 1.279 horas antes que se inicie el mantenimiento y el hecho de que más de 50% de las máquinas descompuestas esperen el servicio de reparación, indica que puede que se necesite un sistema de dos canales para mejorar el servicio de reparación

Bibliografía

- Cassandras & Lafortune. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer
- García et al. (2013). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*. Editorial Pearson.
- Render, B. (2016). *Métodos cuantitativos para los Negocios*. Editorial Pearson.
- Taha, H. (2011). *Investigación de Operaciones*. Editorial Pearson.
- Schroeder et al. (2011). *Administración de Operaciones*. McGraw-Hill
- Render, B. & Heizer, J. (2014). *Principios de Administración de Operaciones*. Pearson
- Chase, R. & Jacobs, F. (2014). *Administración de Operaciones, Producción y Cadena de Suministro*. McGraw – Hill
- Hillier, F. & Lieberman, G. (2015). *Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill
- Anderson, D. & Sweeny, D. (2019). *Métodos Cuantitativos para los Negocios*. Cengage
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la Producción y las Operaciones*. McGraw-Hill
- Rees, M. (2015). *Business Risk and Simulation Modeling in Practice*. John Wiley & Sons Ltd
- Stermann, J. (2000). *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill
- Winston, W. (2017) *Microsoft Excel 2016 – Data Analysis and Business Modeling*. Microsoft press
- Slack, N., et al. (2016) . *Operations Management*. Pearson
- Stevenson, W. (2015). *Operations Management*. McGraw-Hill
- Albright, C. & Winston, W. (2015). *Business Analytics: Data Analysis and Decision Making*. Cengage
- Alvarez, H. (2011). *Introducción a la Simulación*. Universidad Tecnológica de Panamá
- Schaffernicht, M. (2006). *Dinámica de Sistemas – Tomo 1: Fundamentos*.
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de Sistemas*. Isdefe
- Eppen, G. et al (2000) *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa*. Prentice-Hall



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo
Facultad de Ingeniería Industrial
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: ricardo.caballero@utp.ac.pa

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>