

# DISEÑO DE UN MODELO DE MEDICIÓN DEL TIEMPO DE CICLO EN LA OPTIMIZACIÓN DE UNA CADENA DE SUMINISTRO

## *DESIGN OF A MODEL MEASUREMENT OF CYCLE TIME IN THE OPTIMIZATION OF A SUPPLY CHAIN*

***Karla Militza Mendoza Ramos***

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México  
*ramoskar56@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*

***Mauricio Felipe Flores Molina***

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México  
*felipe.flores@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Los mercados globalizados y competitivos obligan a una gestión de la cadena de suministro, con el fin de cumplir con las expectativas de los clientes. En la toma de decisiones se han implementado los modelos matemáticos, destacando los relacionados con líneas de espera. En el presente trabajo se vinculó la teoría de colas con la medición del tiempo de ciclo en una cadena de suministro, en la disminución del tiempo de recolección de tarimas de una empresa arrendadora, cuando éstas son desocupadas en los supermercados. En las pruebas realizadas se observó una optimización del tiempo de carga logrando no solo un beneficio global para la empresa. Por lo que este trabajo será de utilidad para los administradores y responsables de la gestión de la cadena de suministro.

**Palabra(s) Clave:** Cadena de suministro, Modelo matemático, Teoría de colas, Tiempo de ciclo.

## **Abstract**

*Globalized and competitive markets require supply chain management in order to meet customer expectations. In decision-making, mathematical models have been implemented, highlighting those related to waiting lines. In the present work, the queuing theory was linked in the measurement of the cycle time in a supply chain, in the reduction of the time of collection of pallets of a leasing company, when these are vacated in the supermarkets. In the tests carried out, an optimization of the loading time was observed, achieving not only a global benefit for the company. So this work will be useful for managers and managers of the supply chain management.*

**Keywords:** Cycle time, Mathematical model, Queueing theory, Supply chain.

## **1. Introducción**

En la actualidad para la industria representa un reto importante la administración de las cadenas de suministro ya que estas pueden tener un alto grado de complejidad, ocasionado por las múltiples relaciones que genera cada elemento con otros, dentro del mismo sistema [Bhaskar y Lallement, 2010, Hernández *et al.*, 2017]. Con el fin de poder brindar un buen servicio a los distintos clientes, se deben utilizar herramientas que permitan analizar, programar, planificar, priorizar y decidir sobre las formas más adecuadas de administrar los recursos disponibles [Vissers y Beech, 2005; Abraham *et al.*, 2009].

Las cadenas de abastecimiento se definen como una red de organizaciones interconectadas e interdependientes que trabajan juntas y cooperativamente para controlar, gestionar y mejorar el flujo de materiales e información de los proveedores a los usuarios finales [Aitken, 1998]. Una de las herramientas más utilizadas es la implementación de modelos matemáticos que ayuden a la solución de problemas, dentro ellos se encuentra teoría de colas, la cual es útil para determinar cómo opera un sistema de la manera más eficaz, de este modo son una herramienta en la toma

de decisiones, al permitir encontrar un balance adecuado entre el costo de servicio y el tiempo de espera [Bhaskar y Lallement, 2010].

A su vez el modelo ayuda a mejorar la calidad del servicio, estimando e informando al cliente cuánto tiempo debe esperar hasta ser atendido. La fórmula correspondiente para dicho modelo es la Ley de Little que sostiene que, el valor medio de número de trabajos en el sistema es igual a la tasa de llegada de trabajos al servidor multiplicado por el tiempo ciclo promedio en el sistema [Singer *et al.*, 2008]. Por otra parte, Curry y Feldman en el [2009], la indican para un sistema que satisface las condiciones de estado estacionario, ecuaciones 1 y 2.

$$WIP_s = \lambda_{efe} TC_s \quad (1)$$

$$WIP_q = \lambda_{efe} TC_q \quad (2)$$

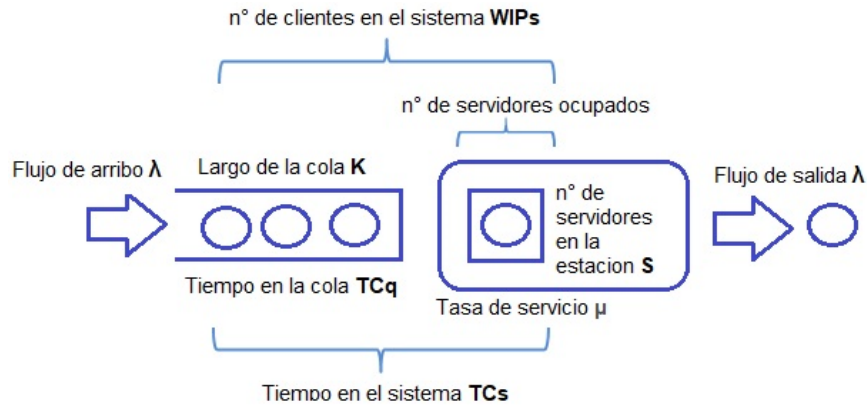
Dónde:

$WIP_s$  : Numero promedio de trabajos a largo plazo en el sistema

$TC_s$  : Tiempo de ciclo promedio a largo plazo

$\lambda_{efe}$  : La tasa de llegadas efectiva al sistema. Es igual a la tasa de llegadas  $\lambda$  (nominal) cuando todos los clientes que llegan pueden unirse al sistema. De lo contrario, si algunos clientes no pueden unirse porque el sistema está lleno (por ejemplo un estacionamiento), entonces  $\lambda_{efe} < \lambda$ .

Como parte de la teoría de colas se utiliza un modelo denominado M/M/1, el cual se aplica a sistemas cuyas llegadas siguen una distribución de probabilidad de Poisson, sus tiempos de servicio se representan por medio de la distribución exponencial, tienen un solo servidor, la capacidad del sistema es infinito y la disciplina de la línea es del tipo Primeras Entradas Primeras Salidas (PEPS) el sistema se ilustra en la figura 1 [Gross *et al.*, 2008; Bhaskar y Lallement, 2010]. Este es un caso especial del proceso de nacimiento y muerte, cuando la *tasa media de llegadas* al sistema y la *tasa media de servicio por servidor ocupado* son constantes ( $\lambda$  y  $\mu$ , respectivamente) e independientes del estado del sistema. Cuando el sistema tiene solo *un servidor* ( $s=1$ ), implica que los parámetros del proceso de nacimiento y muerte son  $\lambda_n = \lambda$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) y  $\mu_n = \mu$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) [Gross *et al.*, 2008; Hillier y Lieberman 2010].



Fuente: Elaboración propia

Figura 1 Estructura básica de un sistema de espera.

Como se ha mencionado anteriormente implementar modelos matemáticos en la medición del efecto de las variables y su cuantificación es de suma importancia, de manera que el objetivo de este trabajo es vincular la teoría de colas con la medición del tiempo de ciclo en una cadena de suministro, la cual resulta ser una buena herramienta de apoyo para los administradores en el diseño, planeación y operación de la cadena de suministro ya que estas desempeñan un papel importante en el éxito o el fracaso de una compañía.

## Estado del Arte

En investigaciones recientes para el modelamiento de cadenas de suministro se han estado utilizando modelos de optimización con restricciones especiales, tal como Bhaskar y Lallement en el [2010], ellos optimizaron el tiempo de respuesta mínimo para la entrega de artículos al destino final.

A su vez Dávila y Ramírez en el [2012], desarrollaron un modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago, formulado como un problema de modelación dinámica determinística y de programación lineal. Posteriormente Claypool *et al.*, en el [2104], diseñaron un modelo que consta de dos componentes, en primer lugar, un modelo de programación entero mixto (MIP), el segundo una simulación de eventos discretos, proporcionando resultados analíticos, pero también permite a los encargados usar su propio juicio para seleccionar la mejor opción.

Más tarde Olhager *et al.*, [2015], definieron los aspectos de diseño con base a decisiones de estratégicas y estructurales. En otra de las investigaciones Diabat *et al.*, [2017], utilizaron un modelo de inventario de localización para el diseño de la red de una cadena de suministro con múltiples Centros de Distribución (DCs) y minoristas. También Hernández *et al.*, [2017], en su trabajo propone una modificación del modelo de flujo a costo mínimo para la optimización en redes de líneas de espera. Por lo cual se observa que es importante la implementación de herramientas en la toma de decisiones, tal como los modelos matemáticos.

## 2. Método

Se utilizó el caso de estudio descrito por Soto y Gutiérrez [2011], en la planeación de una red de recorridos para disminuir el tiempo de recolección de tarimas de una empresa arrendadora cuando éstas son desocupadas en los supermercados. Tomando los siguientes datos, una recolección de 36 931 tarimas ubicadas en 55 entidades y localizadas en 46 ciudades, municipio o delegaciones de la zona centro, sur y occidente del país y abastecerlas el depósito ubicado en el área metropolitana, Llevando a cabo las siguientes cuatro etapas:

- **Etap 1 Definición de la cadena de suministro.** En el diseño de la cadena de suministro se indica el papel de las instalaciones, la ubicación, almacenaje o relacionadas con la transportación y la asignación de la capacidad y mercados en cada instalación [Chopra y Meindl, 2008].
- **Etap 2 Caracterización del mercado.** Se llevó a cabo de acuerdo a Velásquez *et al.*, [1999] donde menciona los siguientes puntos: determinación del ámbito actual y potencial, la identificación de nichos y ventanas de mercado, servicios de comercialización de productos finales, estructura del mercado y análisis de tendencias de los mercados.
- **Etap 3 Desarrollo del modelo matemático.** Se realizó de acuerdo a lo indicado por Soto y Gutiérrez [2011] en la construcción del modelo, de acuerdo a lo siguiente:

Suponen que se tienen  $m$  tipos de camiones recolectores de tarimas con capacidades  $c_1, c_2, \dots, c_m$ , tales que  $c_1 < c_2 < \dots < c_m$  y por otro lado,  $C_T$  es el

total de tarimas a recolectar en la red a la semana, denotando por  $x_1, x_2, \dots, x_m$  las variables de decisión que están definidas como:

- ✓  $x_j$  cantidad de viajes necesarios a la semana que haga el camión con capacidad  $c_j$  para recolectar las  $C_T$  tarimas, con  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ , esto es indicado en la ecuación 3.

$$\sum_{j=1}^m c_j x_j \geq C_T \quad (3)$$

De esta forma el problema lineal entero es posible modelarlo como se describe la función objetivo en la ecuación 4 y sujeto a las condiciones mostradas en ecuaciones 5 y 6.

$$\min Z = \sum_{j=1}^m x_j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m c_j x_j \geq C_T \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m c_j x_j \leq C_T + c_1 - 1 \quad (6)$$

$x_j$  entera no negativa  $\forall j = 1, 2, \dots, m$ . La restricción en ecuación 5 garantiza el mínimo de viajes que se deben hacer para transportar todas las tarimas, sin embargo, puede existir un sobrante para lo cual la restricción en ecuación 6 brindará el cumplimiento de la demanda, sin exceder la menor capacidad de recolección.

- ✓ Suponiendo que se tiene  $n$  subredes, se puede aplicar el siguiente modelo a cada subred, función objetivo ecuación 7 y sujeto a las condiciones mostradas en ecuaciones 8 a 10).

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i x_{ij} \geq C_{Tj} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m c_i x_{ij} \leq C_{Tj} + c_{1j} - 1 \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq r_i \quad (10)$$

Donde:

$c_i$  : Capacidad del camión  $i$ .

$x_{ij}$  : Cantidad de viajes del camión  $i$  en la subred  $j$ .

$C_{Tj}$  : Cantidad de tarimas a recolectar en la subred  $j$ .

$r_i$  : Disponibilidad de viajes del camión  $i$  con los que cuenta para realizar la recolección

La restricción en ecuación 10 indica que los viajes que se deben de hacer para transportar todas las tarimas no exceden los viajes disponibles por unidad de transporte.

Se determinaron los tipos de camiones disponibles en el mercado, siendo estos:

1. Camioneta de 3½ (capacidad de recolección: 72 tarimas).
  2. Torton de 24 pies (capacidad de recolección: 252 tarimas).
  3. Plataforma de 40 pies (capacidad de recolección: 432 tarimas).
  4. Plataforma de 48 pies (capacidad de recolección: 504 tarimas).
  5. Plataforma de 53 pies (capacidad de recolección: 540 tarimas).
- ✓ Para determinar el número de camiones que se requieren se evaluó utilizando la ecuación 11.

$$\sum_{i=1}^m \left[ \frac{A_i}{q_i} \right] \quad (11)$$

Donde  $q_1, q_2, \dots, q_m$  es la cantidad de viajes que haría cada uno de los  $m$  camiones a la semana y  $A_m$  la cantidad de viajes a la semana del camión  $m$ .

- **Etapa 4 Validación del modelo.** En esta etapa se comprobó si el modelo propuesto hace en realidad lo que se predice, para ello se siguió lo descrito por Eppen *et al.* [2000] y Taha [2012] indicando la entrada de datos históricos sobre decisiones, parámetros y resultados obtenidos en una situación similar en una época ya conocida.

### Modificación aplicando ecuaciones de teoría de colas

Se planteó que todos los tiempos entre llegadas y salidas ( $\lambda$  y  $\mu$ ) son independientes e idénticamente distribuidos de acuerdo con una distribución exponencial y el número de servidores es  $s = 1$  (figura 2), siendo este un sistema estable por lo cual  $\rho < 1$  estrictamente y el tamaño de la población potencial es finito. En este caso, sea  $N$  el tamaño de esa población. Una de las ecuaciones utilizadas se muestra en la tabla 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Sistema M/M/1 Población finita.

### 3. Resultados

Se diseñó una red de recolección de las 55 entidades las cuales se dividieron en 8 subredes y el centro de distribución CHEP México se ubica en el área metropolitana (figura 3).

Se evaluó la semana con mayor volumen de recolección de tarimas, definido y analizado por tour en la tabla 2.

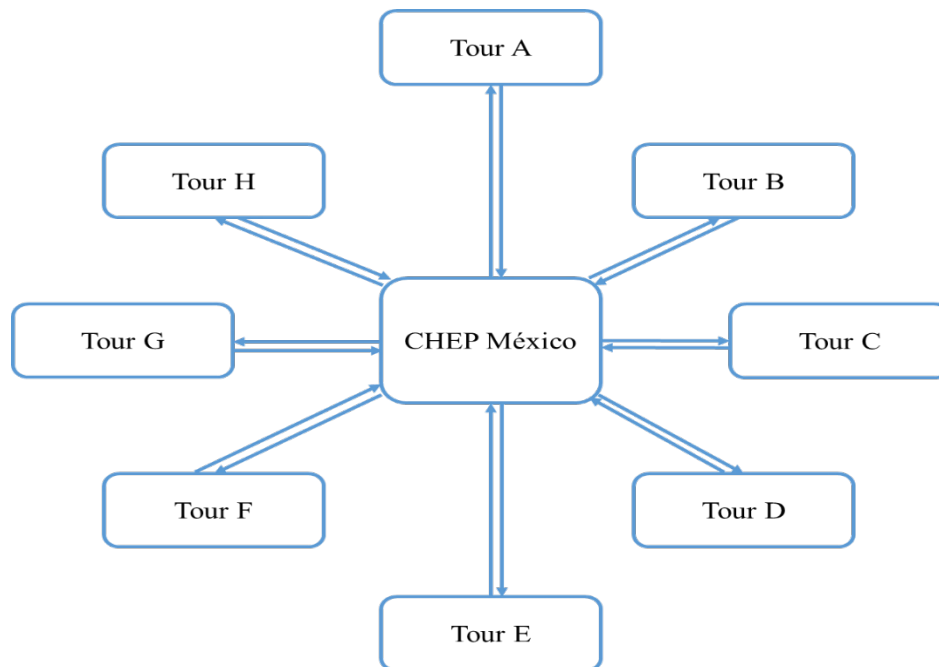
De acuerdo a las condiciones de los tours C y D se tomó la decisión de excluir a los camiones de mayor capacidad (4 y 5), ya que estos tours involucran localidades exclusivamente dentro del Estado de México y Distrito Federal y por el tipo de camiones de gran tamaño, trasladarse con tráfico y por las avenidas del área metropolitana, será sumamente lento y en algunos casos imposible.



Tabla 1 Ecuaciones para sistemas M/M/1 y población finita.

$\rho = \lambda / \mu$	Intensidad de tráfico; velocidad de carga de trabajo ofrecida a un servidor
$P_0 = 1 / \sum_{n=0}^N \left[ \frac{N!}{(N-n)!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right]$	Probabilidad que el sistema se encuentre vacío
$P_n = \left[ \frac{N!}{(N-n)!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] P_0$	Probabilidad de encontrar n clientes en el sistema
$WIP_q = \sum_{n=1}^N (n-1) P_n$	Número promedio de clientes en la línea.
$WIP_s = N - \frac{\mu}{\lambda} (1 - P_0)$	Número esperado de clientes en el sistema.
$\lambda_{efe} = \lambda (N - WIP_s)$	Tasa media efectiva de llegadas al sistema
$TC_s = \frac{WIP_s}{\lambda_{efe}} = \frac{N}{\lambda_{efe}} - \frac{1}{\lambda}$	Tiempo de espera promedio en el sistema
$TC_q = \frac{WIP_q}{\lambda_{efe}} = \frac{N}{\lambda_{efe}} - \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\mu}$	Tiempo promedio de espera en la línea.

Fuente: [Hillier y Lieberman, 2010] y [Render et al., 2006]



Fuente: Elaboración propia

Figura 3 Cadena de recolección de tarimas por CHEP México.

Tabla 2 Recolección de tarimas en CHEP México.

Tour	Cantidad recolectada	Entidades a visitar
A	2214	8
B	4372	6
C	3065	9
D	5233	8
E	14935	8
F	1831	3
G	3637	9
H	1644	4
Total	36 931	55

Fuente: [Soto y Gutiérrez, 2011]

Se diseñaron los modelos de optimización lineal entera para cada tour de acuerdo a la demanda descrita en la tabla 1. Se muestran como ejemplo los tours A y C:

- Tour A. Función objetivo ecuación 11 y sujeto a condiciones en ecuaciones 12 y 13.

$$\text{Min } Z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \quad (11)$$

$$72 \cdot x_1 + 252 \cdot x_2 + 432 \cdot x_3 + 504 \cdot x_4 + 540 \cdot x_5 \geq 2214 \quad (12)$$

$$72 \cdot x_1 + 252 \cdot x_2 + 432 \cdot x_3 + 504 \cdot x_4 + 540 \cdot x_5 \leq 2285 \quad (13)$$

- Tour C. Función objetivo, ecuación 4 y sujeto a condiciones de ecuaciones 15 y 16.

$$\text{Min } Z = x_1 + x_2 + x_3 \quad (15)$$

$$72 \cdot x_1 + 252 \cdot x_2 + 432 \cdot x_3 \geq 3065 \quad (15)$$

$$72 \cdot x_1 + 252 \cdot x_2 + 432 \cdot x_3 \leq 3136 \quad (16)$$

La solución al modelo planteado de acuerdo al software TORA, arrojó un total de 78 viajes por semana distribuidos en los diferentes tipos de camiones considerados, detallado en la tabla 3.

Se determinó la cantidad de camiones contemplando 5 días de trabajo por semana dando como resultado 16 unidades de transportes; sin embargo, es factible disminuir esta cantidad (tabla 4), a través del análisis de viajes libres generados por cada tipo de camión y tomando como parámetro de decisión el cumplimiento de la demanda establecida.

Tabla 3 Viajes requeridos por cada tipo de camión en los tours.

		Tours								Viajes requeridos por semana
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Camiones requeridos	Tipo 1	1	1	1	1	0	0	0	1	5
	Tipo 2	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	Tipo 3	0	0	7	12	1	0	1	0	21
	Tipo 4	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	Tipo 5	4	8	0	0	26	3	6	3	50

Tabla 4 Unidades requeridas por cada tipo de camión.

Camión	Número de unidades requeridas	
	Reportado por Soto y Gutiérrez, 2011	Resultados experimentales
Tipo 1	0	0
Tipo 2	0	0
Tipo 3	4	6
Tipo 4	1	0
Tipo 5	9	9
Total	14	15

Se evaluó el modelo con las unidades de transporte obtenidas en 4 semanas con demanda irregular. En tablas 5 y 6 se muestran los viajes requeridos por unidad para cada tour de la semana 1 del modelo reportado por Soto y Gutiérrez [2011], así como el modelo experimental bajo las mismas condiciones. Como se aprecia, el modelo original no considera el proceso de carga, el cual no es instantáneo, se trata de un proceso que requiere de una secuencia de operaciones. En la siguiente sección se propone la ampliación correspondiente que consideraría la carga de los camiones.

Tabla 5 Asignación de camiones por tour requeridos en la semana 1.

		Tours/viajes								Viajes requeridos por semana
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Volumen de recolección		1609	1916	2322	3304	8016	2602	3992	2828	
Camiones	Tipo 3	0	1	6	8	0	0	0	0	15
	Tipo 4	0	2	0	0	0	0	1	1	4
	Tipo 5	3	1	0	0	15	5	7	5	36

Fuente: [Soto y Gutiérrez, 2011].

Tabla 6 Asignación de camiones por tour requeridos en semana 1, modelo experimental.

		Tours/viajes								Viajes requeridos por semana
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Volumen de recolección		1609	1916	2322	3304	8016	2602	3992	2828	
Camiones	Tipo 3	0	2	6	8	0	0	3	0	19
	Tipo 5	3	2	0	0	15	5	5	6	36

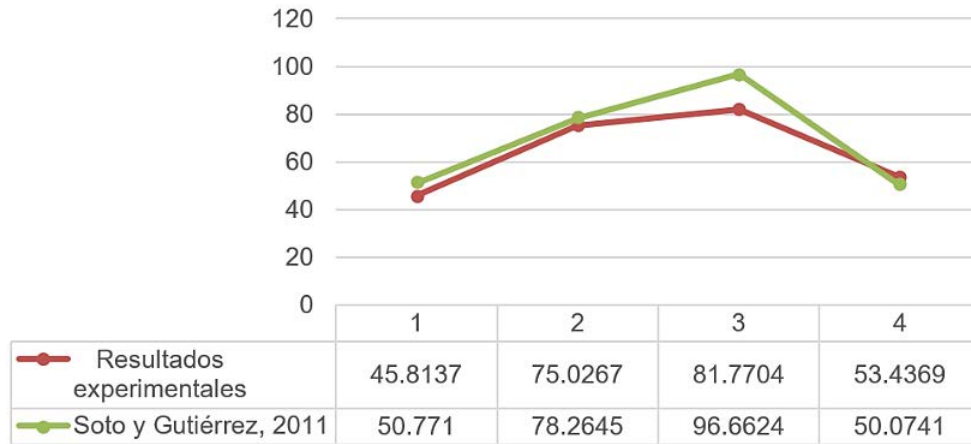
Con base a las ecuaciones descritas el modelo de colas para cada tour, tomando como  $N$  la cantidad de unidades descrita en tablas 5 y 6 según corresponda, y tiempo de servicio  $t_s$  de 15 segundos/ tarima. Se muestran como ejemplo el tour B de la semana 1 en la tabla 7. El mismo análisis se replicó en las 4 semanas bajo las mismas condiciones para ambos modelos analizados.

Tabla 7 Sistemas M/M/1 y población finita del Tour B semana 1.

Tipo Camión	Modelo reportado por Soto y Gutiérrez, 2011			Resultados experimentales	
	3	4	5	3	5
$N$	1	2	1	2	2
$P_o$	0.9893	0.9512	0.9867	0.9581	0.9478
$WIP_q$	0	0.0012	0	0.0009	0.0014
$WIP_s$	0.0092	0.0491	0.0134	0.0437	0.0519
$TC_q$	0	0.0513	0	0.0377	0.0587
$TC_s$	1.5593	2.1164	2.2712	1.8755	2.2371

Estos resultados indicaron que, en promedio, una unidad de transporte tipo 5 espera 4 min para ser cargado en la locación B del modelo experimental, ya que al momento de que la unidad entra al sistema aproximadamente faltaran 28 tarimas por cargar en la unidad anterior, este tiempo de espera es pequeño debido a que el sistema pasa en un 95% de su tiempo vacío.

En cuanto al tiempo de ciclo en horas encontrado por semana se muestra en la figura 4, en la cual se observa una diferencia en el total por 19.52 horas, indicando que el proceso de carga ha sido optimizado en un 8%, esto ayudará a crear y sostener una ventaja competitiva de la empresa en un aumentó en la demanda a través de nuevos mercados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4 Comparación del tiempo de ciclo del modelo reportado y el experimental.

#### 4. Discusión

Los resultados del modelo arrojaron que les toma 249 viajes para la recolección de 121 531 tarimas, donde al modificarlo como un sistema de colas se observó que, si bien el proceso de carga es rápido, esto no siempre será así, sin embargo, se encontró que la suma acumulada del tiempo de carga de tarimas se convierte en un factor de peso e implica un costo que debería considerarse. Por lo que es de suma importancia identificar el tipo de transporte no solo por el costo de traslado si no por los beneficios globales que le brinda a la empresa. Por ello en el modelo experimental logró optimizar dicho proceso.

De acuerdo a lo anterior se comprobó que los modelos M/M/1 y población finita son muy convenientes para este sistema al arrojar información adicional del funcionamiento del sistema útiles para la toma de decisiones, permitiendo así a los administradores de la cadena una herramienta para analizar el desempeño del sistema, la cual proporcionan una forma de medir la calidad del servicio, y permite soportar una decisión como es la compra de unidades para satisfacer la demanda futura. Favorecen el entendimiento del funcionamiento del sistema y su desempeño. Los mercados globalizados y competitivos obligan a una gestión de la cadena de suministro, con el fin de cumplir con las expectativas de los clientes, esto ha obligado a las empresas a entregar los productos adecuados en el lugar exacto, en el tiempo oportuno y de la manera más económica posible. Por ello fue importante realizar

este análisis para comprender la situación actual, mejorarla y prever el comportamiento futuro frente a un crecimiento desde un enfoque de teoría de colas y de esta manera mantener un servicio más eficiente.

## **5. Revisores, recepción y aceptación de artículo**

**Recepción artículo:** 14/febrero/2019    **Aceptación artículo:** 19/marzo/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: Fernando Iván Molina Herrera  
Institución: Universidad de Guanajuato  
Cédula Profesional: 7260376  
Área de conocimiento: Ingeniería Agroindustrial  
Correo electrónico: fi.molina@ugto.mx

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Abraham, G., Byrnes, G. B. y Bain, C. A. (2009). Short-Term Forecasting of Emergency Inpatient flow. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13, 380–388.
- [2] Aitken, J., (1998). Supply Chain Integration With in the Context of a Supplier Association, Cranfield University, Ph.D. Thesis.
- [3] Bhaskar, V. and Lallement, P. (2010) Modeling a supply chain using a network of queues. *Applied Mathematical Modelling*. 34: 2074–2088
- [4] Davila, J., & Ramírez, L. (2012). Modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago. *El Hombre y la Máquina* (28), 1-16.

- [5] Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación* (Tercera ed.). México: Pearson Educación.
- [6] Claypool, E., Norman, B., & Needy, K. (2014). Modeling risk in a Design for Supply Chain problem. *Computers and Industrial Engineering*, 78, 44-54.
- [7] Curry, G., & Feldman, R. (2009). *Manufacturing Systems. Modeling and Analysis* (Segunda ed.). Texas, USA: Springer.
- [8] Diabat, A., Dehghani, E., & Jabbarzadeh, A. (2017). Incorporating location and inventory decisions into a supply chain design problem with uncertain demands and lead times. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 139-149.
- [9] Eppen, G. D., Gould, F. J., Schmidt, C. P., Moore, J. H., & Weatherford, L. R. (2000). *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa. Construcción de Modelos para la toma de Decisiones con Hojas de Cálculo Electrónicas* (Quinta ed.). México: Prentice-Hall.
- [10] Feldman, R., & Valdez, C. (2010). *Applied Probability and Stochastic Processes* (Second ed.). New York: Springer.
- [11] Gutiérrez González E., & Soto Betancourt, C. R. (2011). Modelo para optimizar la recolección de tarimas en una empresa arrendadora. En I. A. Rivera González, M. A. Cristóbal Vázquez, & M. Aguilar Fernández, *Administración de la Cadena de Suministros. Diseño y aplicación de modelos en empresas mexicanas* (Primera ed., págs. 181-211). México: Instituto Politécnico Nacional.
- [12] Gross, D., Shortie, J. F., Thompson, J. M. and Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of Queueing Theory* (Fourth ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- [13] Hernández González, S., Flores de la Mota, I., Jiménez García, J. A., & Hernández Ripalda, M. D. (2017). Numerical analysis of minimum cost network flow with queuing stations: the M/M/1 case. *Nova Scientia*, 9(18), 257-289.
- [14] Hillier, F., & Lieberman, G. (2000). *Introduction to operations research* (Seventh ed.). New York: McGraw-Hill Higher Education.
- [15] Olhager, J., Pashaei, S., & Sternberg, H. (2015). Design of global production and distribution networks. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45, 138-158.

- [16] Render Barry, Stair M. Ralph, Michael E. Hanna. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. Pearson Educación: México
- [17] Singer, M., Donoso, P., & Scheller-Wolf, A. (2008). Una introducción a la teoría de colas aplicada a la gestión de servicios. *Revista ABANTE*, 11(2), 93-120.
- [18] Velásquez, F., Plaza J., Gutiérrez B., Pulido J., Rodríguez G., Romero M. y Carranza J. (1999). *Método de Planificación del Desarrollo Tecnológico en Cárdenas Agroindustriales que Integra Principios de Sostenibilidad y Competitividad*. La Haya, Países Bajos: Servicio Internacional para la Investigación Agrícola Nacional (ISNAR).
- [19] Vissers, J. y Beech, R. (2005). *Health operations management*. En J. Vissers y R. Beech (Eds.), *Health Operations Management. Patient Flow Logistics in Healthcare* (pp. 15–38). London: Routledge.
- [20] Taha, H. (2012). *Investigación de operaciones* (Novena ed.). México: Pearson Educacion.