

MODELACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE INTERTERMINAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

MODELING OF THE INTERTERMINAL TRANSPORT SYSTEM OF THE INTERNATIONAL AIRPORT OF MEXICO CITY

Rodrigo Emmanuel Romero Mendoza

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
emmanuel_r0me@hotmail.com

Salvador Hernández González

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

Vicente Figueroa Fernández

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Resumen

Una de las opciones ofrecidas por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para la movilidad de los usuarios y el personal del mismo, dentro de los diferentes puntos del complejo, es el sistema de transporte Interterminales. Una de las principales problemáticas en este tipo de servicio, es contar de forma rápida información confiable que permita administrar y evaluar el sistema para así gestionar y mejorar el mismo a través del análisis de diferentes casos escenarios de supuestos de mejora. Por lo que es imperativo contar con un modelo que caracterice el mismo con un alto nivel de confianza, en este trabajo se mapeo el sistema por medio de la metodología de teoría de colas y la simulación.

Palabras Clave: Modelo, Teoría de colas, Simulación.

Abstract

One of the options offered by the International Airport of Mexico City for the mobility of the users and its staff, within the different points of the complex, is the

Interterminal transport system. One of the main problems in this type of service is to count on reliable information to manage and evaluate the system in order to arrange and improve it through the analysis of different cases scenarios of improvement assumptions. So it is imperative to have a model that characterizes the same with a high level of confidence, in this work the system was mapped through the methodology of queuing theory and simulation.

Keywords: Model, Queueing theory, Simulation.

1. Introducción

El aeropuerto Benito Juárez o mejor conocido por su nombre operativo, como el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se considera el aeropuerto más importante de México por diversos factores de los cuales los más importantes son, el número de usuarios tanto locales como internacionales, volumen de carga aerotransportada, así como contar con el mayor número de interconexiones con diferentes homólogos en otras partes del globo y la calidad del servicio como de instalaciones (SCT, 2018).

En el año del 2017 tuvo un flujo de 44,732,418. usuarios tanto nacionales como extranjeros, y se prevé un aumento del 4.35% para finalizado el (AICM, 2018). De los cuales un porcentaje importante de estos usuarios realizan transbordos en diferentes “compuertas”, “alas” y terminales del complejo. Sumado a esta cifra está la necesidad de transporte de los empleados del mismo aeropuerto, así como del personal de aerolíneas, para lo cual el aeropuerto pone a su disposición diferentes opciones para la movilidad entre los diferentes puntos de las instalaciones del complejo.

De las opciones mencionadas destacan, el sistema *Aerotrén* y el *Interterminales*, por el volumen de usuarios y ser los principales medios de transporte de pasajeros con interconexiones en otra terminal del aeropuerto.

El sistema *Interterminales* se eligió como objeto de estudio de este proyecto, porque el modelo actual de caracterización del sistema se encuentra desactualizado y su seguimiento solo se coordina con las bitácoras de supervisión del servicio, en contraparte al sistema de *Aerotrén*.

El sistema *Interterminal* presenta las siguientes ventajas como la facilidad de transportar a los usuarios con su equipaje personal y documentado sin la necesidad de hacer otro chequeo de seguridad aeroportuaria, salidas más frecuentes, con un horario de servicio más amplio y poder ser usado por el público en general.

Este trabajo tuvo como objetivo, modelar el sistema de forma confiable (que el modelo caracterice el proceso con un nivel de confianza significativo) a través de dos diferentes metodologías, la teoría de colas y simulación.

La teoría de Colas es una disciplina, que tiene por objeto el estudio y análisis de situaciones en las que existen entes que demandan cierto servicio, de tal forma que dicho servicio no puede ser satisfecho instantáneamente, por lo cual se provocan esperas (Cao Abad, 2002). El proceso básico supuesto por la mayoría de los modelos de colas es el siguiente: Los clientes que requieren un servicio se generan en el tiempo en una fuente de entrada, luego, entran al sistema y se unen a una cola. En determinado momento se selecciona un miembro de la cola, para proporcionarle el servicio mediante alguna regla conocida como disciplina de la cola. Se lleva a cabo el servicio que el cliente requiere mediante un mecanismo de servicio, y después el cliente sale del sistema de colas (Taha, 2012).

La simulación que podría definirse como un medio que experimenta con un modelo detallado de un sistema real para determinar cómo responderá el sistema a los cambios en su estructura o entorno (Robert, 2003). Por otro lado, se podría afirmar que la simulación permite experimentar con un modelo del sistema para comprender mejor los procesos, con el fin de mejorar la actividad en las empresas (Herrera, 1999). Anteriormente sea caracterizado el sistema de transportación *Interterminal* a través de un modelo Estocástico, realizado por el concesionario del servicio. Conjuntamente a este proyecto, la administración del Aeropuerto licito la creación de un modelo el sistema de transportación terrestre en las instalaciones del complejo con el que se planea contar en el 2019.

2. Métodos

El objetivo de esta investigación demanda una propuesta formal de un modelo que caracterice el sistema con un nivel de confianza significativo y de fácil

interpretación, que ayude a la toma de decisiones de la parte administrativa y control del Aeropuerto. Basándonos en la literatura, (Martínez A, 2015) y las recomendaciones de (Mozo, 2012), por lo que se propone caracterizar el sistema por medio de las metodologías de Teoría de colas y simulación.

Para obtener la información necesaria para la selección y creación de los modelos, se examinó el sistema de transporte en sitio, así como diferentes bases de datos históricos como pueden ser las bitácoras que cada supervisor terrestre hace para llevar un seguimiento del servicio ofrecido por el concesionario y los indicadores del servicio descritos en las instalaciones y portal del complejo (AICM, 2018).

Por las condiciones del transporte y recomendación del personal administrativo, se decide el modelo M/M/C, por la facilidad de representar los parámetros de sistema en ambientes cerrados. Así mismo se decide agrupar los datos ciclos de operación en horas, porque es la medida que mide el desempeño del sistema terrestre de transporte.

Creación de base de datos

Uno de los principales problemas para la modelación de sistemas, es obtener información confiable para la construcción del mismo ya que el modelo tendrá tanta potencia de representación como la información valida sea (Herrera, 1999).

Para resolver este problema, se decidió comprobar la confiabilidad de los datos históricos (bitácoras de supervisión de rutas Interterminal), a través del siguiente procedimiento:

- Identificación de parámetros y su comportamiento. Con la información de la bitácora (se tuvo acceso a 300 datos históricos de operación) se logró identificar los parámetros esenciales para la aplicación del método M/M/C, de los cuales destaca como principal factor de incertidumbre la demanda del servicio.
- Selección del tamaño de muestra. Al conocer la media y la desviación de la demanda, se aplica la ecuación 1. Calcula el tamaño de una muestra con media y desviación poblacional conocida.

$$n = \frac{\frac{z^2 p(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{z^2 p(1-p)}{e^2 N}} \quad (1)$$

Para la selección del tamaño de la muestra que tenga un nivel de confianza del 95% con un margen de error del 10% como sugiere (Martínez A, 2015) y (Mozo, 2012). Dando como resultado un tamaño de muestra de 91 ciclos de operación.

- Aforo del servicio Interterminales. Se prosiguió a realizar un muestreo sistemático de los ciclos de operación de la ruta interterminal los días 2 a 6 de octubre que comprendió el horario de operación de 8:00 am a 13:00. Para obtener la información requerida para comparar las bases de datos del año anterior en situaciones similares de servicio, respecto al mes y día. Para así tratar de minimizar elementos de ruido.
- Prueba de hipótesis. Se comparan los datos de la demanda de ambas bases de datos, para así tratar de minimizar factores de ruido donde se pone a prueba la hipótesis $H_0: \mu_1 = \mu_2$, en la cual, el criterio de rechazo es $z_0 > z_{\alpha/2}$. La ecuación 1 Define el estadístico de rechazo para una prueba de hipótesis nula.

$$Z_o = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

Con esta información se obtuvieron los parámetros del sistema que permiten la modelación por teoría de colas que son; tasa de llegadas (λ), tasa de servicio (μ) y número de servidores (C).

Modelado M/M/C

Parámetros del sistema:

- Número de servidores (C). Como política y lineamiento en la operación del servicio de la ruta TETSA (Transportación entre terminales) se realiza una ruta de la terminal 1 a la terminal 2 y viceversa cada 15 min por lo que en cada

hora hay un total de 8 servidores en una hora de operación, en los aforos de las muestras se comprueba que en todos los casos se realizaron las 4 rutas programadas en la hora de servicio promedio.

- Tasa de servicio(μ). La tasa de servicio se calculó tomando la capacidad de cada móvil al transportar usuarios, este móvil es un camión de la marca Mercedes Benz modelo *Marco polo Torin*, con una capacidad de 24 pasajeros sentados.

Conforme a las regulaciones y condiciones de trabajo condicionadas por el AICM, este transporte está equipado con 2 asientos preferentes, los cuales tienen acceso personas con capacidades de movilidad limitada (discapacitadas, mujeres embarazadas o personas en recuperación). Esta capacidad tiene en consideración el supuesto de cada usuario lleve consigo equipaje documentado tanto de mano como documentado.

- Tasa de llegadas(λ). Se tomó como la demanda por hora del servicio que tenía el transporte *interterminal*.

Con las bases de datos generadas del paso anterior, se elaboró una plantilla en Excel que permitiera realizar los cálculos de las medidas de desempeño con las siguientes ecuaciones, ver tabla 1.

Tabla 1 Medidas de desempeño método M/M/C.

Medida de desempeño	Formula
Factor de utilización (ρ).	$\rho = \lambda\mu$
Número promedio de unidades en cola (L_q).	$L_q = 2\lambda\mu(\mu - \lambda)$
Número promedio de unidades en el sistema (L_s).	$L_s = L_q + \lambda\mu$
Tiempo promedio que una unidad pasa en una cola (W_q).	$W_q = L_q \lambda$
Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema (W_s).	$W_s = W_q + 1\mu$

Simulación

Para la comparativa de ambas metodologías, se procedió a elaborar un modelo de simulación del sistema. Utilizando el software ProModel Student Versión: 7.0.4.201 con los siguientes parámetros y supuestos:

- *Ruta o red*. En sistemas cerrados como pueden ser las instalaciones del complejo, figura 1.



Figura 1 Ruta de transporte interterminal (Google Maps, 2018).

La ruta o trayecto es el elemento más fácil de definir, la misma tienen una extensión de 4.2 km de la terminal 1 a la terminal 2 y en el sentido contrario una extensión de 3.8 km, por lo que en el modelo de simulación se tomaría como una sola red de 8 km.

Al punto que corresponde a la terminal 1 se le asignará el nodo 1 y en consiguiente al punto de la terminal se le asignará el nodo 2.

- **Recurso.** El autobús *Marco Polo Turín* se le asigna la misma capacidad de atención del servicio que en el modelo anterior, 24 personas. Habiendo dos en todo momento de la simulación, corriendo en sentido opuesto.
- **Locación.** Este modelo tendrá dos locaciones las cuales cumplirán dos funciones específicas, ser el punto de entrada y salida de los usuarios del sistema y funcionar como filas para el sistema de transporte.
- **Entidades.** Para efectos de esta simulación serán los usuarios del servicio los cuales tendrán una llegada al sistema como el modelo de anterior de teoría de colas.
- **Tiempo de simulación.** El sistema se simulará por un tiempo de 75 horas, que corresponde al periodo de 300 ciclos de operación.
- **Actividad.** La actividad que realizará el recurso a la red corresponde al comando MOVE.

- *Tiempo de servicio.* Al realizar los aforos en sitio se registra los tiempos de operación de la ruta sigue una distribución logarítmica normal con media de 7 min con una desviación de 1.34 min de los datos históricos.

En este modelo de simulación se decide omitir la velocidad del transporte en el sistema, ya que este factor está considerado en el tiempo de servicio. También se omiten factores de capacidad de la red ya que la misma a encontrarse dentro de las instalaciones del complejo AICM, no tiene ingresos al flujo vehicular de usuarios que se quieran conectar a puntos externos. Los casos que puedan caer la capacidad de la red se ven absorbidos igual en el tiempo de servicio considerando que a mayor tiempo de servicio, aumenta el tráfico en la red y disminuye la velocidad con que el móvil se transporta (Martínez A, 2015).

3. Resultados

Confiabilidad de base de datos históricos

Conforme a la ecuación 2 descrita anteriormente se comprueba que el estadístico de rechazo es igual a 1.624, por lo tanto, no cumple con las condiciones del criterio, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula donde se estima que ambas bases de datos siguen una misma distribución con un nivel de confianza del 90%.

Modelados

La tabla 2 muestra una comparativa de ambas metodologías, Promodel no representa los resultados con los mismos nombres, con que la teoría de colas llama a los parámetros, pero se pueden inferir estos de las diferentes tablas de resultados tanto de entidades, recursos y locaciones.

Tabla 2 Comparativa medidas de desempeño modelo de M/M/C y simulación.

Medidas de desempeño	M/M/C	Simulación
Factor de utilización (ρ)	41.8%	48%
Número promedio de unidades en cola (L_q).	0.01668 usuarios	4.5 usuarios
Número promedio de unidades en el sistema (L_s).	3.36 usuarios	20.08 usuarios
Tiempo promedio que una unidad pasa en una cola (W_q).	0.0002 min	0.063 min
Tiempo promedio que una unidad pasa en el sistema (L_s).	0.042 min	10.15 min

4. Discusión

El comportamiento de la demanda como en el tiempo de servicio (tiempo de ruta del transporte en el sistema) en las bases de datos históricos y en las tablas generadas por los aforos, se ve que en las evaluaciones individuales siguen una distribución poisson y exponencial respectivamente, pero al incrementar el número de los datos, estas empiezan a tomar el comportamiento de una distribución Normal, esto puede ser explicado por el principio del Teorema de Limite Central.

En este trabajo se reafirman las recomendaciones de (Herrera, 1999) como de (Martínez A, 2015), de la utilidad de métodos estocásticos a caracterizar de forma simple un sistema complejo como puede ser un sistema de transporte. Ya que los mismos tienden a tomar el sistema en un estado único e idóneo.

Existe una diferencia entre los resultados de ambas metodologías, en especial a las medidas de desempeño como el tiempo en fila y clientes en cola son tan bajos, esto se puede explicar que, aunque el usuario este esperando el inicio del traslado, el mismo se encuentra en el transporte, por lo que para esta metodología el mismo se le está atendiendo.

Así mismo se puede observar que en este caso específico de estudio, al cambiar los parámetros del modelo M/M/C a supuestos lógicos equitativos en el sistema, como por ejemplo el cambio en el número de servidores de 8 a 2 y por consiguiente el aumento proporcional de la tasa de servicio de 24 a 192 clientes por hora, ofrece resultados diferentes.

También se verifica que la simulación puede caracterizar sistemas complejos y brindar mayor información sobre el sistema. Por lo que brinda diferentes áreas de oportunidad para futuros estudios como puede ser el caso de integración de elementos más detallados del sistema, las variaciones de horas picos día de servicio y bloqueos o capacidades de la red. Se observa que en ambos casos la utilización de los transportes se encuentra por debajo de 50% de su capacidad, por lo que podría ser tema de futuras estudios la propuesta al cambio de móviles de menor capacidad, así como un análisis de los parámetros del servicio como puede ser la frecuencia de salidas, número de unidades en el sistema. Y el impacto que tienen éstos, tanto en la calidad del servicio como en el costo económico operativo.

5. Conclusiones

Se comprueba que el sistema de transporte Interterminal se puede caracterizar de manera simple pero no tan precisa a través de un modelo M/M/C, por lo que se recomienda ampliamente a la administración del aeropuerto, omitir y seleccionar otro tipo de modelación de colas. Uno donde el servidor tenga la capacidad de atender a más de un cliente al mismo tiempo, como es el caso del transporte.

También se recomienda modelar el sistema de transporte *Interterminal*, por medio de una simulación y a esta aumentar los parámetros para aumentar el nivel de significancia de procesos.

Un importante resultado secundario es la verificación de la validez de las bitácoras de servicio, de llevar un seguimiento real del servicio ofrecido. La variación entre las bitácoras y los datos obtenidos del aforo se puede explicar por el aumento anual de la demanda en el flujo de pasajeros del aeropuerto, así como el aumento en la tarifa de medios de transporte externos como pueden ser taxis concesionados o servicios independientes como Uber o Yaxi.

6. Revisores, recepción y aceptación de artículo

Recepción artículo: 21/noviembre/2018 **Aceptación artículo:** 22/mayo/2019

Revisor 1:

Nombre: José Omar Hernández Vázquez
Institución: TecNM / Instituto Tecnológico de León
Cédula Profesional: 8521872
Área de conocimiento: Ingeniería Industrial
Correo electrónico: Blink_leoncampeon@hotmail.com

Revisor 2:

Nombre: José Israel Hernández Vázquez
Institución: TecNM / Instituto Tecnológico de León
Cédula Profesional: 8521871
Área de conocimiento: Ingeniería Industrial
Correo electrónico: Israel_leon12@hotmail.com

7. Bibliografía y Referencias

- [1] AICM. (2018). Reporte mensual cifras febrero 2018. Mexico.
- [2] AICM. (05 de mayo de 2018). Transportes AICM:
<https://www.aicm.com.mx/pasajeros/transporte/entre-terminales>
- [3] Cao Abad, R. (2002). Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas. Coruña, España: NETBIBLIO S.L.
- [4] Google Maps. (2018).
- [5] Herrera, A. M. (1999). Simulación: Herramientas para el estudio de sistemas reales. Colombia: Universidad del Norte.
- [6] Martínez A, M. M. (2015). Manual Estadístico del Sector Transporte 2015. Sanfadilla Qro.: IMT.
- [7] Mozo, S. (2012). Analisis de la capacidad de los segmentos basico de autopistas, trezados y rampas de acuerdo al manual de capacidad de carreteras HCM 2000 aplicando MATHCAD. Ciudad de México: Bliiblioteca virtual UNAM.
- [8] Robert, S. (2003). Simulación de sistemas. Ciudad de México.: Porrúa.
- [9] SCT. (2018). Indicadores de la avicion Mexicana enero-septiembre. Ciudad de México.
- [10] Taha, H. A. (2012). Investigación de Operaciones. México: Pearson.