

**Ago-Dic  
2018**



**Neftalí Ibarra Marín.**

# **REPORTE FINAL PARA ACREDITAR RESIDENCIA PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

**CALCULO DE NIVELES ÓPTIMOS DE WORK IN PROGRESS (WIP) PARA LOS MODELOS  
MX.0001, MX.0003 Y MX.0020 EN EL ÁREA DE MAQUINADO DE SUMITOMO  
ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. DE C.V.**

Nombre de la Empresa

**SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. DE C.V.**

Nombre del asesor externo: L.A.P.S. Andrea Monserrat Medrano Palacios.

Nombre del asesor interno: M.C. José Guillermo Batista Ortiz.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco profundamente a Dios por darme la oportunidad de contar con los medios necesarios para la realización de este proyecto de residencias profesionales.

Así mismo, agradezco a mis padres por proporcionarme todo el apoyo posible para lograr mis objetivos, agradezco su paciencia, su cariño y valores que me han inculcado, pues ello me impulsa a mejorar constantemente.

Quiero agradecer de la manera más sincera a los docentes con del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga por tener toda la disposición de compartir el conocimiento con el objetivo de formar personas competentes y con alto valor ético.

Agradezco al Ing. Guillermo Batista por brindarme su apoyo en la resolución de dudas, por proponer alternativas y aplicación de herramientas para el logro del objetivo de este proyecto. Admirable profesor que con su paciencia me guio a lo largo de mis estadías.

Quiero agradecer a la L.A.P.S. Monserrat Medrano, quien fungió como mi asesora externa, por darme la oportunidad de tener mi primer contacto en una empresa de la industria automotriz, por compartir su experiencia y conocimiento, por su paciencia en la resolución de mis dudas y por haberme proporcionado información necesaria para la realización de este proyecto.

## **RESUMEN.**

El presente documento muestra la realización del proyecto en el área de control de producción de la empresa SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. DE C.V., el cual consta en la aplicación de los modelos matemáticos de la Teoría de colas, perteneciente a la materia de Investigación de Operaciones.

La aplicación de tales modelos se realizó con el objeto de evaluar el comportamiento del área de maquinado.

La información resultante de las medidas de desempeño de la teoría de colas muestra el Lead Time (Tiempo que le toma a un lote pasar por el sistema), Throughput Rate (número de lotes que un sistema trabaja sobre unidad de tiempo) y, lo que le interesa ampliamente al área de control de producción, el nivel óptimo de Work in Progress (W.I.P.) (niveles de stock de producto en proceso). La importancia de los resultados radica en la necesidad de establecer una política de control de WIP.

# ÍNDICE.

## Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN. ....	iii
II. INTRODUCCIÓN.....	1
II.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA. ....	2
II.3 PROBLEMAS A RESOLVER. ....	6
II.4 OBJETIVOS. ....	7
II.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO. ....	8
III. MARCO TEÓRICO. ....	13
II. METODOLOGÍA DERSARROLLADA.....	25
V. RESULTADOS.....	41
VI. CONCLUSIONES. ....	92
VII. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y APLICADAS. ....	94
VIII. FUENTES DE INFORMACION.....	95

## **II. INTRODUCCIÓN.**

La reducción del Lead Time y el incremento del Throughput Rate deben ser siempre un objetivo en toda organización.

Las dos medidas de desempeño anteriores están directamente relacionadas con los niveles de WIP de tal manera que entre más alto sea el nivel de este, más alto será el Lead Time. Es por ello que establecer políticas enfocadas en nivel de WIP debe ser una prioridad para la búsqueda constante de la reducción de costos.

En el caso de la empresa SIMITOMO, no se contaba con ninguna política de control de WIP, así como, ninguna técnica eficiente que le permitiera hacer inferencia sobre ello.

El departamento de control de producción ha definido como importancia el control de los niveles de WIP, ya que con ese conocimiento se determinó una mejor planeación sobre cuánto y cuándo producir cada modelo, lo que ayudó a evitar los paros de líneas por falta de material, y por consiguiente una reducción directa en los costos de fabricación.

Para determinar los niveles óptimos de WIP se decidió aplicar la metodología de la teoría de colas, ya que con las medidas de desempeño nos permitió conocer el comportamiento (en un estado estable) de las celdas de maquinado.

## **II.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.**

SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. DE C.V., es una empresa de origen japonés ubicada en el parque industrial San Francisco IV sección, que comenzó operaciones en febrero del 2016. Es una empresa que manufactura para la industria automotriz, principalmente piezas que van directamente en la transmisión de los vehículos y en el funcionamiento mecánico del motor.

Esta empresa se caracteriza por sus procesos de fabricación; pues, como su nombre de la organización lo dice, se manufactura productos sinterizados. El sinterizado consiste producir piezas compuestas por polvo metálico mezclado homogéneamente que ha sido compactado en una prensa. Dichas piezas compactadas, no tienen ninguna dureza y son fáciles de romper con la más mínima fuerza puesto que no existe una aleación entre los diferentes elementos. Para formar la aleación que dará la dureza requerida a las piezas estas se someten a un proceso de sinterizado. Sinterizar consta en someter a las piezas a altas temperaturas (inferiores al punto de fusión) para formar los enlaces entre las partículas de los diferentes elementos.

Mediante el proceso de sinterizado se pueden fabricar piezas que son bastante complejas por sus requerimientos físicos y químicos.

A continuación, se muestran imágenes sobre el proceso de manufactura de los diferentes productos.

## TRANSFORMACIÓN HOUSING VANE EXHAUST



Figura 1. Proceso de transformación del modelo MX.0003. Fuente: SUMITOMO; 2018.

## TRANSFORMACIÓN HOUSING VANE INTAKE



Figura 2. Proceso de transformación de modelo MX.0001. Fuente: SUMITOMO; 2018.

## TRANSFORMACIÓN BLANKING CARRIER



Figura 4. Proceso de transformación del modelo MX.0020.

## TRANSFORMACIÓN MAQUINADO CARRIER



Figura 5. Proceso de transformación del modelo MX.0020. Fuente: SUMITOMO 2018.

Sus principales clientes son: DENSO, MAZDA; JATCO; MITSUBISHI.



En la búsqueda de la mejora continua, envuelta por la filosofía de SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. DE C.V. es que este proyecto buscó aportar en dicho objetivo. Por medio de la generación de datos cuantitativos sobre las medidas de desempeño del área de maquinado de los modelos MX.0001, MX.0003 y MX.0020 con el fin de generar una política de control de WIP.

A continuación, se encuentra la filosofía con la que se rige dicha organización.

### **Misión.**

La misión de SEMX es un servicio que cumpla con la satisfacción del cliente y requerimientos regulatorios aplicables por medio de la alta calidad de nuestros productos a través del desarrollo humano de nuestros colaboradores.

### **Visión.**

Lograr un reconocimiento de excelencia a través de nuestros productos y servicios, posicionándonos en la industria de componentes sinterizados.

### **Política de calidad.**

En SEMX nos comprometemos en ofrecer componentes sinterizados de la más alta calidad, para garantizar al 100% la satisfacción de nuestros clientes, tomando en cuenta los requerimientos y expectativas de nuestras partes interesadas y cumpliendo con los requisitos regulatorios aplicables, logrando así mejora continua y la efectividad de nuestro sistema de gestión de la calidad, ofreciendo un lugar seguro de trabajo para nuestros colaboradores.

### **Valores.**

- Banji-Nissei: Haz sinceramente lo mejor que puedas no solo en aspectos laborales sino en todos los aspectos de tu vida.
- Shinyo-kakujitsu: Da importancia a la integridad y a la buena gestión.
- Fusuu-furi: No actúes precipitadamente o descuidadamente buscando ganancias fáciles.

### **Descripción del área de trabajo.**

Dentro de SEMX, desempeñé el puesto de becario en el área de control de producción, brindando soporte a en tareas como el chequeo y validación de scrap (material fuera de especificación; No Good) para que pudiera ser tirado, captura de material NG en macro de Excel, chequeo y actualización de tablero Kanban, elaboración de presentación mensual de resultados de producción.

El área de control de producción es responsable de la planeación de la producción mensual, así mismo, es responsable de generar los requerimientos de los principales insumos, tales como materia prima, aceites para las maquinas, entre otros.

### **II.3 PROBLEMAS A RESOLVER.**

En la empresa SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V., en específico, en el área de control de producción donde actualmente no se conocen los niveles óptimos de WIP.

#### ***1. Calcular el nivel óptimo de WIP para el área de maquinado de los modelos MX.0001, MX.0003 y MX.0020.***

El conocer los niveles óptimos de WIP permitirá al departamento de control de producción establecer una política de control del mismo con el objetivo de tener una programación acorde a las necesidades del cliente interno.

El diagnóstico realizado mediante la metodología aplicada es en un estado estable, es decir, para una situación donde no hay falta de operador, no existen paros por falta de material.

## **II.4 OBJETIVOS.**

### Objetivo general:

Evaluar el área de maquinado de los modelos MX.0001, MX.0003 y MX.0020 de la empresa SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V. aplicando la teoría de colas.

### Objetivos específicos:

- Aplicar los conceptos de la teoría de colas para evaluar el área de maquinado de los modelos mencionados con el fin de determinar los niveles óptimos de WIP.
- Proporcionar datos cuantitativos al departamento de control de producción sobre las medidas de desempeño del área de maquinado.
- Comparar los resultados obtenidos utilizando el software
- Establecer una política de control de WIP.

## II.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V. ubicada en el municipio de San Francisco de los Romo, es una empresa dedicada a la producción en masa de piezas para la industria automotriz. Empresa que mantiene como objetivo la satisfacción de los requerimientos de sus clientes y la mejora continua para ser más competitivos en el mercado.

En la situación presentada por la empresa destaca el problema de no cumplir en un XX % con el plan de producción. A continuación, se muestra los diagramas de Pareto del mes de junio del año 2018 de los modelos definidos en la intervención, los cuales reflejan las principales causas de pérdida de tiempo correspondientes a los modelos en los cuales se enfocó el proyecto.

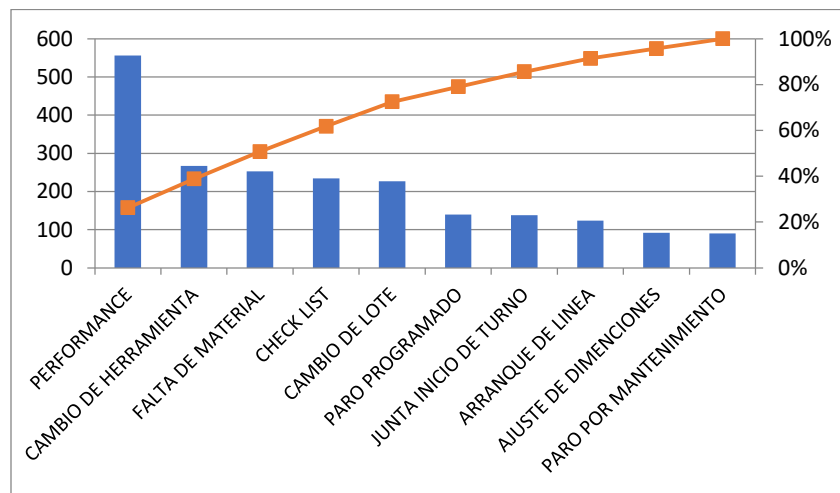


Figura 6. Diagrama de Pareto de modelo MX.0020 OP 10-20. Fuente: Elaboración propia, 2018.

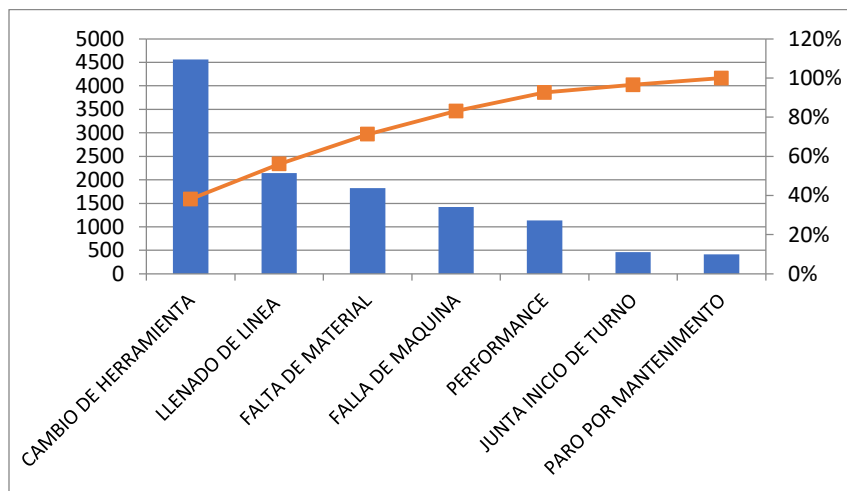


Figura 7. Diagrama de Pareto de modelo MX.0020 OP 40-70. Fuente: Elaboración propia, 2018.

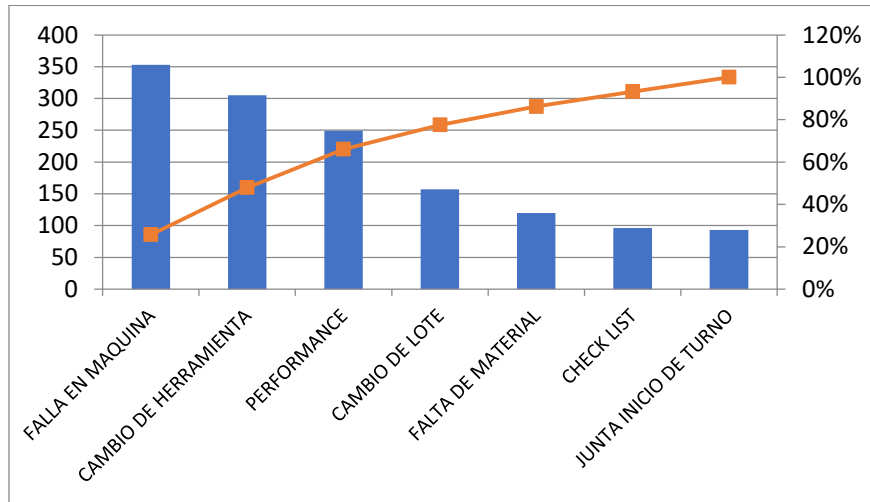


Figura 8. Diagrama de Pareto de modelo MX.0020 OP 80-90. Fuente: Elaboración propia, 2018.

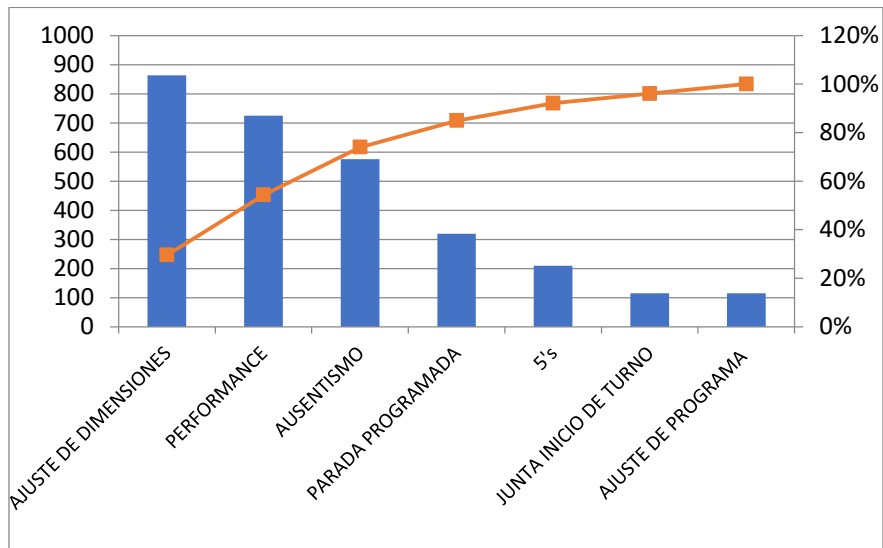


Figura 9. Diagrama de Pareto de modelo MX.0001 OP 10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

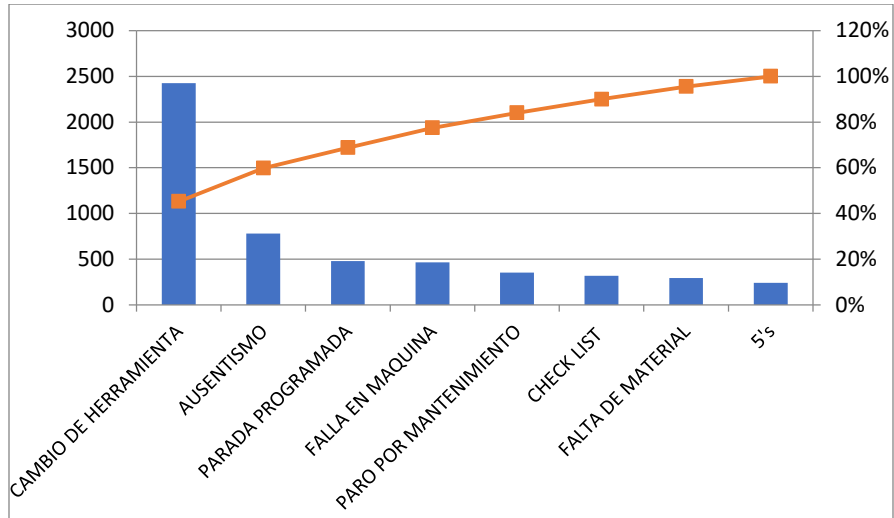


Figura 10. Diagrama de Pareto de modelo MX.0001 OP 20-30. Fuente: Elaboración propia, 2018.

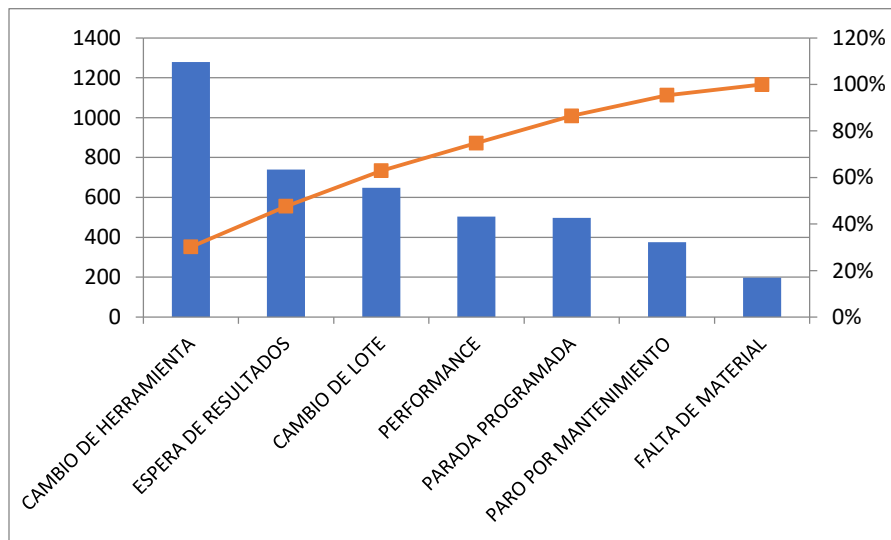


Figura 11. Diagrama de Pareto de modelo MX.0001 OP 40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

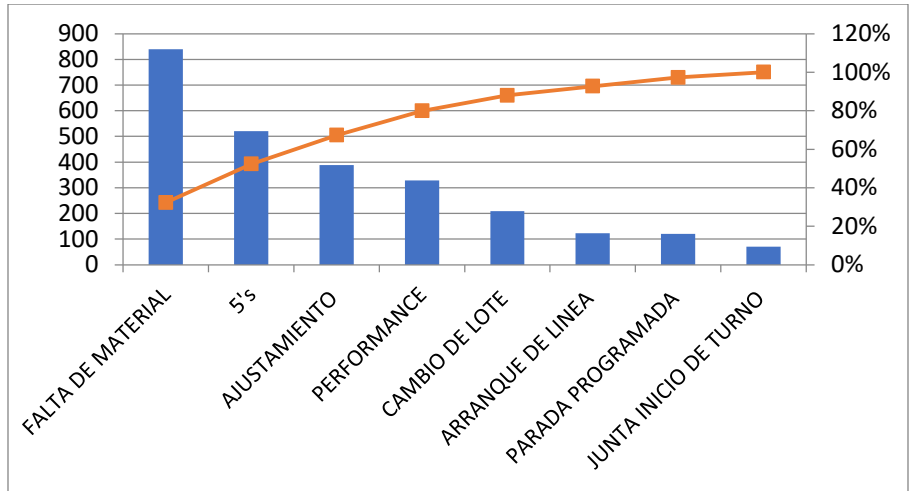


Figura 12. Diagrama de Pareto de modelo MX.0003 OP 00. Fuente: Elaboración propia, 2018.

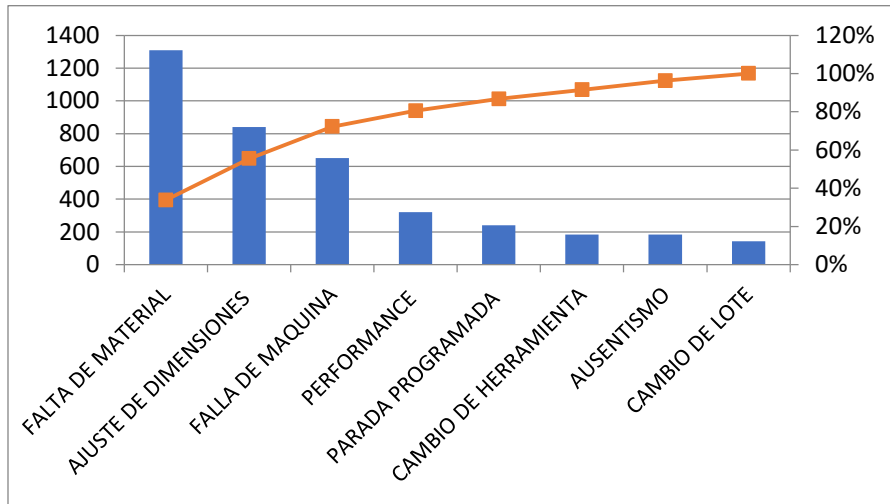
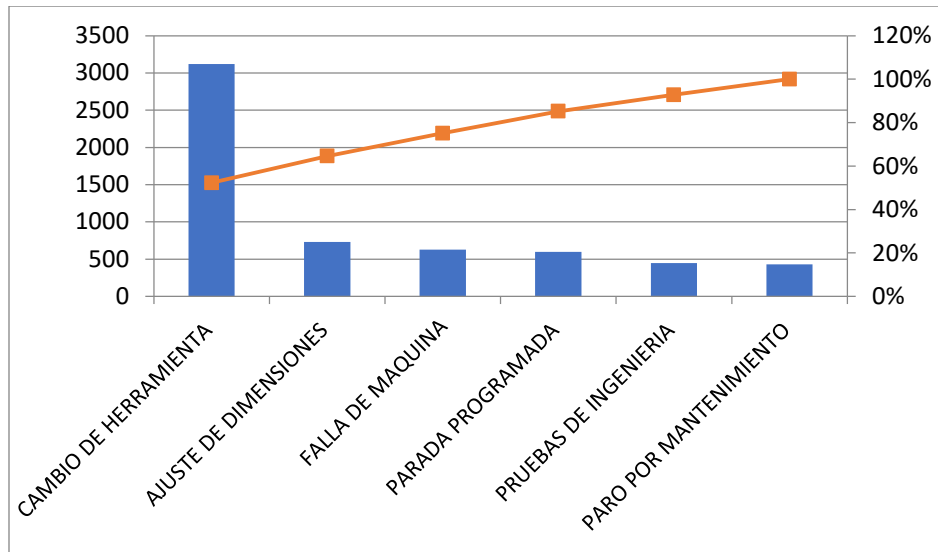


Figura 13. Diagrama de Pareto de modelo MX.0003 OP 10. Fuente: Elaboración propia, 2018.



**Figura 14. Diagrama de Pareto de modelo MX.0003 OP 20-40. Fuente: Elaboración propia, 2018.**

Parte del problema fue atribuido a paros en las estaciones de trabajo por falta de material, lo cual afectaba directamente en el plan de producción y es en dicho factor donde el departamento de control de producción necesitaba realizar una intervención.

Para controlar dicha condición fue necesario conocer cuánto material demanda cada celda de trabajo (cliente interno). Para lo anterior, se aplicó la metodología de teoría de colas.



### III. MARCO TEÓRICO.

A continuación, se hace mención sobre la metodología que se emplea en el presente proyecto, así mismo, se describen los conceptos de los temas para facilitar la comprensión del lector.

#### Teoría de colas.

En la actualidad, empresas de manufactura y todo tipo de servicios están prestando interés en el uso de esta herramienta como un medio para la toma de decisiones con el fin de ser más competitivas (WEATHERFORD, 2000).

En este caso particular se usará el termino **servicio** en el sentido de maquinado por las celdas de trabajo y al termino **cliente** en referencia a los lotes que esperan para ser maquinados.

#### Componentes de un sistema de colas.

El siguiente gráfico muestra los elementos que componen un sistema de colas:

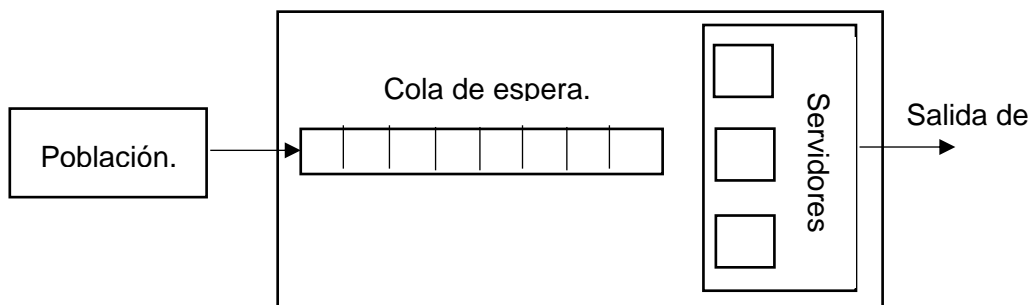


Figura 15. Componentes de un sistema de colas.

A continuación se describe a detalle cada uno de los elementos que conforman a un sistema de colas (KRAJEWSKI LEE, 2007)

- Población:

La población es el conjunto de todos los clientes potenciales del sistema, que tarde o temprano requerirán del servicio que el sistema puede brindar. Su principal característica es que su tamaño puede ser *finito* o *infinito*.

- Cola o línea de espera:

Es el conjunto de clientes que esperan en la línea para ser atendidos. Al igual que la población, las líneas tienen determinado tamaño que puede ser *finito* o *infinito*. Su comportamiento está dado por la tasa de llegada y la tasa de servicio.

- Servidores:

Es el elemento del sistema que se encarga de brindar el servicio al cliente que lo requiere. El tiempo que demora el servicio al cliente puede ser variable o contante, lo cual se explica más adelante.

### Terminología.

- **Patrón de llegadas ( $\lambda$ ).** Es la frecuencia o tasa media en unidad de tiempo de las llegadas de los clientes al sistema, determinada por el tiempo que transcurre entre la llegada de un cliente y otro.
- **Patrón de servicio ( $\mu$ ).** Es la frecuencia o la tasa media en unidad de tiempo del servicio, el tiempo que le toma a un servidor atender a un cliente.
- **Disciplina de la línea de espera.** Es el orden en el cual se le atiende al cliente. Existen diferentes disciplinas mediante las cuales se puede comportar un sistema, a continuación, se describa cada una de ellas:
  - FIFO:** Es la abreviación en inglés de *First in-First out*. Esta disciplina consiste en atender al primer cliente en la fila, el cliente que llegó primero al sistema.
  - LIFO:** Es la abreviación en inglés de *Last in-First out*. Esta disciplina consta en atender al último cliente que arribó al sistema, el último cliente es el primero en salir del sistema.

- **Capacidad del sistema.** Es el número máximo de clientes que pueden ser admitidos dentro del sistema, ya sea dentro de la línea de espera o siendo atendidos
- **Estado del sistema.** Es la cantidad de clientes que se encuentran dentro del sistema, ya sea dentro de la línea de espera o siendo atendidos por algunos de los servidores. También se expresa de probabilidad de ocio de los servidores o alguno de ellos.
- **Longitud de la línea de espera.** Es el número de clientes que se encuentran en espera de ser atendido por alguno de los servidores.

Sistema de servicio.

El sistema de servicio puede describirse en términos del número de filas y la distribución de las instalaciones.

- **Numero de filas.** Las filas de espera se diseñan en forma de una sola fila o múltiples filas tal como se muestra en las siguientes imágenes:

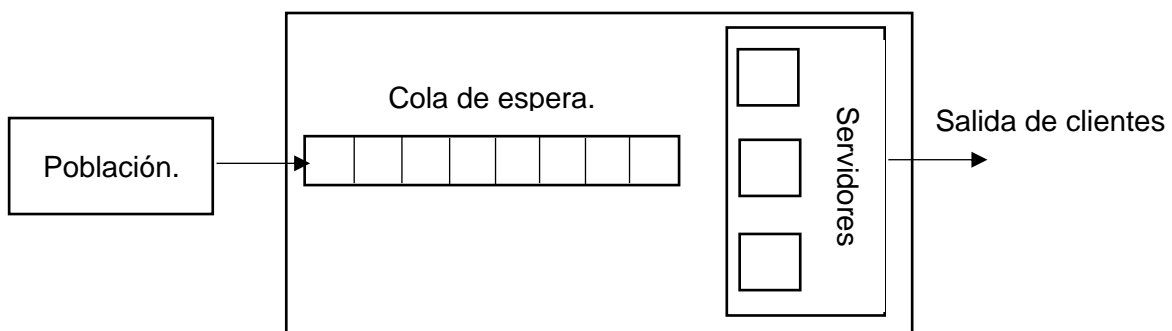


Figura 16. Sistema con una sola fila. Fuente: Elaboración propia, 2018.

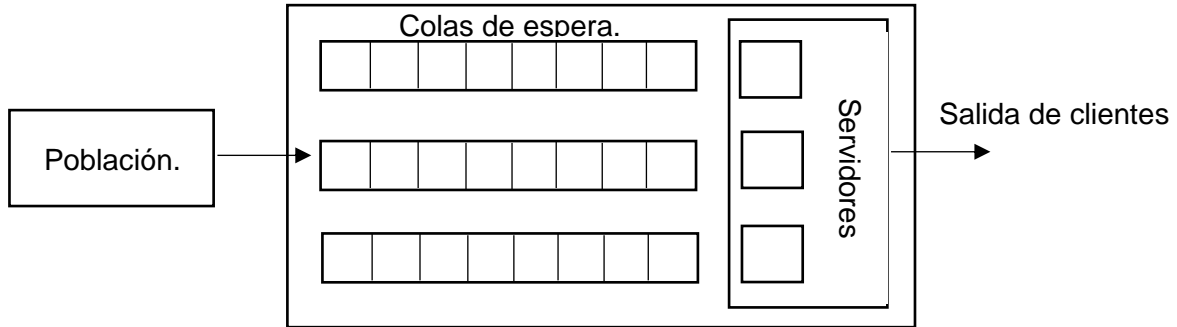


Figura 17. Sistema con múltiples filas. Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el caso del presente trabajo, cada celda de trabajo tiene su línea de espera en paralelo, de tal manera que el cliente llega a la línea de espera que tenga espacio o más próxima a desocuparse.

- **Distribución del servicio.**

La distribución del servicio consiste en la planeación del personal y equipo necesario para que el cliente pueda ser atendido de acuerdo a sus requerimientos. Esto se define por el número de canales y el número de fase. Un **canal** es una o más instalaciones necesarias para brindar el servicio requerido por el cliente. Una **fase** es un solo paso en la instalación del servicio. Algunos servicios requieren de múltiples fases para completar un servicio, fases que se distribuyen de acuerdo a las características y particularidades del servicio que el cliente requiere. (KRAJEWSKI LEE, 2007)

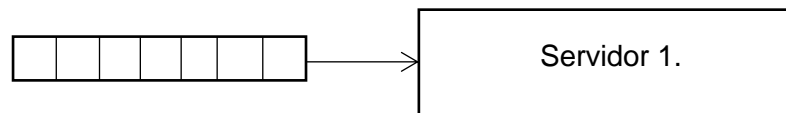
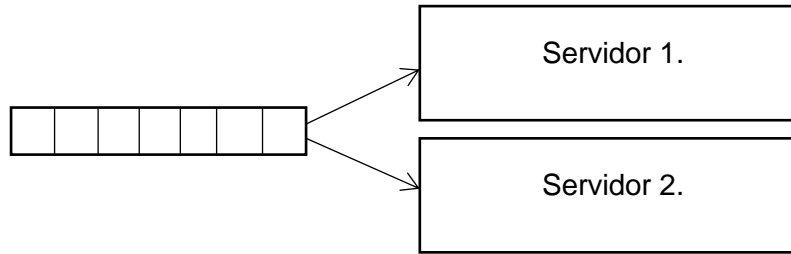
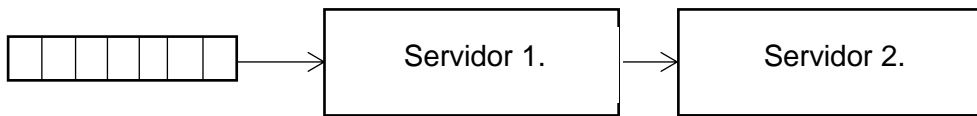


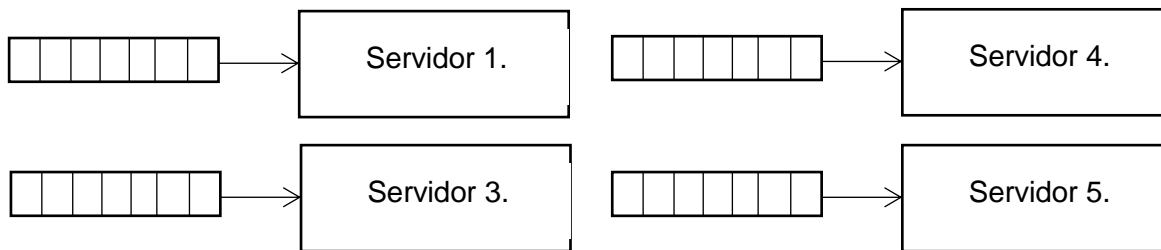
Figura 18. Un solo canal, una sola fase. Fuente: Elaboración propia, 2018



**Figura 19. Múltiples canales, una sola fase.**



**Figura 20. Un solo canal, múltiples fases. Fuente: Elaboración propia, 2018.**



**Figura 21. Distribución mixta. Fuente: Elaboración propia, 2018**

En el caso de este proyecto, algunos servidores aplican en el modelo de un solo canal; y otros aplican para el modelo mixto.

Notación de Kendall-Lee

Una notación cómoda para resumir las particularidades de un sistema de líneas de espera es el que presenta el siguiente formato:

**(A/S/C/K/N/D)**

En dónde: A= Distribución de las llegadas. (D. G. KENDALL, 1953).

**M:** Tiempo entre llegadas con distribución exponencial.

**G:** Tiempo de llegadas con distribución general (Constante).

**E:** Tiempo entre llegadas con distribución de Erlag.

S= Distribución de salidas (o tiempo de servicio). (D. G. KENDALL, 1953).

**M:** Servicio con distribución exponencial.

**G:** Servicio con distribución general.

**E:** Servicio con distribución de Erlag.

C= Cantidad de servidores. (D. G. KENDALL, 1953)

K= Indica la capacidad del sistema, es decir, el número máximo de clientes que se pueden admitir (incluye el número de servidores). (A. M. LEE, 1966).

N= Indica el tamaño de la población, la cual puede ser finita o infinita. (A. M. LEE, 1966).

D= Disciplina de la cola. (FIFO, LIFO, etc).

Los primeros tres elementos de la notación (A, S, C) fueron inventados por D. G. Kendall en el año de 1953. Después, en el año de 1966, A. M. Lee agregó el resto de los símbolos.

Con esta notación es fácil abreviar un modelo de línea de espera, lo cual es de gran ayuda para saber que modelos matemáticos aplicar.

### Medidas de desempeño.

Las medidas de desempeño de una cola son las siguientes:

- **L** = Cantidad esperada de clientes en el *sistema*.
- **Lq** = Cantidad esperada de clientes en la *cola*.
- **W** = Tiempo estimado de espera en el sistema.
- **Wq** = Tiempo estimado de espera en la cola.

### Ley de Little.

Esta ley matemática fue demostrada en 1961 por John D. C. Little, profesor del MIT Sloan School of Management.

Su forma básica es la siguiente:

$$L = \lambda W$$

Como sabemos, **L** es la cantidad media de clientes esperados en el sistema;  **$\lambda$**  es la frecuencia media en la que los clientes arriban al sistema sobre unidad de tiempo; **W** es el tiempo estimado medio que un cliente espera en el sistema;

En este caso de estudio, **L** es el inventario de producto en proceso (Work in progress, W.I.P.);  **$\lambda$**  es la producción media por las celdas de maquinado en unidad de tiempo; **W** es el Lead time medio, como ya se mencionó, el tiempo que un cliente pasa en el sistema.

### Distribución de Poisson.

La aportación del modelo probabilístico fue hecha por el físico y matemático Siméon-Denis Poisson, que la dio a conocer en 1838 en su trabajo *Investigación sobre la probabilidad de los juicios en materias criminales y civiles*.

Las fuentes de variación en los problemas de líneas de espera provienen del comportamiento aleatorio que toman las llegadas de los clientes y la variación de los clientes que son atendidos por el sistema en una unidad de tiempo.

La llegada de los clientes al sistema tiene un comportamiento aleatorio. La variabilidad en la cantidad de clientes (**n**) se describe por medio de una curva de distribución de Poisson.

La función de esta curva es la siguiente:

$$P(n) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

A continuación, se muestran gráficos como ejemplo del comportamiento que toman las curvas con diferente valor de  $\lambda$ .

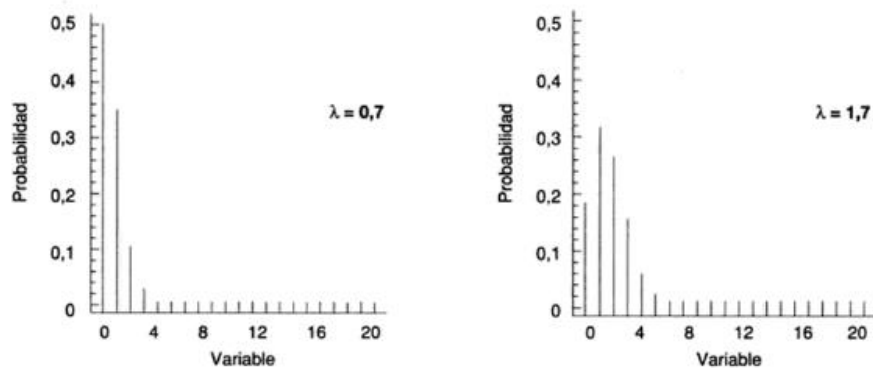


Figura 22. Distribución de Poisson con diferentes valores de  $\lambda$ . Fuente: Manual de estadística univesitaria, 1995.

### Cadenas de Markov.

Las cadenas de Markov, aplicadas en líneas de espera, permiten desarrollar ecuaciones de equilibrio de una forma muy sencilla en sistemas estacionarios, con uno o más servidores en paralelo, en donde el tiempo de llegadas y de servicio se distribuye de manera exponencial. Como comienzo, se establecen los nodos enumerados hasta **K**. Cada nodo representa un estado estacionario para el cual existe una probabilidad de que el sistema se encuentre en dicho estado.

Las flechas señalan la dirección de las transiciones, donde, pasar al estado siguiente está definido por la tasa  $\lambda$  y pasar al estado anterior depende de la tasa  $\mu$ .

La siguiente figura representa una cadena de Markov de estado estable.



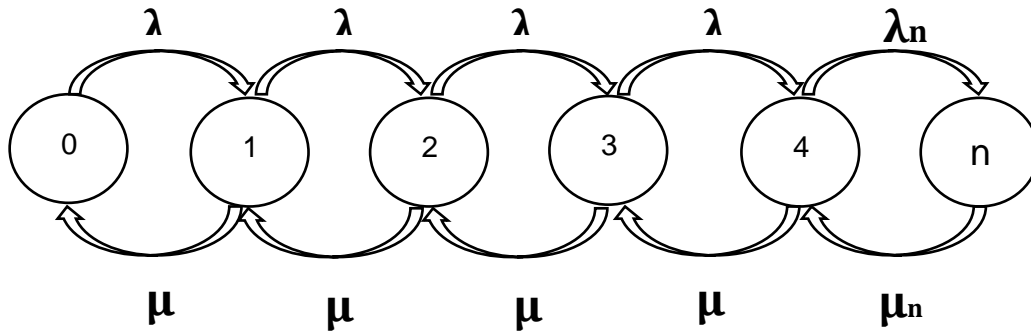


Figura 23. Cadena de markov. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Las ecuaciones de equilibrio son las siguientes:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + \mu p_2$$

$$\lambda p_2 + \mu p_2 = \lambda p_1 + \mu p_3$$

$$\lambda p_3 + \mu p_3 = \lambda p_2 + \mu p_4$$

$$\lambda p_4 + \mu p_4 = \lambda p_3 + \mu p_n$$

$$\mu p_n = \lambda p_n$$

Dónde:  $P = p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_n = 1$

#### Modelos M/M/1/K y M/M/C/K.

Para el caso de estudio, se seleccionaron los dos modelos mencionados debido a que los sistemas que se analizan tienen las características que encajan perfectamente con tales modelos. Es decir, los sistemas analizados presentan una distribución exponencial entre llegadas (**M**); presentan una distribución exponencial entre tiempos de servicio (**M**); algunas celdas de trabajo cuentan solo con un servidor y otras cuentan múltiples servidores (**C**); todas las celdas tienen la peculiaridad de tener una capacidad limitada para el arribo de los lotes (**K**).

Tales modelos cuentan con principios y ecuaciones particulares que han sido demostradas.

### Ecuaciones del modelo M/M/C/K

- Factor de utilización ( $\rho$ ):

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

- Probabilidad de que haya cero elementos en el sistema ( $P_0$ ):

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{c!} \sum_{n=c+1}^K \rho^{n-c}}$$

- Probabilidad de  $n$  clientes en el sistema ( $P_n$ ):

$$P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} P_0 \quad \text{Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{c!c^{n-c}} P_0 \quad \text{Para } n = c+1, \dots, K$$

- Número de clientes en la línea de espera ( $L_q$ ):

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c!(1-p)^2} P_0 (1 - \rho^{K-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

- Número estimado de clientes en el sistema ( $L$ ):

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

- Aplicando la ley de Little podemos obtener el *Throughput rate*, dónde, para modelos con capacidad limitada la fórmula es la siguiente:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

- Tiempo estimado que cada cliente gasta en el sistema ( $W$ ):

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

- Tiempo estimado que cada cliente gasta solo en la línea de espera ( $W_q$ ):

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$$

### Ecuaciones para el modelo M/M/1/K

- Factor de utilización ( $\rho$ ):

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

- Probabilidad de que haya cero clientes en el sistema ( $P_0$ ):

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

- Probabilidad de  $n$  clientes en el sistema ( $P_n$ ):

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

- Número estimado de clientes en la fila ( $L_q$ ):

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

- Número estimado de clientes en el sistema ( $L$ ):

$$L = \sum_{n=1}^k nP_k$$

- Aplicando la ley de Little podemos obtener el *Throughput rate*, dónde, para modelos con capacidad limitada la fórmula es la siguiente:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

- Tiempo estimado que cada cliente gasta en el sistema ( $W$ ):

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$


- Tiempo estimado que cada cliente gasta solo en la línea de espera ( $W_q$ ):

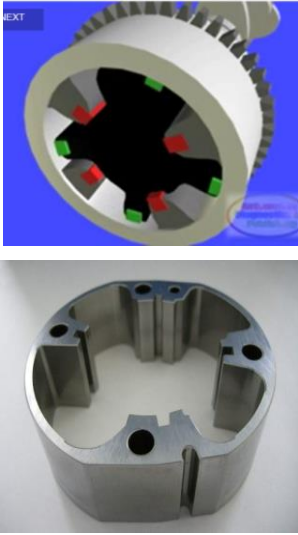
$$W_q = W - \frac{1}{\mu}$$


## II. METODOLOGÍA DERSARROLLADA.

Conocer los diferentes modelos fabricados por SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V.

A continuación, se muestran los diferentes modelos y algunas de sus características básicas.

NUMERO DE PARTE.	NOMBRE DE PARTE.	¿QUÉ ES?	¿CUÁL ES SU FUNCIÓN?
<p><b>MX.0001</b></p> 	<p>INTAKE HOUSING VANE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Partes de automóvil</li> <li>-Partes de motor</li> <li>- Sistema de tiempo</li> <li>- Válvula de distribución variable (VVT) para el árbol de levas.</li> <li>-Son de acero</li> <li>-Fe, Cu, C</li> <li>-Piezas fabricadas a partir de metalurgia de polvo</li> </ul>	<p>El presente componente trabajando en conjunto con un rotor, tiene la función de una válvula mecánica hidráulica que permite el funcionamiento de la VVT, un sistema que hace variar el tiempo de apertura y cierre de las válvulas de admisión de aire (o escape de gases) en un motor de combustión interna.</p>

NUMERO DE PARTE.	NOMBRE DE PARTE.	¿QUÉ ES?	¿CUÁL ES SU FUNCIÓN?
<p><b>MX.0003</b></p> 	<p>EXHAUST HOUSING VANE.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Partes de automóvil</li> <li>-Partes de motor</li> <li>- Sistema de tiempo</li> <li>- Válvula de distribución variable (VVT) para el árbol de levas.</li> <li>-Son de acero</li> <li>-Fe, Cu, C</li> <li>-Piezas fabricadas a partir de metalurgia de polvo</li> </ul>	<p>El presente componente trabajando en conjunto con un rotor, tiene la función de una válvula mecánica hidráulica que permite el funcionamiento de la VVT, un sistema que hace variar el tiempo de apertura y cierre de las válvulas de admisión de aire (o escape de gases) en un motor de combustión interna.</p>


NUMERO DE PARTE.	NOMBRE DE PARTE.	¿QUÉ ES?	¿CUÁL ES SU FUNCIÓN?
<p><b>MX0020</b></p> 	<p>CARRIER PLANETARIUM COMPLET.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Partes de automóvil</li> <li>-Partes de Trasmisión</li> <li>- Sistema de trasmisión</li> <li>- Engrane Planetario de trasmisión.</li> <li>-Son de acero</li> <li>-Fe, Cu,</li> <li>-Piezas fabricadas a partir de metalurgia de polvo</li> </ul>	<p>Una caja de engranajes planetaria es un sistema para ensamble de engranajes utilizado para aumentar el par de fuerzas de salida, su función principal es modular la velocidad de rotación y la dirección de giro de los neumáticos.</p>

Identificar las operaciones por las que pasan los presentados.

**Celdas de trabajo y operaciones del modelo MX.0001.**

<p style="text-align: center;"><b>OP 10</b></p>	<p>La operación 10 es una sola celda de trabajo que consta de dos líneas (OP10 A y OP10 B) operadas por un solo operario.</p> <p>En esta operación se le hace un desgaste con una piedra en ambas caras a la pieza para eliminar bordes no deseados y obtener la altura deseada.</p> <p>Cada OP10 cuenta con su propia área de recepción; antes de maquinar y después de maquinar.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>OP 20-30</b></p>	<p>Una sola celda de trabajo está compuesta por las operaciones 20 y 30; ambas maquinas son operadas por un solo operador. Son 3 líneas en paralelo.</p> <p>La OP20 consta en hacer un cepillado en ambas caras con un cepillo metálico.</p> <p>La OP30 consta en hacer un maquinado para hacer chaflanes externos de la pieza chaflanes para cada uno de los barrenos.</p> <p>Después de que la pieza fue maquinada el operador hace una inspección con JIGs y</p>	



	Go-No-Gos.	
<b>OP 40</b>	<p>Una celda de trabajo está compuesta por 2 OP40 (OP40 A y OP40 B) operadas por un solo operador.</p> <p>En esta operación se hacen los barrenos de 10mm y los chaflanes en cada uno de los barrenos.</p> <p>Hay dos líneas en paralelo donde cada línea tiene su área de recepción; antes de maquinar y después de maquinar.</p>	

**Celdas de trabajo y operaciones del modelo MX.0003.**

<p><b>OP 00</b></p>	<p>En esta celda de trabajo solo se encuentra una sola maquina (OP00).</p> <p>En esta operación consta en introducir a las piezas a un JIG GO-No-GO para detectar piezas NG fuera de especificación por diámetro interior.</p> <p>Esta línea tiene su área de recepción de material; antes y después de pasar después de la línea.</p>	
<p><b>OP 10</b></p>	<p>La operación 10 es una sola celda de trabajo que consta de dos líneas (OP10 A y OP10 B) operadas por un solo operario.</p> <p>En esta operación se le hace un desgaste con una piedra en ambas caras a la pieza para eliminar bordes no deseados y obtener la altura deseada.</p> <p>Cada OP10 cuenta con su propia área de recepción; antes de maquinar y después de maquinar.</p>	

**OP 20-40**

Esta celda de trabajo está compuesta por tres operaciones; OP 20, OP 30 y OP40.

En la operación 20 a se hace un cepillado en ambas caras con un cepillo metálico para eliminar rebaba de proveniente de la OP10.

En la operación 30 Se le hacen barrenos de 10mm a la pieza y chaflán en cada barreno.

La operación 40 hace chaflanes en las caras de la pieza, para eliminar filos.


Al final, el operador hace una inspección con un JIG y un GO-No-GO

Hay tres líneas en paralelo, donde, cada línea tiene su área de recepción antes y después de maquinado.



**MX.0020**

<p><b>OP 10-20</b></p>	<p>Es una celda de trabajo conformada por dos operaciones y operada por un solo operador.</p> <p>En la operación 10 se le hace un desgaste a la pieza en el spline para darle la forma curva requerida.</p> <p>En la operación 20 se le hace un ligero desgaste a la pieza en el dentado del boss; también se le hacen chaflanes en el diámetro exterior del boss.</p>	
<p><b>OP 40-70</b></p>	<p>De estas líneas hay 4.</p> <p>Las operaciones que conformas cada celda son las siguientes:</p> <p>OP40: En esta operación se le hace careado al spline.</p> <p>OP50: En esta operación se le hace un careado al bridge.</p> <p>OP55: En esta operación se le hacen barrenos de 9mm.</p> <p>OP60: Se le hacen barrenos de 10 mm</p>	

	<p>ampliando los barrenos de 9 mm de la operación anterior. Se le hace chaflán en cada barreno.</p> <p>OP70: Aquí se la hacen barrenos de 3mm en laterales del spline.</p>	
<p><b>OP 80-90</b></p>	<p>Hay dos líneas de OP 80-90.</p> <p>Cada celda de trabajo es operada por un solo operador.</p> <p>En la operación 80 se le hace un rectificado y chaflán al interior del boss.</p> <p>En la operación 90 se le hace un lavado a la pieza.</p>	

Cabe mencionar que los modelos que se muestran son solo los involucrados en el proyecto.

Elaboración de tabla de capacidades.

Anteriormente, el departamento de control de producción no contaba con una tabla en la cual se pudieran visualizar fácilmente las capacidades de cada proceso de todos los modelos. Decidí elaborar dicha tabla con el objetivo de facilitar el desarrollo del presente proyecto.

La tabla es la siguiente:

Numero de parte.	Procesos.									Piezas/hora		
	Area de Blanking						Area de maquinado					
	Compactado	Sinterizado	Dimensionado	Dureza por inducción	Templado	Magnaflux	OP 10	OP 20-30	OP 40			
MX.0001	540	1091	630			293	150	100	135	Piezas/hora		
MX.0003	540	1091	630			320	OP 00 450	OP 10 150	OP 20-40 95	Piezas/hora		
MX.0020	MX.0017 300	MX.0018 480	436	480	152	162	1ra insp. 160	2da insp. 220	OP 10-20 88	OP 40-70 22	OP 80-90 55	Piezas/hora
MX.0022	510	1260	672			220	Maquinado Mazda		Mazda Visión	Piezas/hora		
MX.0023	510	907	672			140	Maquinado Mazda		Mazda Visión	Piezas/hora		
							80	113				
MX.0024	480	720	672			135	Maquinado Mazda		Mazda Visión	Piezas/hora		
								113				
MX.0025	480	720	672			135	Maquinado Mazda		Mazda Visión	Piezas/hora		
								113				
MX.0029	510	1260	672			220	Maquinado Mazda		Mazda Visión	Piezas/hora		
							117	113				
MX.0027	540	2260	690			980	Maquinado Maverik			Piezas/hora		
							113					
MX.0028	540	2260	690			980	Maquinado Maverik			Piezas/hora		
							113					

Figura 24. Tabla de capacidades. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Elaboración de diagramas para la visualización de los procesos de maquinado.

A continuación se muestran los diagramas elaborados donde se puede visualizar el área de recepción por cada servidor, así como el número de servidores.

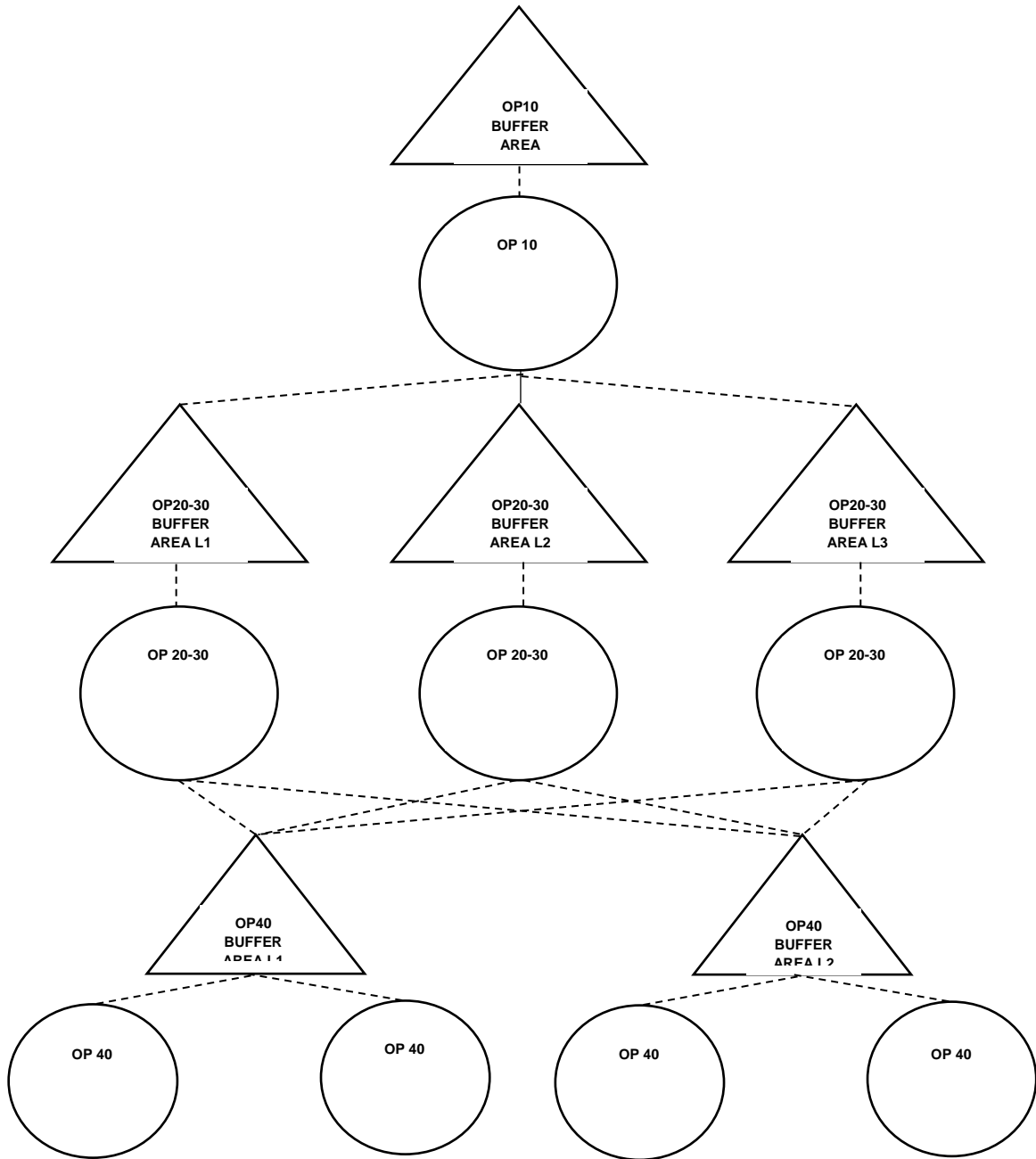


Figura 25: Área de maquinado del modelo MX.0001. Fuente: Elaboración propia, 2018.



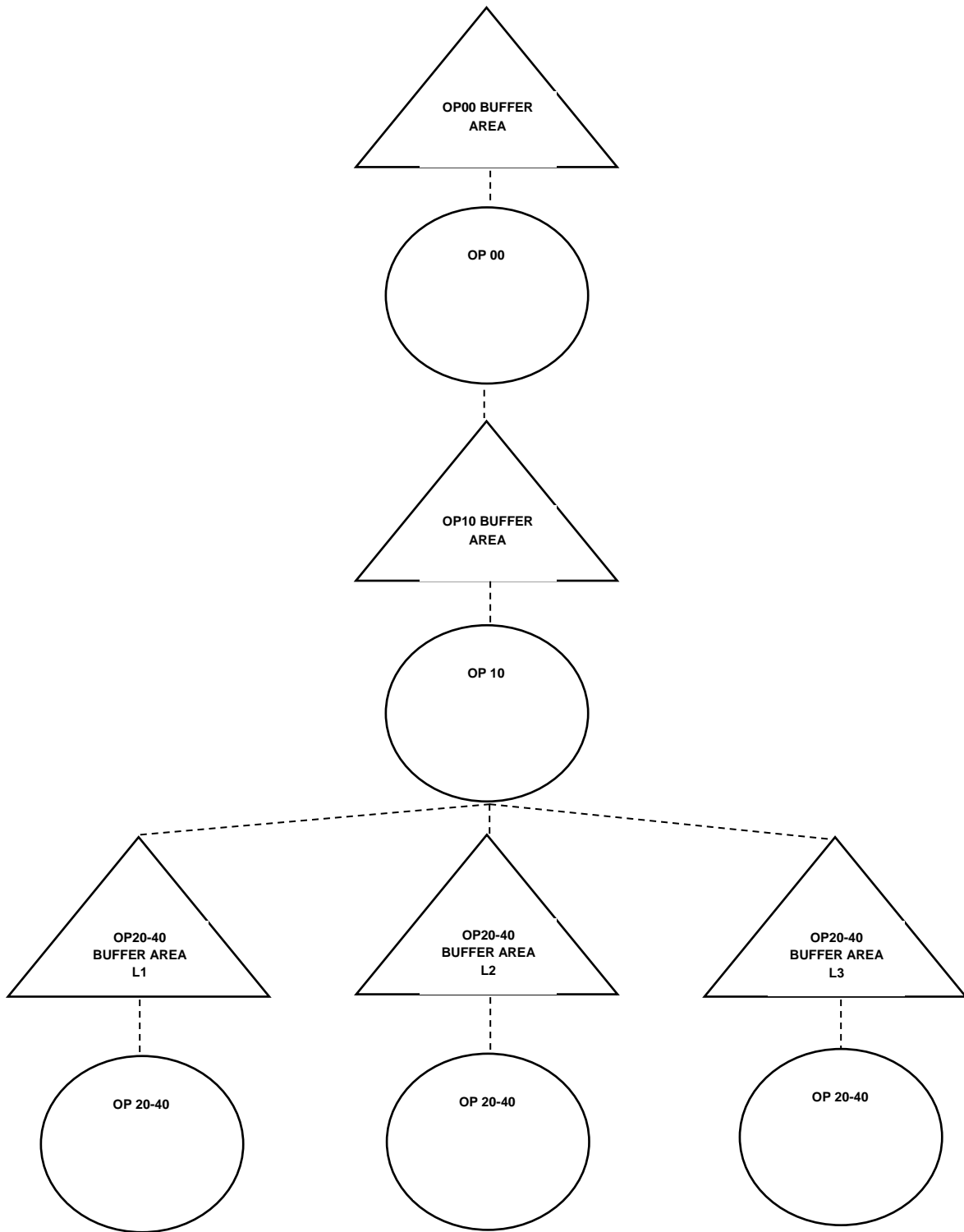


Figura 26. Área de maquinado del modelo MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

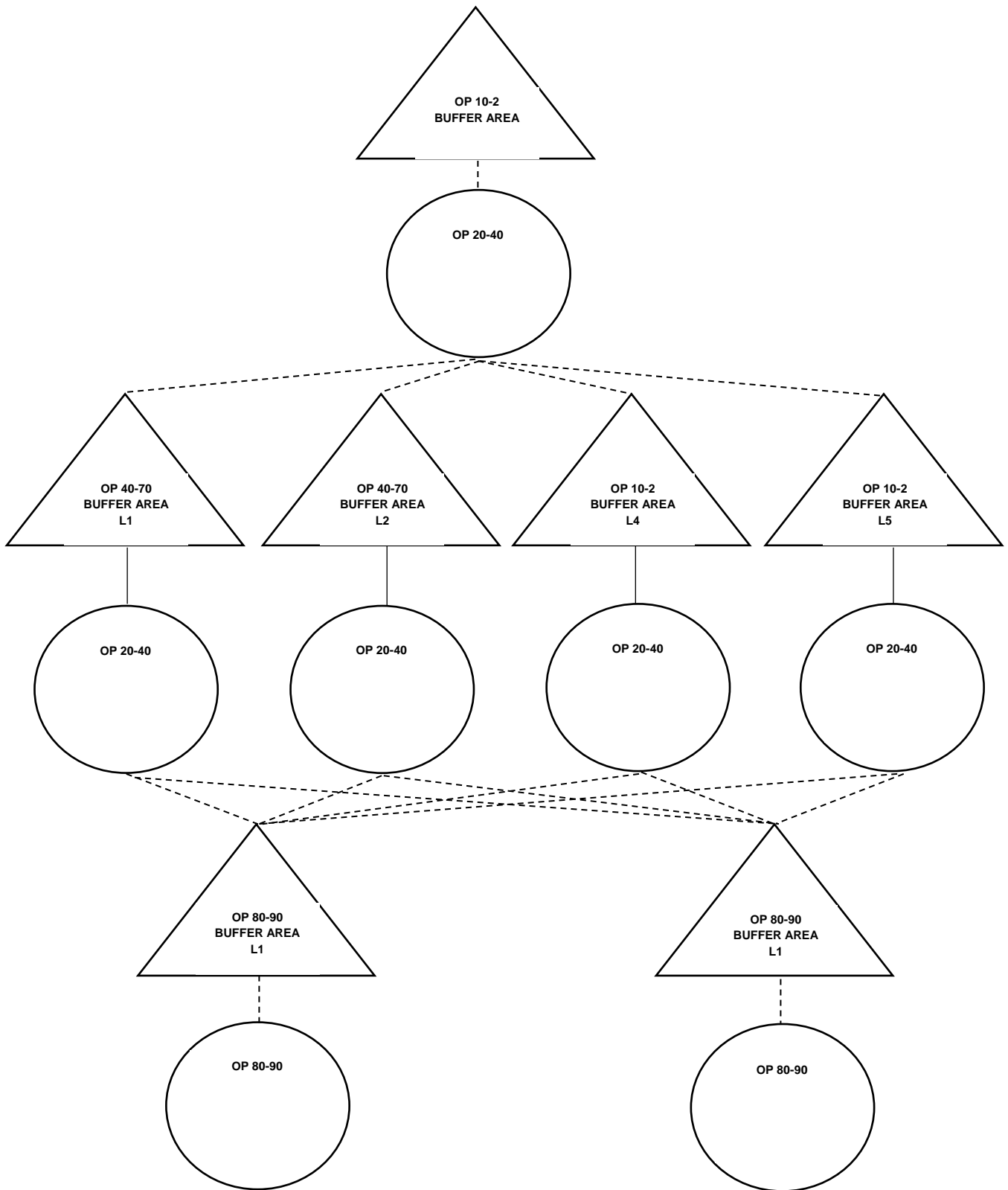
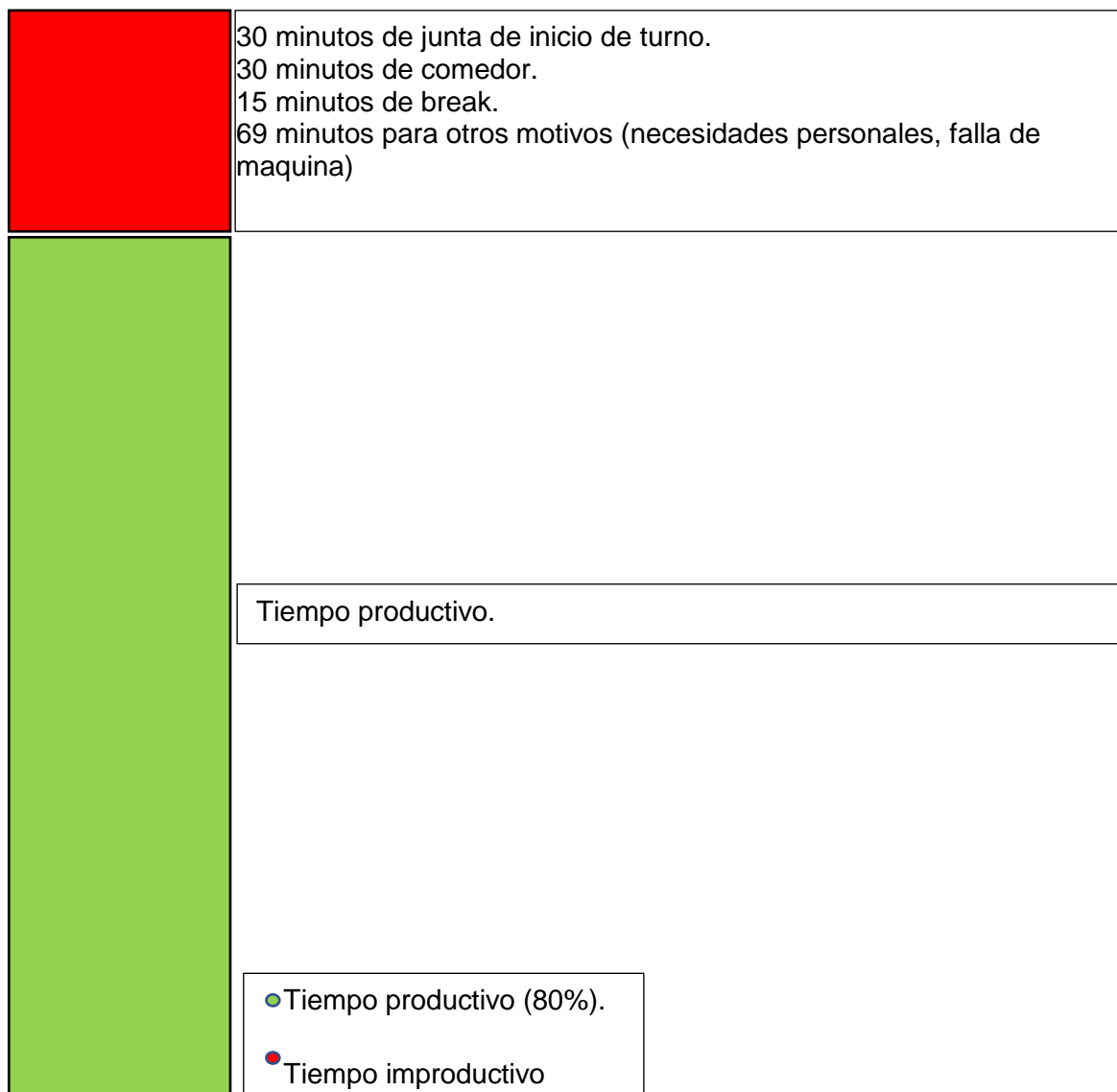


Figura 27. Área de maquinado del modelo MX.0020. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Diagrama de tiempo productivo e improductivo.



**Figura 28. Tiempo productivo e improductivo de un solo turno. Fuente: Elaboración propia, 2018.**

El diagrama anterior muestra el tiempo productivo y el tiempo improductivo de un solo turno (12 horas). Para los cálculos realizados se utilizó la unidad de tiempo de un día, un día laboral que constó en multiplicar el tiempo productivo del diagrama por dos (dos turnos por día).

Resultados de producción del mes de octubre.

La siguiente tabla fue elaborada con el objeto de comparar los resultados reales de mes de octubre con los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos de la teoría de colas.

		MX.0001																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	MEDIA	
OP10		3300	5856	5789	4836	3414	4429	0	5085	5120	4955	5102	5154	2720	0	5610	5689	5239	5373	4443	1894	0	5013	5729	6297	6481	5960	5141	0	4679	4137	4901.73	
	LOTES	1.43	2.54	2.51	2.1	1.48	1.92	0	2.21	2.22	2.15	2.21	2.24	1.18	0	2.43	2.47	2.27	2.33	1.93	0.82	0	2.18	2.49	2.73	2.81	2.59	2.23	0	2.03	1.8	1.84	
	TH	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.2	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16		
OP20-30		2443	4938	6014	6184	5274	3568	0	5633	5669	5687	5990	5524	4338	0	5434	5972	6197	6105	5834	5590	0	5793	5860	5004	5089	5558	5536	0	5197	5255	5372.54	
	LOTES	1.06	2.14	2.61	2.68	2.29	1.55	0	2.44	2.46	2.47	2.6	2.4	1.88	0	2.36	2.59	2.69	2.65	2.53	2.43	0	2.51	2.54	2.17	2.21	2.41	2.4	0	2.26	2.28	2.02	
	TH	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.1	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06		
OP40		1885	4830	4322	4534	5675	5688	0	5752	5810	5538	5588	5631	5541	0	5277	5330	5822	5723	5749	5600	0	5625	5740	5650	5574	5708	5670	0	5560	5727	5367.27	
	LOTES	0.82	2.1	1.88	1.97	2.46	2.47	0	2.5	2.52	2.4	2.43	2.44	2.4	0	2.29	2.31	2.53	2.48	2.5	2.43	0	2.44	2.49	2.45	2.42	2.48	2.46	0	2.41	2.49	2.02	
	TH	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.8	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84		
		MX.0003																															
OP00		4460	8180	8050	6091	5544	6239	0	7362	6552	4139	8144	8551	4284	0	7961	4270	6576	8813	3948	0	0	4417	3769	3389	4786	4560	4466	0	4280	4834	5525.58	
	LOTES	1.94	3.55	3.49	2.64	2.41	2.71	0	3.2	2.84	1.8	3.53	3.71	1.86	0	3.46	1.85	2.85	3.83	1.71	0	0	1.92	1.64	1.47	2.08	1.98	1.94	0	1.86	2.1	2.08	
	TH	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.5	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	
OP10		2862	5920	5721	5910	6271	6235	0	6302	6061	5932	5687	6066	5825	0	6004	6250	5870	5988	6309	6259	0	3040	3250	5679	6450	2750	0	0	3256	3250	5121.04	
	LOTES	1.24	2.57	2.48	2.57	2.72	2.71	0	2.74	2.63	2.57	2.47	2.63	2.53	0	2.61	2.71	2.55	2.6	2.74	2.72	0	1.32	1.41	2.46	2.8	1.19	0	0	1.41	1.41	1.93	
	TH	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.1	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14		
OP20-40		2090	4834	4785	5809	5676	6020	0	5666	6081	5396	5303	5208	5907	0	5078	4522	5488	5503	5641	5286	0	5150	5902	5457	5616	4403	5240	0	4077	3981	5158.42	
	LOTES	0.91	2.1	2.08	2.52	2.46	2.61	0	2.46	2.64	2.34	2.3	2.26	2.56	0	2.2	1.96	2.38	2.39	2.45	2.29	0	2.24	2.56	2.37	2.44	1.91	2.27	0	1.77	1.73	1.94	
	TH	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
		MX.0020																															
OP10-20		562	1667	1746	1624	1698	1695	1572	1649	1645	1361	1381	1609	881	791	1738	1744	1590	1656	1608	1671	1197	1660	1677	1758	1630	1206	940	4	1677	1532	1660.35	
	LOTES	0.61	1.81	1.89	1.76	1.84	1.84	1.7	1.79	1.78	1.48	1.5	1.75	0.96	0.9	1.89	1.89	1.72	1.8	1.74	1.81	1.3	1.8	1.82	1.91	1.77	1.31	1.02	0	1.82	1.66	1.56	
	TH	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.5	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	
OP40-70		502	1086	1595	1550	1747	1783	1539	1719	1610	1563	1455	1628	855	788	1643	1652	1660	1646	1633	1315	1170	1426	1642	1619	1683	1708	1615	19	1507	1551	1650.35	
	LOTES	0.54	1.18	1.73	1.68	1.89	1.93	1.67	1.86	1.75	1.7	1.58	1.77	0.93	0.9	1.78	1.79	1.8	1.79	1.77	1.43	1.27	1.55	1.78	1.76	1.83	1.85	1.75	0.021	1.63	1.68	1.55	
	TH	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.2	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	
OP80-90		400	924	1458	1484	1336	1465	1741	1792	1686	1601	1911	1626	951	821	496	1907	1483	1868	1985	1496	877	1740	1600	1680	1024	1600	1791	5	1855	1673	1626.00	
	LOTES	0.43	1	1.58	1.61	1.45	1.59	1.89	1.94	1.83	1.74	2.07	1.76	1.03	0.9	0.54	2.07	1.61	2.03	2.15	1.62	0.95	1.89	1.74	1.82	1.11	1.74	1.94	0.0054	2.01	1.81	1.53	
	TH	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.9	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	

Figura 29. Tabla de resultados. Fuente: Elaboración propia, 2018.

## V. RESULTADOS.

### Aplicación de los modelos matemáticos.

Se aplican los modelos matemáticos para cada caso. Los resultados muestran un resultado idóneo y es por ello que en gráficas R se contrasta el throughput rate estimado y los resultados reales del mes de octubre con el fin de ver cómo se comporta en realidad cada sistema.

Se introdujeron al programa QM for Window con el objetivo de corroborar los datos y mostrar los gráficos de distribución de probabilidad de Poisson.

### **MX.0001 OP 10 M/M/2/6/∞/FIFO.**

Datos:  $\lambda = 2.5$  lotes/días.  $\mu = 1.3$  lotes/día.  $C = 2$ .  $K = 6$  lotes.

- Factor de Utilización:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$
$$\rho = \frac{2.5}{2(1.3)}$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

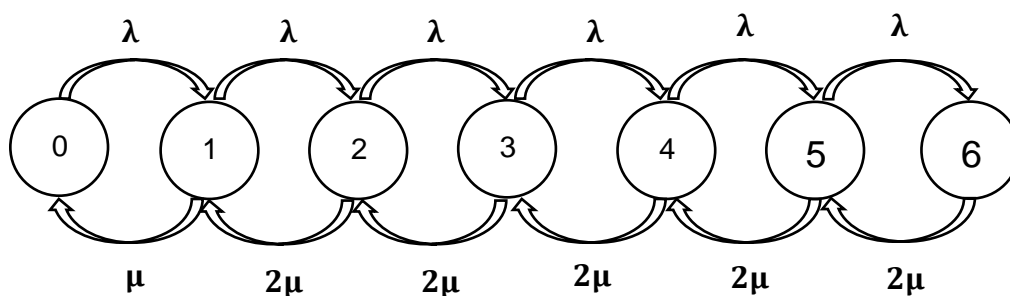


Figura 30. Cadena de Markov OP 10. Fuente: Elaboración propia, 2018

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 2\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 2\mu p_3 = \lambda p_2 + 2\mu p_4$$

$$\lambda p_4 + 2\mu p_4 = \lambda p_3 + 2\mu p_5$$

$$\lambda p_5 + 2\mu p_5 = \lambda p_4 + 2\mu p_6$$

$$2\mu p_6 = 2\lambda p_5$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Formula:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^2 \frac{(\frac{2.5}{1.3})^n}{n!} + \frac{(\frac{2.5}{1.3})^2}{2!} \sum_{n=2+1}^6 0.96 + 0.96^2 + 0.96^3 + 0.96^4}$$

$$P_0 = \frac{1}{11.465} = 0.0872$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Fórmula para  $n = 1, 2, \dots, c$ :  $P_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0$

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{(\frac{2.5}{1.3})^1}{1!} 0.0872 = 0.167$$

$$P_2 = \frac{(\frac{2.5}{1.3})^2}{2!} 0.0872 = 0.161$$

Fórmula Para  $n = c, c+1, \dots, K$   $P_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0$

Sustituyendo obtenemos:

$$P_3 = \frac{\left(\frac{2.5}{1.3}\right)^3}{2! 2^1} 0.0872 = 0.155$$

$$P_4 = \frac{\left(\frac{2.5}{1.3}\right)^4}{2! 2^2} 0.0872 = 0.1490$$

$$P_5 = \frac{\left(\frac{2.5}{1.3}\right)^5}{2! 2^3} 0.0872 = 0.1433$$

$$P_6 = \frac{\left(\frac{2.5}{1.3}\right)^6}{2! 2^4} 0.0872 = 0.1378$$

$$P = 0.0872 + 0.167 + 0.161 + 0.155 + 0.1490 + 0.1433 + 0.1378 = 1$$

- Número estimado de lotes en línea de espera:

Fórmula:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c! (1-p)^2} P_0 (1 - \rho^{k-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

Sustituyendo:

$$L_q = \frac{\left(\frac{2.5}{1.5}\right)^2 0.96}{2! (1-0.96)^2} 0.0872 (1 - 0.96^4 - (6-2)0.96^4(1-0.96))$$

$$L_q = 96.73[0.15 - (3.397)(0.04)]$$

$$L_q = 1.365 \text{ lotes/día}$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:  $L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n)$

Sustituyendo obtenemos:

$$L = 1.365 + \sum_{n=0}^{2-1} 1(0.167) + 2(1 - \sum_{n=0}^{2-1} 0.167)$$

$$L = 3.169$$

- Cantidad estimada de lotes que el sistema maquina por día:

Formula:  $\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$

Sustituyendo se obtiene:

$$\lambda_{ef} = 2.5(1 - 0.138)$$

$$\lambda_{ef} = 2.155 \text{ lotes/día}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema:

Formula:  $W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$

Sustituyendo se obtiene:

$$W = \frac{3.169}{2.155}$$

$$W = 1.47 \text{ días}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema:

Formula:  $W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$

Sustituyendo se obtiene:

$$W_q = \frac{1.365}{2.155}$$

$$W_q = 0.633 \text{ días}$$



La utilización del sistema es del 96 % lo cual es excelente, pues existe una probabilidad muy baja de que el sistema se encuentre ocioso. El tiempo estimado que un lote que pasa en el sistema es de 1.47 días. El tiempo estimado que pasa el lote en espera de 0.633 días. El nivel óptimo de WIP es de 3.198 lotes. El Throughput Rate es de 2.155 lotes por día.

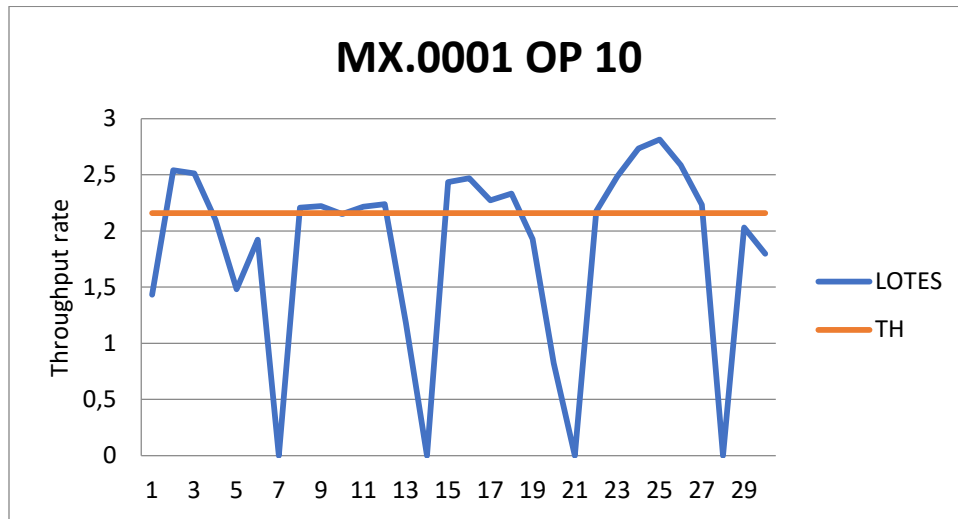


Figura 31. Grafica R de OP 10 MX.0001. Fuente: Elaboración propia, 2018

En el gráfico se puede observar que los valores reales en los días hábiles son muy cercanos al valor estimado. Hay algunos días donde la utilización del tiempo aumenta por encima del 80 %. Los días en los que la producción baja es debido a los siguientes factores: “operador en capacitación”, “falta de operador” y “falla en máquina”.

Parameter	Value	Parameter	Value	Hours (based on 8)	Hours (based on)
M/M/s with a Finite System Size		Average server utilization	83		
Arrival rate( $\lambda$ )	2.5	Average number in the queue(Lq)	1.43		
Service rate( $\mu$ )	1.3	Average number in the system(L)	3.09		
Number of servers	2	Average time in the queue(Wq)	.66	5.32	15.95
Maximum system size	6	Average time in the system(W)	1.43	11.47	34.41
		Effective arrival rate	2.16		
		Probability that system is full	.14		

Figura 32. Medidas de desempeño MX.0001 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys ≤ k)	Prob (num in sys > k)
0	.09	.09	.91
1	.17	.25	.75
2	.16	.42	.58
3	.15	.57	.43
4	.15	.72	.28
5	.14	.86	.14
6	.14	1	0

Figura 33. Probabilidad de n lotes MX.0001 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

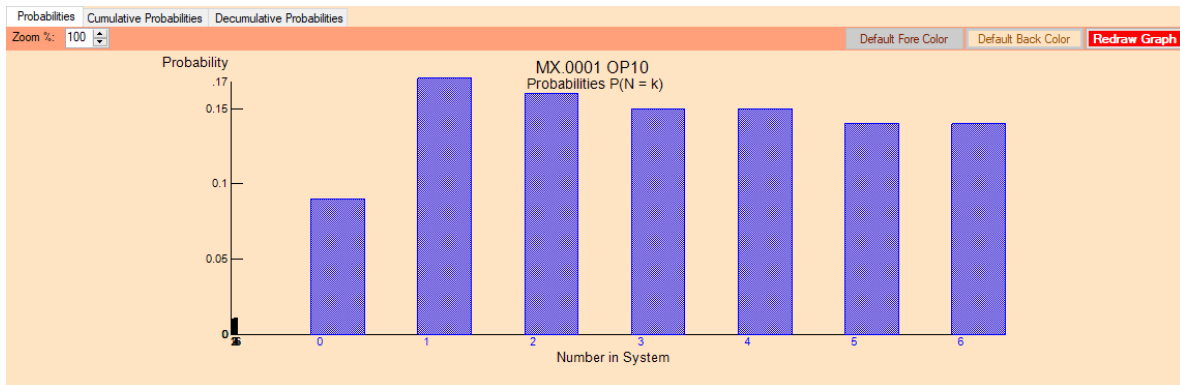


Figura 34. Distribución de Poisson MX.0001 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

### MX.0001 OP 20-30 M/M/3/9/∞/FIFO

Datos:  $\lambda = 2.155$  lotes por día.

$\mu = 0.87$  lotes por día por servidor.

$C = 3$  servidores.

$K = 9$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:  $\rho = \frac{\lambda}{n\mu}$

Sustituyendo:  $\rho = \frac{2.155}{3(0.87)}$

$$\rho = 0.825$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

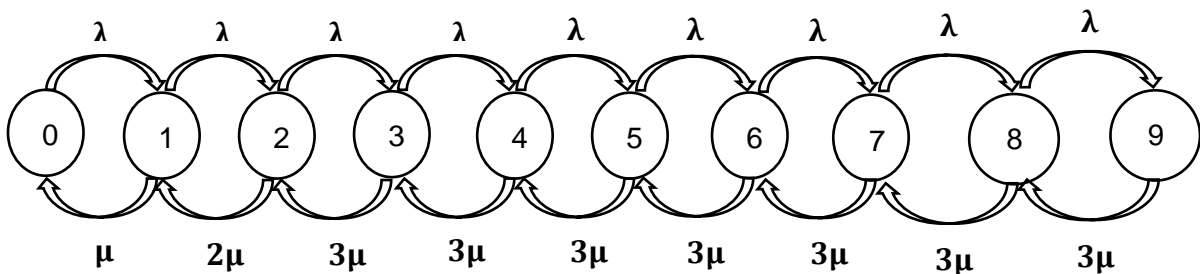


Figura 35. Cadena de Markov OP 20-30 MX.0001. Fuente: Elaboración propia, 2018

Dónde:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 3\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 3\mu p_3 = \lambda p_2 + 3\mu p_4$$

$$\lambda p_4 + 3\mu p_4 = \lambda p_3 + 3\mu p_5$$

$$\lambda p_5 + 3\mu p_5 = \lambda p_4 + 3\mu p_6$$

$$\lambda p_6 + 3\mu p_6 = \lambda p_5 + 3\mu p_7$$

$$\lambda p_7 + 3\mu p_7 = \lambda p_6 + 3\mu p_8$$

$$\lambda p_8 + 3\mu p_8 = \lambda p_7 + 3\mu p_9$$

$$3\mu p_9 = \lambda p_8$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya  $p_0$ :

Fórmula:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$= \frac{p_0}{\sum_{n=0}^3 \frac{(\frac{2.155}{0.87})^n}{n!} + \frac{(\frac{2.155}{0.87})^2}{2!} \sum_{n=3+1}^9 0.825 + 0.825^2 + 0.825^3 + 0.825^4 + 0.825^5 + 0.825^6}$$

$$p_0 = \frac{1}{17.244}$$

$$p_0 = 0.0579$$

- Probabilidad de que haya  $p_n$ :

Fórmula:

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0 \text{ Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0 \text{ Para } n = c+1, \dots, K$$

Sustituyendo:

$$p_1 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)}{1!} 0.0579 = 0.1434$$

$$p_2 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^2}{2!} 0.0579 = 0.1776$$

$$p_3 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^3}{3!} 0.0579 = 0.1466$$

$$p_4 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^4}{3! 3^{4-1}} 0.0579 = 0.1210$$

$$p_5 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^5}{5! 5^{5-3}} 0.0579 = 0.0999$$

$$p_6 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^6}{6! 6^{6-3}} 0.0579 = 0.0825$$

$$p_7 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^7}{7! 7^{7-3}} 0.0579 = 0.068$$

$$p_8 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^8}{8! 8^{8-3}} 0.0579 = 0.0562$$

$$p_9 = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^8}{9! 9^{9-3}} 0.0579 = 0.046$$

$$0.0579 + 0.1434 + 0.1776 + 0.1466 + 0.121 + 0.0579 + 0.0825 + 0.068 + 0.0562 + 0.016 = 1$$

- Número estimado de lotes en línea de espera:

Fórmula:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c!(1-p)^2} P_0(1 - \rho^{k-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

Sustituyendo:

$$L_q = \frac{\left(\frac{2.155}{0.87}\right)^3 0.825}{3!(1-0.825)^2} 0.0579(1 - 0.825^{9-3} - (9-3)0.825^9(1-0.825))$$

$$L_q = 1.968 \text{ lotes por día.}$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo:

$$L = 1.968 + \sum_{n=0}^{3-1} 0.1434 + 2(0.1776) + 3\left(1 - \sum_{n=0}^{3-1} 0.1434 + 0.1776\right)$$

$$L = 4.496 \text{ lotes por día.}$$

- Throughput rate estimado:

Fórmula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 2.155(1 - 0.046)$$

$$\lambda_{ef} = 2.06 \text{ lotes por día.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en espera:

Fórmula:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W_q = \frac{1.968}{2.06}$$

$$W_q = 0.95 \text{ días.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema (Lead Time):

Fórmula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{4.495}{2.06}$$

$$W = 2.18 \text{ días.}$$

Este sistema tiene un nivel de utilización del 82.5 % lo cual indica que existe una probabilidad de que el sistema se encuentre vacío de 5.8 %, esto debido a la tasa de llegadas es ligeramente inferior a la capacidad de las maquinas. El nivel óptimo de WIP es de 4.496 lotes por día. El tiempo estimado que pasa en lote en el sistema es de 2.18 días y el tiempo estimado que un lote pasa en espera para comenzar a ser maquinado es de 0.95 días. Este sistema tiene un througput rate estimado de 2.06 lotes por día.

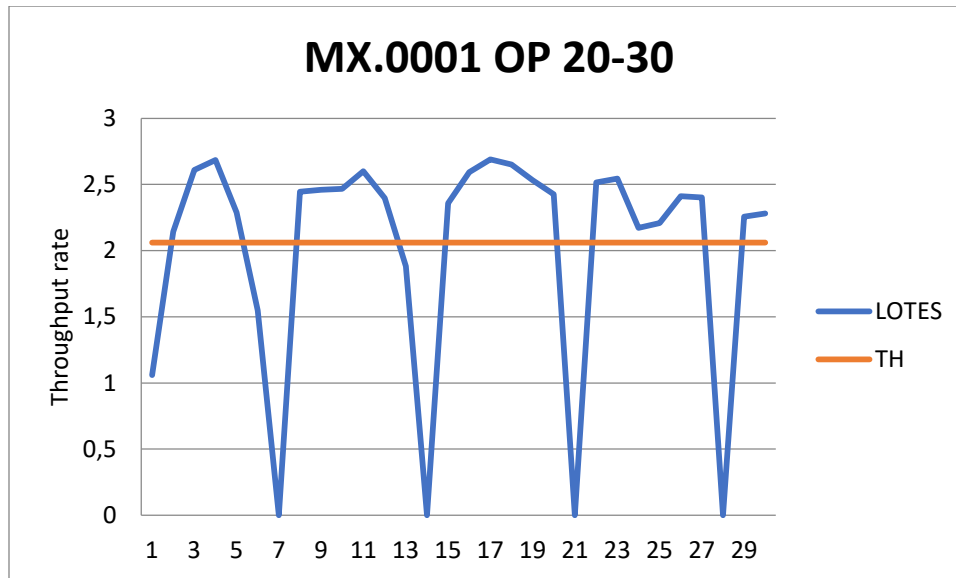


Figura 36. Grafica R de OP 20-30 MX.0001. Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la gráfica anterior se puede observar que la mayoría de los días la cantidad de lotes que las celdas de trabajo maquinan supera al Throughput rate estimado, eso indica que la utilización del tiempo supera el 80% y es debido a que la mayoría de tiempo cuando es operador titular se ausenta, toma su lugar un operador con el fin de no parar producción. Los días en los que se encuentra por debajo de lo estimado es por falla de máquina y por falta de material.

QM for Windows - [Data] Results					
MX.0001 OP 20-30 Solution					
Parameter	Value		Parameter	Value	Hot (ba)
M/M/s with a Finite System Size			Average server utilization	.79	
Arrival rate(lambda)	2.16		Average number in the queue(Lq)	1.41	
Service rate(mu)	.87		Average number in the system(L)	3.78	
Number of servers	3		Average time in the queue(Wq)	.69	
Maximum system size	9		Average time in the system(W)	1.84	
			Effective arrival rate	2.06	
			Probability that system is full	.05	

Figura 37. Medidas de desempeño MX.0001 OP20-30. Fuente: Elaboración propia, 2018.



MX.0001 OP 20-30 Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys ≤ k)	Prob (num in sys > k)
0	.06	.06	.94
1	.14	.2	.8
2	.18	.38	.62
3	.15	.52	.48
4	.12	.64	.36
5	.1	.74	.26
6	.08	.83	.17
7	.07	.9	.1
8	.06	.95	.05
9	.05	1	0

Figura 38. Probabilidad de n lotes MX.0001 OP20-30. Fuente: Elaboración propia, 2018.

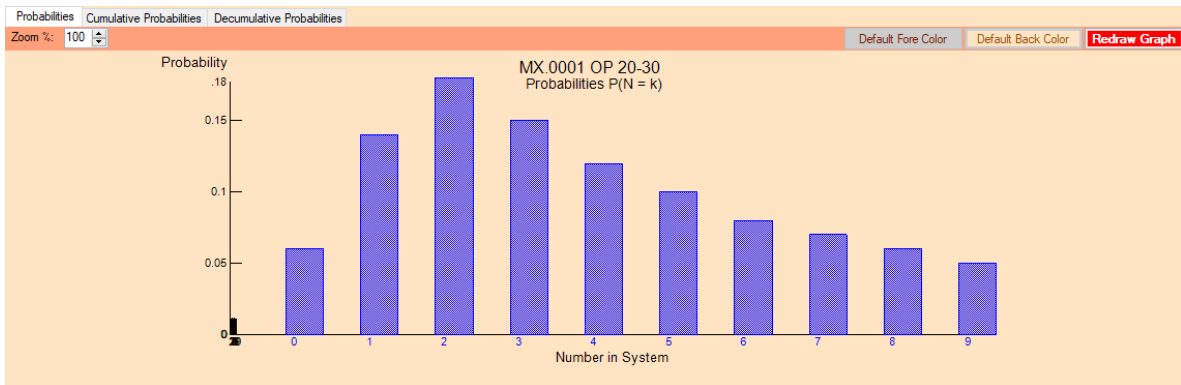


Figura 39. Distribución de Poisson MX.0001 OP20-30. Fuente: Elaboración propia, 2018.

### MX.0001 OP 40 M/M/2/6/∞/FIFO

Datos:  $\lambda = 2.06$  lotes por día.

$\mu = 1.17$  lotes por día por servidor.

$C = 2$  servidores.

$K = 6$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:

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

Sustituyendo:

$$\rho = \frac{2.06}{2(1.17)}$$

$$\rho = 0.88$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

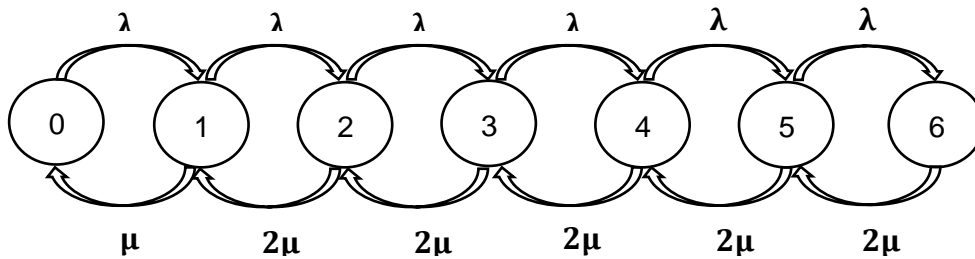


Figura 40. Cadena de Markov de OP 40 MX.0001. Fuente: Elaboración propia.

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 2\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 2\mu p_3 = \lambda p_2 + 2\mu p_4$$

$$\lambda p_4 + 2\mu p_4 = \lambda p_3 + 2\mu p_5$$

$$\lambda p_5 + 2\mu p_5 = \lambda p_4 + 2\mu p_6$$

$$2\mu p_6 = 2\lambda p_5$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^2 \frac{(\frac{2.06}{1.17})^n}{n!} + \frac{(\frac{2.06}{1.17})^2}{2!} \sum_{n=2+1}^6 0.88 + 0.88^2 + 0.88^3 + 0.88^4}$$

$$p_0 = \frac{1}{8.855}$$

$$p_0 = 0.1129$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0 \text{ Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0 \text{ Para } n = c+1, \dots, K$$

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{(\frac{2.06}{1.17})^1}{1!} 0.1129 = 0.1987$$

$$P_2 = \frac{(\frac{2.06}{1.17})^2}{2!} 0.1129 = 0.175$$

$$P_3 = \frac{\left(\frac{2.06}{1.17}\right)^3}{2! 2^1} 0.1129 = 0.1539$$

$$P_4 = \frac{\left(\frac{2.06}{1.17}\right)^4}{2! 2^2} 0.1129 = 0.1354$$

$$P_5 = \frac{\left(\frac{2.06}{1.17}\right)^5}{2! 2^3} 0.1129 = 0.1194$$

$$P_6 = \frac{\left(\frac{2.06}{1.17}\right)^6}{2! 2^4} 0.1129 = 0.1051$$

$$0.1129 + 0.1987 + 0.175 + 0.1539 + 0.1354 + 0.1194 + 0.1051 = 1$$

- Número estimado de lotes en línea de espera:

Fórmula:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c! (1-p)^2} P_0 (1 - \rho^{k-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

Sustituyendo:

$$L_q = \frac{\left(\frac{2.06}{1.17}\right)^2 0.88}{2! (1-0.88)^2} 0.1129 (1 - 0.88^{6-2} - (6-2)0.88^4(1-0.88))$$

$$L_q = 1.21 \text{ lotes por día.}$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo:

$$L = 1.21 + \sum_{n=0}^{2-1} 0.1982 + 2(1 - \sum_{n=0}^{2-1} 0.1982)$$

$$L = 3.011 \text{ lotes por día.}$$

- Throughput rate estimado:

Fórmula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 2.06(1 - 0.1051)$$

$$\lambda_{ef} = 1.843 \text{ lotes por día.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en espera:

Fórmula:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W_q = \frac{1.21}{1.843}$$

$$W_q = 1.687 \text{ días.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema (Lead Time):

Fórmula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{3.011}{1.843}$$

$$W = 1.687 \text{ días.}$$

En el caso de las OP 40, el sistema tiene una utilización estimada del 88 % y una probabilidad del 11.29 % de que el sistema se encuentre vacío. El tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema es de 1.687 días y el tiempo estimado que un lote pasa en espera a ser maquinado es de 0.66 días; la diferencia entre los dos valores anteriores determinamos en un lote pasa en promedio 1.027 días siendo maquinado. El nivel óptimo de WIP es de 3.011 lotes por día. El throughput rate de este sistema es de 1.843 lotes por día.

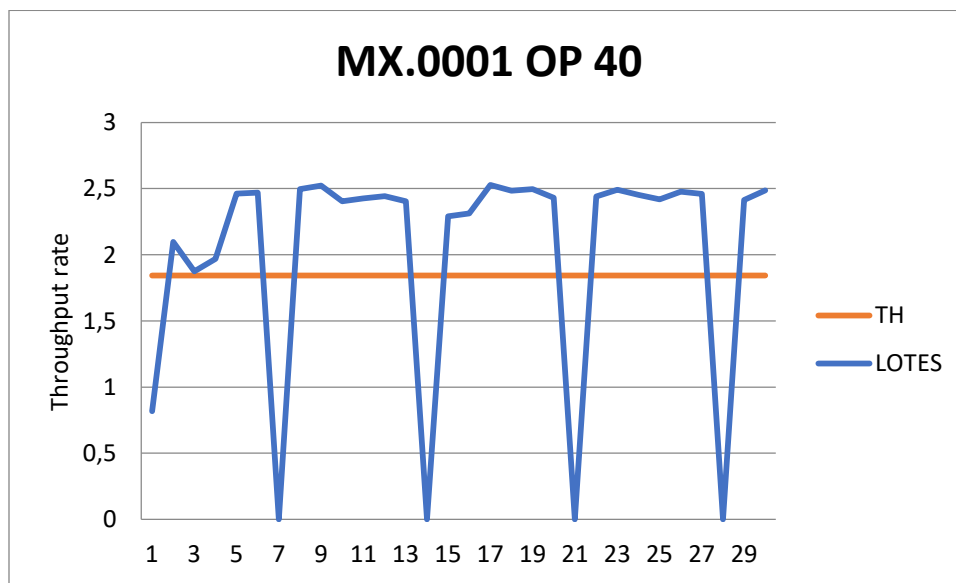


Figura 41. Grafica R de OP 40 MX.0001. Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la gráfica anterior se puede observar que la mayoría de los días la cantidad de lotes que las celdas de trabajo maquinan supera al Throughput rate estimado, eso indica que la utilización del tiempo supera el 80 % y es debido a que la mayoría de tiempo cuando es operador titular se ausenta, toma su lugar un operador con el fin de no parar producción.

Parameter	Value	Parameter	Value	Hours (based on 8)	Hours (based on
M/M/s with a Finite System Size		Average server utilization	.79		
Arrival rate( $\lambda$ )	2.06	Average number in the queue( $L_q$ )	1.2		
Service rate( $\mu$ )	1.17	Average number in the system( $L$ )	2.78		
Number of servers	2	Average time in the queue( $W_q$ )	.65	5.22	15.66
Maximum system size	6	Average time in the system( $W$ )	1.51	12.06	36.17
		Effective arrival rate	1.84		
		Probability that system is full	.11		

Figura 42. Medidas de desempeño MX.0001 OP40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys $\leq$ k)	Prob (num in sys $>$ k)
0	.11	.11	.89
1	.2	.31	.69
2	.17	.49	.51
3	.15	.64	.36
4	.14	.78	.22
5	.12	.89	.11
6	.11	1	0

Figura 43. Probabilidad de n lotes MX.0001 OP40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

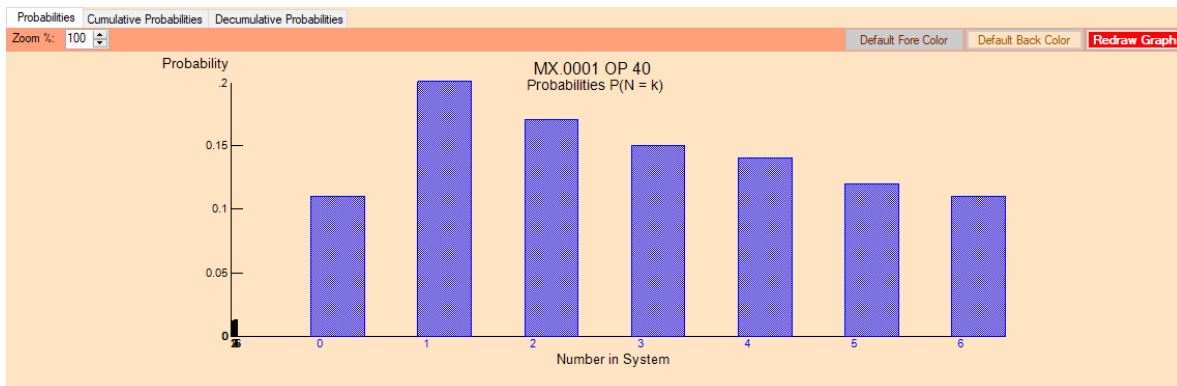


Figura 44. Distribución de Poisson MX.0001 OP40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

**MX.0003 OP 00 M/M/1/8/∞/FIFO.**

Datos:  $\lambda = 2.5$  lotes por día.

$\mu = 3.9$  lotes por día por servidor.

$C = 1$  servidores.

$K = 8$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:

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

Sustituyendo:

$$\rho = \frac{2.5}{3.9}$$

$$\rho = 0.825$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

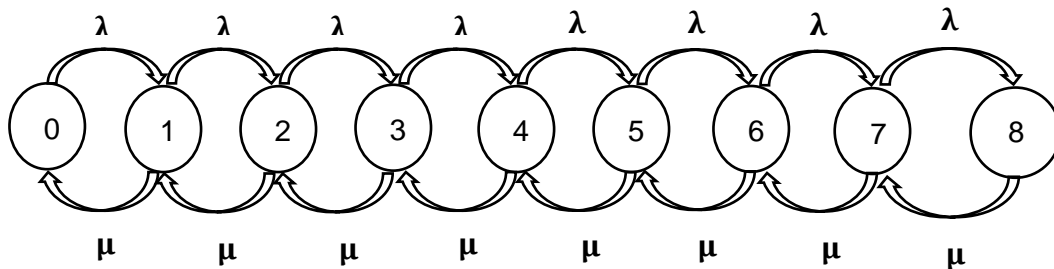


Figura 45. Cadena de Markov de OP 00 MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Dónde:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + \mu p_2$$

$$\lambda p_2 + \mu p_2 = \lambda p_1 + \mu p_3$$

$$\lambda p_3 + \mu p_3 = \lambda p_2 + \mu p_4$$



$$\lambda p_4 + \mu p_4 = \lambda p_3 + \mu p_5$$

$$\lambda p_5 + \mu p_5 = \lambda p_4 + \mu p_6$$

$$\lambda p_6 + \mu p_6 = \lambda p_5 + \mu p_7$$

$$\lambda p_7 + \mu p_7 = \lambda p_6 + \mu p_8$$

$$\mu p_8 = \lambda p_7$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Formula:

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

Sustituyendo:

$$P_0 = [1 + \sum_{n=1}^8 \frac{2.5}{3.9} + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^2 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^3 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^4 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^5 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^6 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^7 + \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^8]^{-1}$$

$$P_0 = 0.366$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Formula:

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

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{2.5}{3.9} 0.366 = 0.234$$

$$P_2 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^2 0.366 = 0.149$$

$$P_3 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^3 0.366 = 0.096$$

$$P_4 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^4 0.366 = 0.061$$

$$P_5 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^5 0.366 = 0.039$$

$$P_6 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^6 0.366 = 0.025$$

$$P_7 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^7 0.366 = 0.016$$

$$P_8 = \left(\frac{2.5}{3.9}\right)^8 0.366 = 0.01$$

$$0.366 + 0.234 + 0.15 + 0.096 + 0.061 + 0.039 + 0.025 + 0.016 + 0.01 = 1$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Formula:

$$L = \sum_{n=1}^k nP_k$$

Sustituyendo:

$$L = \sum_{n=1}^8 0.234 + 2(0.149) + 3(0.096) + 4(0.061) + 5(0.039) + 6(0.025) + 7(0.016) + 8(0.01)$$

$$L = 1.61$$

- Throughput rate estimado:

Formula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 2.475(1 - 0.01)$$

$$\lambda_{ef} = 2.475$$

- Tiempo estimado que un lote pasa en el sistema:

Formula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{1.61}{2.475}$$

$$W = 0.648$$

Este sistema tiene una utilización del 64 % y una probabilidad del 36.6 % de que haya cero lotes en el sistema debido a que la capacidad de la maquina supera la frecuencia de arribo de los lotes. El nivel óptimo de WIP es de 1.66 lotes por día. El Throughput rate estimado es de 2.475 lotes por día. El tiempo estimado que un lote pasa dentro del sistema es de 0.648 días.

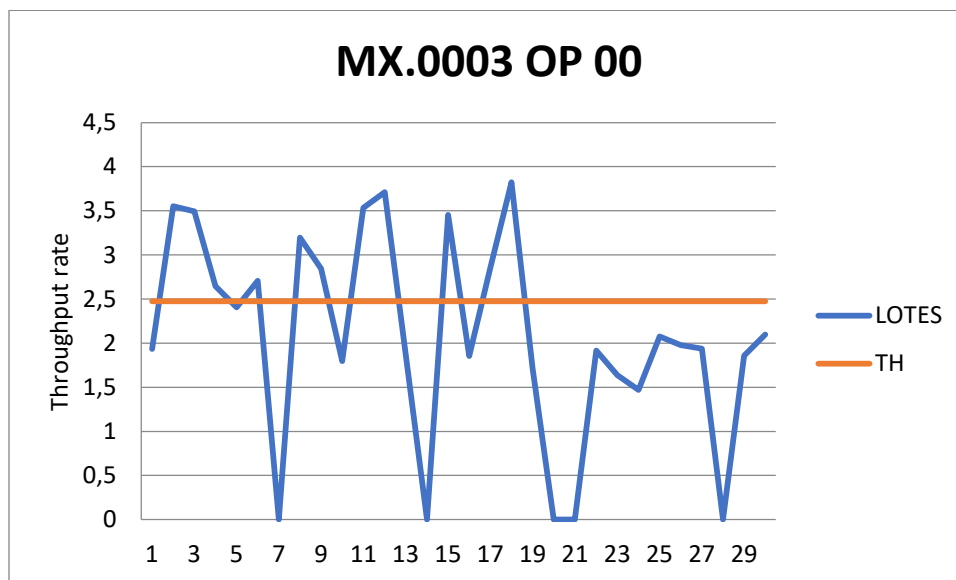


Figura 46. Grafica R de OP 00 MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Al observar el gráfico resalta debido a que existe mucha variabilidad en su comportamiento. Es una celda de trabajo que pasa varios días en estado ocioso, lo cual, genera acumulación de material en la línea de espera. Los días que se supera por mucho el Throughput rate estimado es debido a que se trabaja el día completo porque hay material de sobra. El operador de esta línea, en ocasiones, se encuentra apoyando en algunas otras tareas.

MX.0003 OP00 Solution						
Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8)	Hours (based on)
M/M/1 with a Finite System Size			Average server utilization	.63		
Arrival rate( $\lambda$ )	2.5		Average number in the queue(Lq)	.98		
Service rate( $\mu$ )	3.9		Average number in the system(L)	1.62		
Number of servers	1		Average time in the queue(Wq)	.4	3.18	9.54
Maximum system size	8		Average time in the system(W)	.65	5.23	15.7
			Effective arrival rate	2.47		
			Probability that system is full	.01		

Figura 47. Medidas de desempeño MX.0003 OP00. Fuente: Elaboración propia, 2018.

(untitled) Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys <= k)	Prob (num in sys >k)
0	.37	.37	.63
1	.23	.6	.4
2	.15	.75	.25
3	.1	.85	.15
4	.06	.91	.09
5	.04	.95	.05
6	.03	.97	.03
7	.02	.99	.01
8	.01	1	0

Figura 48. Probabilidad de n lotes MX.0003 OP00. Fuente: Elaboración propia, 2018.

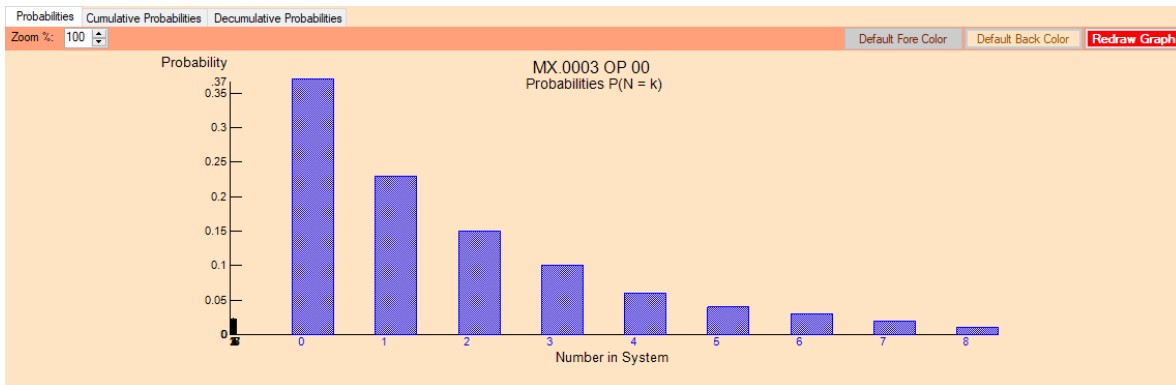


Figura 49. Distribución Poisson MX.0003 OP00. Fuente: Elaboración propia, 2018.

**MX.0003 OP 10 M/M/2/6<sup>∞</sup>/FIFO**

Datos:  $\lambda = 2.5$  lotes/días.  $\mu = 1.3$  lotes/día.  $C = 2$ .  $K = 6$  lotes.

- Factor de Utilización:

$$\rho = \frac{\lambda}{2\mu}$$

$$\rho = \frac{2.5}{2(1.3)}$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

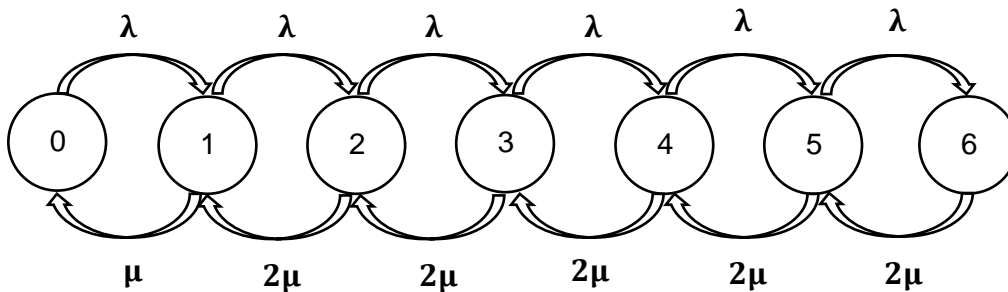


Figura 50. Cadena de Markov de OP 10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 2\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 2\mu p_3 = \lambda p_2 + 2\mu p_4$$

$$\lambda p_4 + 2\mu p_4 = \lambda p_3 + 2\mu p_5$$

$$\lambda p_5 + 2\mu p_5 = \lambda p_4 + 2\mu p_6$$

$$2\mu p_6 = 2\lambda p_5$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Formula:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^2 \frac{(\frac{2.5}{1.3})^n}{n!} + \frac{(\frac{2.475}{1.3})^2}{2!} \sum_{n=2+1}^6 0.95 + 0.95^2 + 0.95^3 + 0.95^4}$$

$$P_0 = \frac{1}{10.99} = 0.09$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Fórmula para  $n = 1, 2, \dots, c$ :  $P_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0$

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{(\frac{2.475}{1.3})^1}{1!} 0.0872 = 0.1712$$

$$P_2 = \frac{(\frac{2.475}{1.3})^2}{2!} 0.09 = 0.1629$$

Fórmula Para  $n = c, c+1, \dots, K$   $P_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0$

Sustituyendo obtenemos:

$$P_3 = \frac{(\frac{2.475}{1.3})^3}{2! 2^1} 0.09 = 0.1552$$

$$P_4 = \frac{(\frac{2.475}{1.3})^4}{2! 2^2} 0.09 = 0.1475$$

$$P_5 = \frac{\left(\frac{2.475}{1.3}\right)^5}{2! 2^3} 0.09 = 0.1403$$

$$P_6 = \frac{\left(\frac{2.475}{1.3}\right)^6}{2! 2^4} 0.09 = 0.1339$$

$$P = 0.09 + 0.1712 + 0.1629 + 0.1552 + 0.1475 + 0.1403 + 0.1339 = 1$$

- Número estimado de lotes en línea de espera:

Fórmula:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c! (1-p)^2} P_0 (1 - \rho^{k-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

Sustituyendo:

$$L_q = \frac{\left(\frac{2.575}{1.5}\right)^2 0.95}{2! (1-0.95)^2} 0.09 (1 - 0.95^4 - (6-2)0.95^4(1-0.95))$$

$$L_q = 61.974(0.0225)$$

$$L_q = 1.39 \text{ lotes/día}$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo obtenemos:

$$L = 1.39 + \sum_{n=0}^{2-1} 1(0.1712) + 2(1 - \sum_{n=0}^{2-1} 0.1712)$$

$$L = 3.21$$

- Throughput rate estimado:

Formula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 2.475(1 - 0.1339)$$

$$\lambda_{ef} = 2.14 \text{ lotes/día}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema:

Formula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{3.21}{2.155}$$

$$W = 1.49 \text{ días}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema:

Formula:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo se obtiene:



$$W_q = \frac{1.39}{2.155}$$

$$W_q = 0.645 \text{ días}$$

Este sistema tiene una utilización del 95 % y una probabilidad del 9 % de que haya cero elementos en el sistema. El nivel óptimo de WIP es de 3.21 lotes por día. El tiempo estimado que un lote pasa en el sistema es de 1.41 días; con un tiempo en línea de espera de 0.645 días. El Throughput rate estimado es de 2.14 lotes por día.

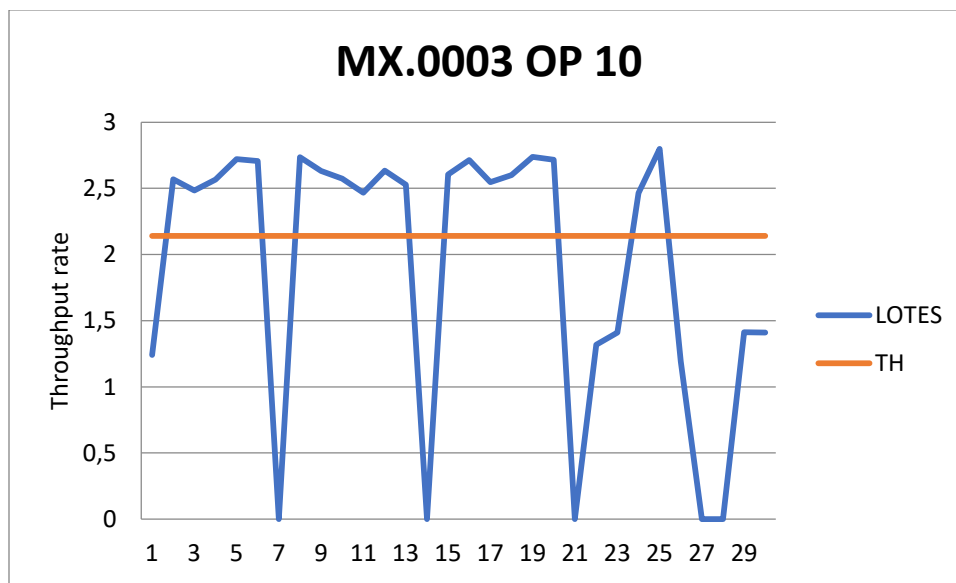


Figura 51. Grafica R de OP 10 MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Este gráfico muestra que la mayoría de los días la utilización del tiempo supera al 80 % y así mismo, supera el throughput rate estimado. Los días en los que la producción disminuye son debido a fallas en máquinas, operador no titular y falta de material.

MX.0003 OP10 Solution						
Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8)	Hours (based on)
M/M/s with a Finite System Size			Average server utilization	.82		
Arrival rate(lambda)	2.47		Average number in the queue(Lq)	1.4		
Service rate(mu)	1.3		Average number in the system(L)	3.05		
Number of servers	2		Average time in the queue(Wq)	.65	5.23	15.69
Maximum system size	6		Average time in the system(W)	1.42	11.38	34.15
			Effective arrival rate	2.14		
			Probability that system is full	.13		

Figura 52. Medidas de desempeño MX.0003 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

MX.0003 OP10 Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys ≤ k)	Prob (num in sys >k)
0	.09	.09	.91
1	.17	.26	.74
2	.16	.43	.57
3	.15	.58	.42
4	.15	.73	.27
5	.14	.87	.13
6	.13	1	0

Figura 53. Probabilidad de n lotes MX.0003 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

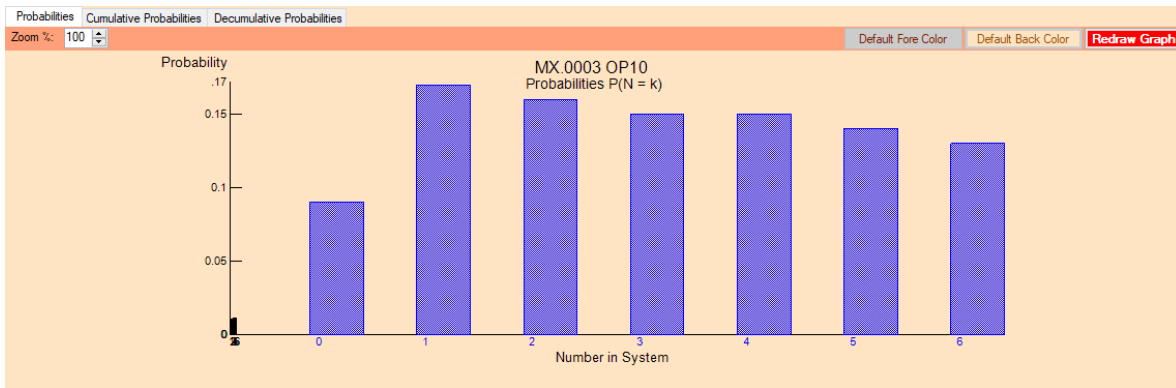


Figura 54. Distribución de Poisson MX.0003 OP10. Fuente: Elaboración propia, 2018.

**MX.0003 OP 20-40 M/M/3/9/∞/FIFO**

Datos:  $\lambda = 2.14$  lotes por día.

$\mu = 0.89$  lotes por día por servidor.

$C = 3$  servidores.

$K = 9$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:  $\rho = \frac{\lambda}{n\mu}$

Sustituyendo:  $\rho = \frac{2.14}{3(0.89)}$

$$\rho = 0.86$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

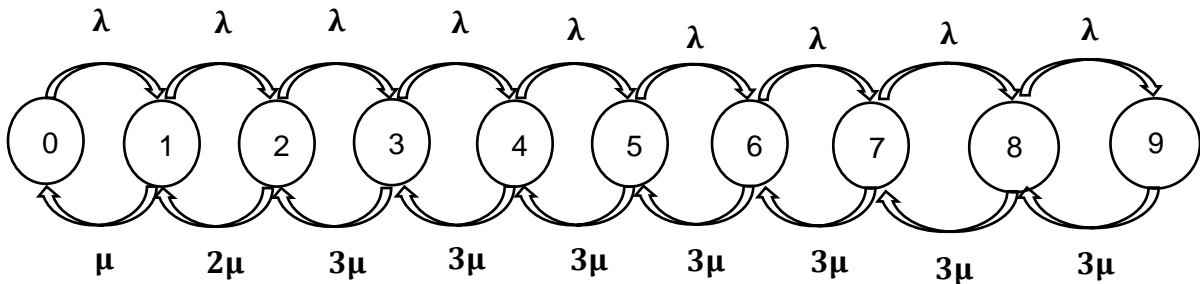


Figura 55. Cadena de Markov de OP 20-40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Dónde:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 3\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 3\mu p_3 = \lambda p_2 + 3\mu p_4$$

$$\lambda p_4 + 3\mu p_4 = \lambda p_3 + 3\mu p_5$$

$$\lambda p_5 + 3\mu p_5 = \lambda p_4 + 3\mu p_6$$

$$\lambda p_6 + 3\mu p_6 = \lambda p_5 + 3\mu p_7$$

$$\lambda p_7 + 3\mu p_7 = \lambda p_6 + 3\mu p_8$$

$$\lambda p_8 + 3\mu p_8 = \lambda p_7 + 3\mu p_9$$

$$3\mu p_9 = \lambda p_8$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya  $p_0$ :

Fórmula:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^3 \frac{(\frac{2.14}{0.83})^n}{n!} + \frac{(\frac{2.14}{0.83})^2}{2!} \sum_{n=3+1}^9 0.83 + 0.83^2 + 0.83^3 + 0.83^4 + 0.83^5 + 0.83^6}$$

$$p_0 = \frac{1}{18.13}$$

$$p_0 = 0.055$$

- Probabilidad de que haya  $p_n$ :

Fórmula:

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0 \text{ Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0 \text{ Para } n = c+1, \dots, K$$

Sustituyendo:

$$p_1 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)}{1!} 0.055 = 0.1418$$

$$p_2 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^2}{2!} 0.055 = 0.1828$$

$$p_3 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^3}{3!} 0.055 = 0.1571$$

$$p_4 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^4}{3! 3^{4-1}} 0.055 = 0.1350$$

$$p_5 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^5}{5! 5^{5-3}} 0.055 = 0.116$$

$$p_6 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^6}{6! 6^{6-3}} 0.055 = 0.0997$$

$$p_7 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^7}{7! 7^{7-3}} 0.055 = 0.0875$$

$$p_8 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^8}{8! 8^{8-3}} 0.055 = 0.0736$$

$$p_9 = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^8}{9! 9^{9-3}} 0.055 = 0.0633$$

$$P = 0.055 + 0.1418 + 0.1828 + 0.1571 + 0.1350 + 0.116 + 0.0997 + 0.0857 \\ + 0.0736 + 0.0633 = 1$$

- Número estimado de lotes en línea de espera:

Fórmula:

$$L_q = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c p}{c! (1-p)^2} P_0 (1 - \rho^{k-c} - (K-c)p^k(1-\rho))$$

Sustituyendo:

$$L_q = \frac{\left(\frac{2.14}{0.83}\right)^3 0.86}{3!(1 - 0.86)^2} 0.055(1 - 0.86^{9-3} - (9 - 3)0.86^9(1 - 0.86))$$

$$L_q = 1.76 \text{ lotes por día.}$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo:

$$L = 1.76 + \sum_{n=0}^{3-1} 0.1418 + 2(0.1828) + 3\left(1 - \sum_{n=0}^{3-1} 0.055 + 0.1418 + 0.1828\right)$$

$$L = 3.4 \text{ lotes por día.}$$

- Throughput rate estimado:

Fórmula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 2.14(1 - 0.063)$$

$$\lambda_{ef} = 2.005 \text{ lotes por día.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en espera:

Fórmula:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W_q = \frac{1.76}{2.005}$$

$$W_q = 0.878 \text{ días.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema (Lead Time):

Fórmula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{3.4}{2.005}$$

$$W = 1.695 \text{ días.}$$

La utilización estimada de este sistema es de 86 %. La probabilidad de que no haya lotes en el sistema es 5.5 % lo cual es muy bajo. La probabilidad de que haya lotes en el sistema es elevada y bajo un estado estable, siempre tendrá material y estará trabajando. El nivel óptimo de WIP es 3.4 lotes. El tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema es de 1.7 días. El throughput rate estimado es de 2.005 lotes por días.

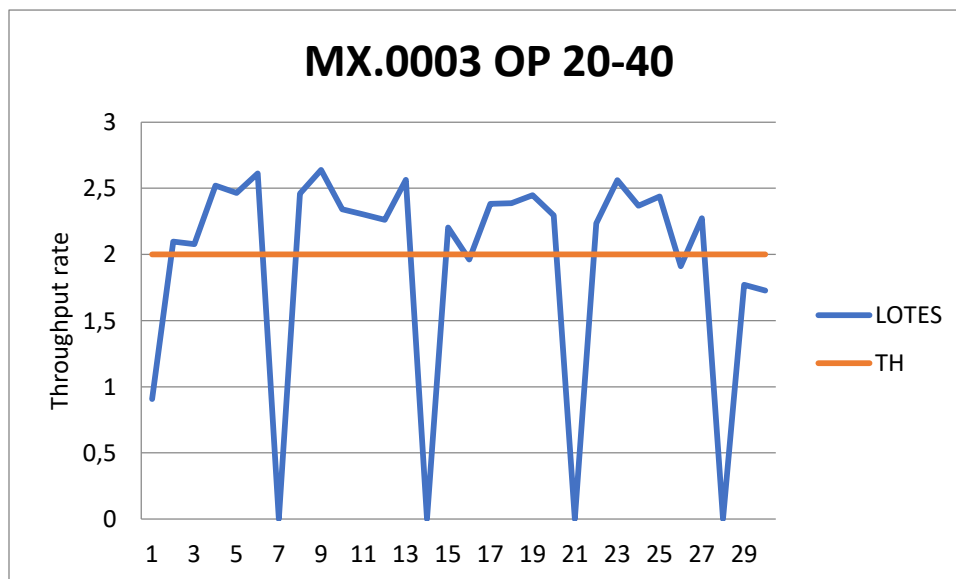


Figura 56. Grafica R de OP 20-40 MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se observa que la mayor parte del tiempo el sistema arroja 2.5 lotes. Lo anterior es debido a que en esos días la utilización del tiempo supera al 80 %.

Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8)	Hours (based on
M/M/s with a Finite System Size			Average server utilization	.81		
Arrival rate( $\lambda$ )	2.14		Average number in the queue(Lq)	1.58		
Service rate( $\mu$ )	.83		Average number in the system(L)	4.01		
Number of servers	3		Average time in the queue(Wq)	.78	6.28	18.83
Maximum system size	9		Average time in the system(W)	1.99	15.91	47.74
			Effective arrival rate	2.02		
			Probability that system is full	.06		

Figura 57. Medidas de desempeño MX.0003 OP20-40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys $\leq$ k)	Prob (num in sys $>$ k)
0	.05	.05	.95
1	.13	.18	.82
2	.16	.34	.66
3	.14	.48	.52
4	.12	.61	.39
5	.1	.71	.29
6	.09	.8	.2
7	.08	.88	.12
8	.07	.94	.06
9	.06	1	0

Figura 58. Probabilidad de n lotes MX.0003 OP20-40. Fuente: Elaboración propia, 2018.

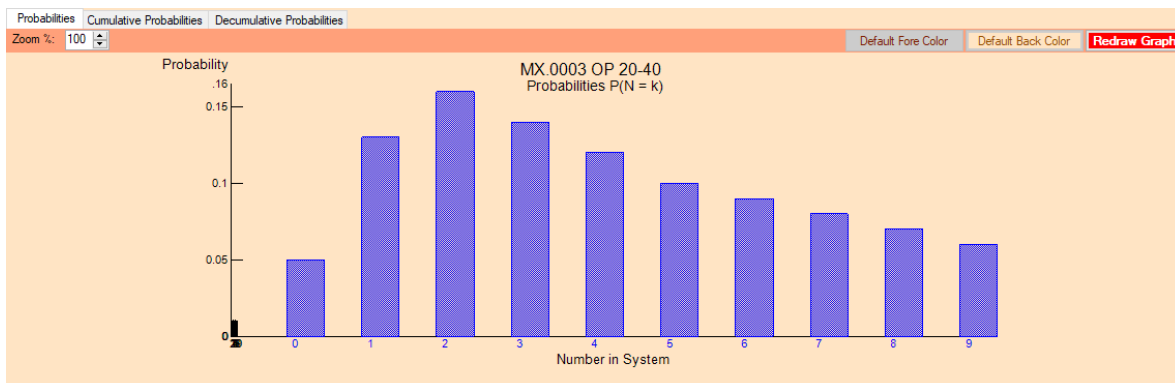


Figura 59. Distribución de Pisson MX.0003 OP20-40. Fuente: Elaboración propia, 2018.



**MX.0020 OP 10-20 M/M/1/4/∞/FIFO.**

Datos:  $\lambda = 2$  lotes por día.

$\mu = 1.91$  lotes por día por servidor.

$C = 1$  servidores.

$K = 4$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:

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

Sustituyendo:

$$\rho = \frac{2}{1.91}$$

$$\rho = 1.047$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

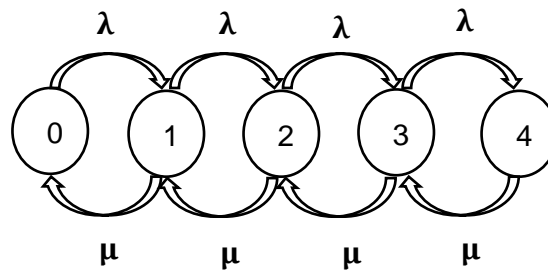


Figura 60. Cadena de Markov OP 10-20 MX.0003. Fuente: Elaboración propia, 2018.

Dónde:

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + \mu p_2$$

$$\lambda p_2 + \mu p_2 = \lambda p_1 + \mu p_3$$

$$\lambda p_3 + \mu p_3 = \lambda p_2 + \mu p_4$$

$$\mu p = \lambda p_7$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Formula:

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

Sustituyendo:

$$P_0 = [1 + \sum_{n=1}^8 \frac{2}{1.91} + \left(\frac{2}{1.91}\right)^2 + \left(\frac{2}{1.91}\right)^3 + \left(\frac{2}{1.91}\right)^4]^{-1}$$

$$P_0 = 0.169$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Formula:

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

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{2}{1.91} 0.182 = 0.191$$

$$P_2 = \left(\frac{2}{1.91}\right)^2 0.182 = 0.199$$

$$P_3 = \left(\frac{2}{1.91}\right)^3 0.182 = 0.2088$$

$$P_4 = \left(\frac{2}{1.91}\right)^4 0.182 = 0.2187$$

$$0.182 + 0.191 + 0.199 + 0.2088 + 0.2187 = 1$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Formula:

$$L = \sum_{n=1}^k nP_k$$

Sustituyendo:

$$L = \sum_{n=1}^4 0.191 + 2(0.199) + 3(0.2088) + 4(0.2187)$$

$$L = 1.941$$

- Throughput rate estimado:

Formula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 1.91(1 - 0.2187)$$

$$\lambda_{ef} = 1.49$$

- Tiempo estimado que un lote pasa en el sistema:

Formula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{1.941}{1.49}$$

$$W = 1.3 \text{ días}$$

La OP 10-20, es una celda de trabajo en donde la tasa de arribo es ligeramente mayor a la capacidad con una utilización estimada del 80 %. Es por ello que la utilización del sistema es 104.7 % lo cual indica que en algún momento el sistema se saturará. La probabilidad de que haya cero lotes es de 18.2 % lo cual parece elevado, pero, la suma de las probabilidades de que haya de 1 a 4 es mayor y en comparación, existe una probabilidad muy baja de que haya cero lotes. El nivel óptimo de WIP es de 1.941 lotes por día. El Throughput rate estimado es de 1.49 lotes por día. El tiempo estimado que un lote pasa en el sistema es de 1.275 días.

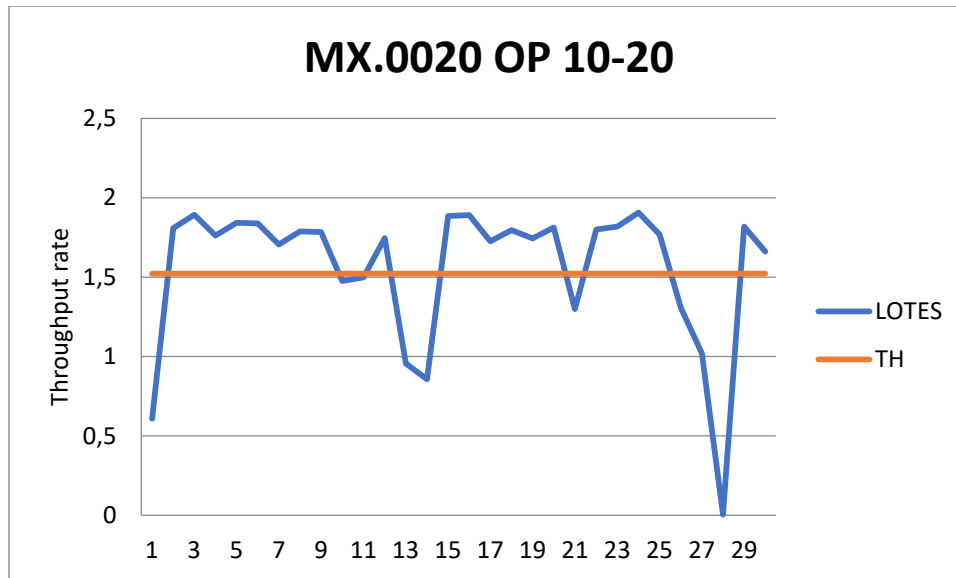


Figura 61. Grafica R de OP 10-20 MX.0020. Fuente: Elaboración propia, 2018.

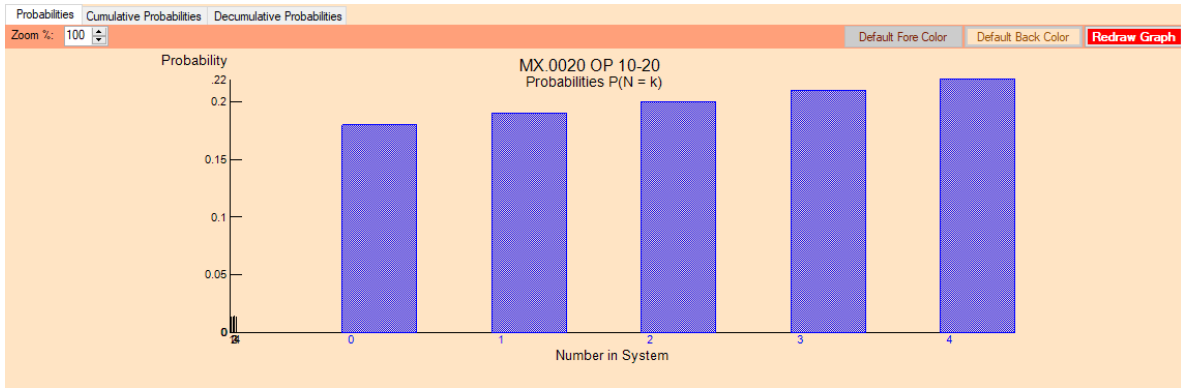
El grafico demuestra que muy constantemente el Throughput rate supera al real, debido a que se tiene una utilización del tiempo disponible superior al 80 % puesto que los tiempos de comedor son cubiertos por algún otro operador. Esta celda de trabajo operó todo el mes por razones de demanda.

MX.0020 OP 10-20 Solution						
Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8	Hours (based on
M/M/1 with a Finite System Size			Average server utilization	.82		
Arrival rate(lambda)	2		Average number in the queue(Lq)	1.27		
Service rate(mu)	1.91		Average number in the system(L)	2.09		
Number of servers	1		Average time in the queue(Wq)	.82	6.52	19.57
Maximum system size	4		Average time in the system(W)	1.34	10.71	32.14
			Effective arrival rate	1.56		
			Probability that system is full	.22		

Figura 62. Medidas de desempeño MX.0020 OP10-20. Fuente: Elaboración propia, 2018.

MX.0020 OP 10-20 Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys <= k)	Prob (num in sys >k)
0	.18	.18	.82
1	.19	.37	.63
2	.2	.57	.43
3	.21	.78	.22
4	.22	1	0

Figura 63. Probabilidad de n lotes MX.0020 OP10-20. Fuente: Elaboración propia, 2018.



**Figura 64. Distribución de Poisson MX.0020 OP10-20. Fuente: Elaboración propia, 2018.**

### MX.0020 OP 40-70 M/M/4/4/∞/FIFO

Datos:  $\lambda = 1.522$  lotes por día.

$\mu = 0.46$  lotes por día por servidor.

$C = 4$  servidores.

$K = 4$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:

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

Sustituyendo:

$$\rho = \frac{1.522}{4(0.46)}$$

$$\rho = 0.831$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

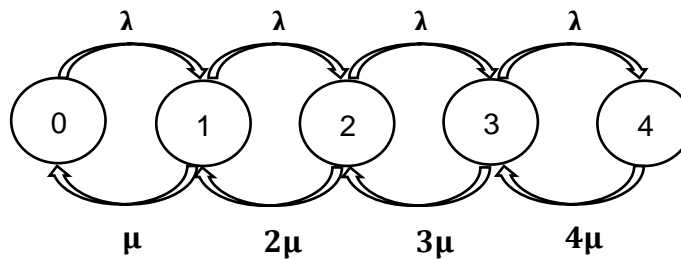


Figura 65. Cadena de Markov OP 10-20. Fuente: Elaboración propia, 2018.

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$\lambda p_2 + 2\mu p_2 = \lambda p_1 + 3\mu p_3$$

$$\lambda p_3 + 3\mu p_3 = \lambda p_2 + 4\mu p_4$$

$$4\mu p_4 = \lambda p_3$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^4 \frac{(\frac{1.522}{0.46})^n}{n!} + \frac{(\frac{1.522}{0.46})^4}{4!} \sum_{n=4+1}^4 0}$$

$$p_0 = \frac{1}{24.856}$$

$$p_0 = 0.0403$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{n!} P_0 \text{ Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$p_n = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^n}{c! c^{n-c}} P_0 \text{ Para } n = c+1, \dots, K$$

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{(\frac{1.522}{0.46})^1}{1!} 0.0403 = 0.1333$$

$$P_2 = \frac{(\frac{1.522}{0.46})^2}{2!} 0.0403 = 0.221$$

$$P_3 = \frac{(\frac{1.522}{0.46})^3}{3!} 0.0403 = 0.243$$

$$P_4 = \frac{\left(\frac{1.522}{0.46}\right)^4}{4!} 0.0403 = 0.201$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} nP_n + c\left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo:

$$L = 0 + \sum_{n=0}^{4-1} 0.1333 + 2(0.221) + 3(0.243) + 4\left(1 - \sum_{n=0}^{4-1} 0.0403 + 0.133 + 0.221 + 0.243\right)$$

$$L = 2.27 \text{ lotes por día.}$$

- Throughput rate estimado:

Fórmula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 1.522(1 - 0.201)$$

$$\lambda_{ef} = 1.21 \text{ lotes por día.}$$



- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema (Lead Time):

Fórmula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{2.27}{1.21}$$

$$W = 1.87 \text{ días.}$$

Este sistema de maquinado tiene una utilización estimada del 83.1 %. La probabilidad de que el sistema se encuentre vacío es del 4.03 %. Lo cual indica que la mayor parte del tiempo el sistema contará con material para trabajar, esto, en un estado estable. El nivel óptimo de WIP es de 2.27 lotes por día. El tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema es de 1.87 días. El Throughput rate estimado es de 1.21 lotes por día.

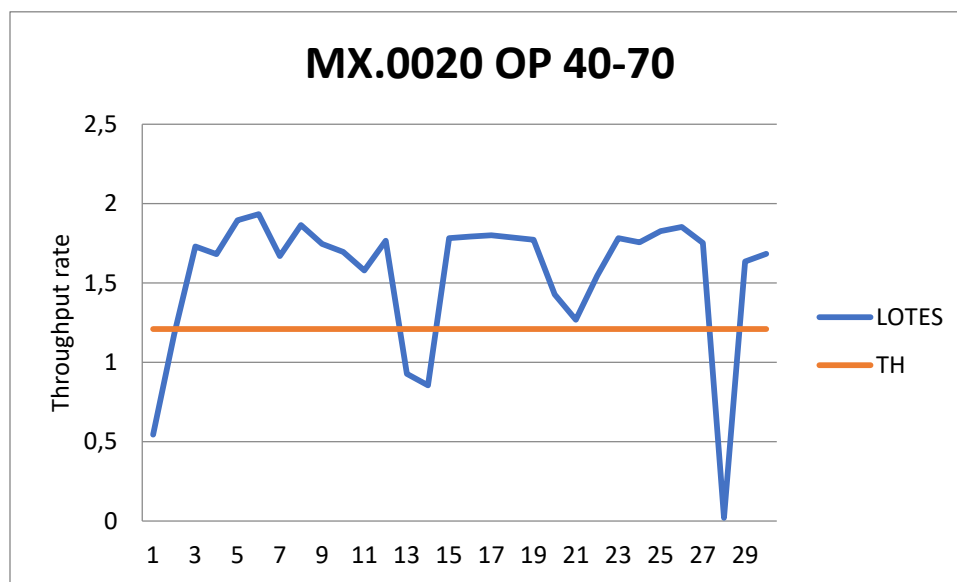


Figura 66. Grafica R de OP 40-70 MX.0020. Fuente: Elaboración propia, 2018.

El grafico muestra que el Throughput rate real supera al estimado, debido a que se tiene una utilización del tiempo superior al 80 %. Su puede observar que el sistema trabajó todo el mes debido a la demanda de ese mes.

MX.0020 Solution						
Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8	Hours (based on
M/M/s with a Finite System Size			Average server utilization	.63		
Arrival rate(lambda)	1.52		Average number in the queue(Lq)	0		
Service rate(mu)	.46		Average number in the system(L)	2.51		
Number of servers	4		Average time in the queue(Wq)	0	0	0
Maximum system size	4		Average time in the system(W)	2.17	17.39	52.17
			Effective arrival rate	1.16		
			Probability that system is full	.24		

Figura 67. Medidas de desempeño MX.0020 OP40-70. Fuente: Elaboración propia, 2018.

MX.0020 OP 40-70 Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys <= k)	Prob (num in sys >k)
0	.05	.05	.95
1	.16	.21	.79
2	.26	.47	.53
3	.29	.76	.24
4	.24	1	0

Figura 68. Probabilidad de n lotes MX.0020 OP40-70. Fuente: Elaboración propia, 2018.

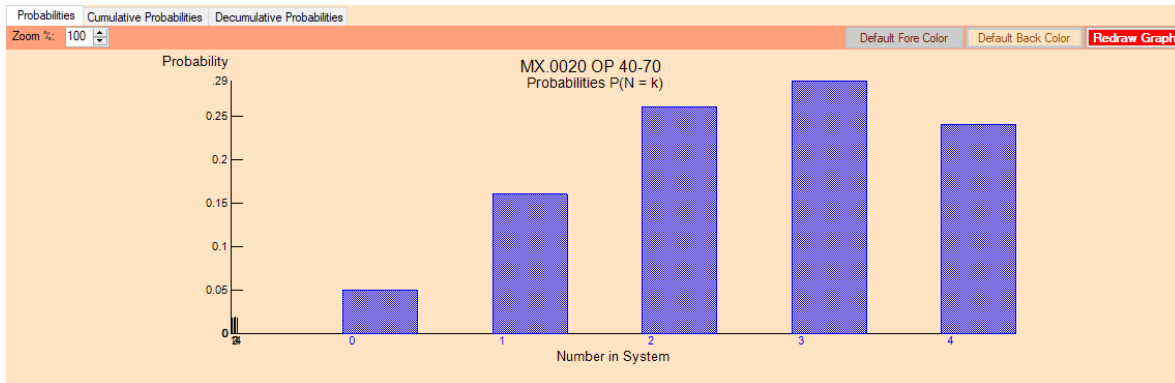


Figura 69. Distribución de Poisson MX.0020 OP40-70. Fuente: Elaboración propia, 2018.

### MX.0020 OP 80-90 M/M/4/4/∞/FIFO

Datos:  $\lambda = 1.21$  lotes por día.

$\mu = 1.14$  lotes por día por servidor.

$C = 2$  servidores.

$K = 2$  lotes

- Factor de utilización:

Fórmula:

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

Sustituyendo:

$$\rho = \frac{1.21}{2(1.14)}$$

$$\rho = 0.53$$

- Cadena de Markov y ecuaciones de equilibrio:

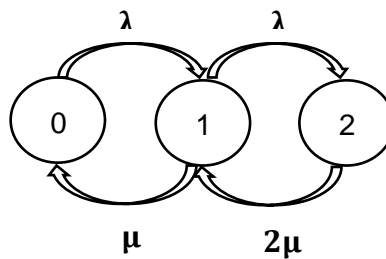


Figura 70. Cadena de Markov de OP 80-90 MX.0020. Fuente: Elaboración propia, 2018

$$\lambda p_0 = \mu p_1$$

$$\lambda p_1 + \mu p_1 = \lambda p_0 + 2\mu p_2$$

$$2\mu p_2 = \lambda p_1$$

$$\sum_{n=0}^{P_k} P_n = 1$$

- Probabilidad de que haya cero lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^c \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{c!} \sum_{n=c+1}^k \rho^{n-c}}$$

Sustituyendo:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^2 \frac{\left(\frac{1.21}{1.14}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{1.21}{1.14}\right)^2}{2!} \sum_{n=2+1}^2 0}$$

$$p_0 = \frac{1}{2.145}$$

$$p_0 = 0.466$$

- Probabilidad de que haya **n** lotes en el sistema:

Fórmula:

$$p_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} P_0 \quad \text{Para } n = 1, 2, \dots, c$$

$$p_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{c! c^{n-c}} P_0 \quad \text{Para } n = c+1, \dots, K$$

Sustituyendo:

$$P_1 = \frac{\left(\frac{1.21}{1.14}\right)}{1!} 0.466 = 0.4946$$

$$P_2 = \frac{\left(\frac{1.21}{1.14}\right)^2}{2!} 0.466 = 0.2625$$

- Número estimado de lotes en el sistema:

Fórmula:

$$L = L_q + \sum_{n=0}^{c-1} n P_n + c \left(1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n\right)$$

Sustituyendo:

$$L = 0 + \sum_{n=0}^{2-1} 0.4946 + 2(0.2625) + 2(1 - \sum_{n=0}^{2-1} 0.466 + 0.133)$$

$$L = 1.8216 \text{ lotes por día.}$$

- Throughput rate estimado:

Fórmula:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - P_k)$$

Sustituyendo:

$$\lambda_{ef} = 1.21(1 - 0.2625)$$

$$\lambda_{ef} = 0.8923 \text{ lotes por día.}$$

- Tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema (Lead Time):

Fórmula:

$$W = \frac{L}{\lambda_{ef}}$$

Sustituyendo:

$$W = \frac{1.8216}{0.8924}$$

$$W = 2.041 \text{ días.}$$

La utilización de este sistema es del 53 % y la probabilidad de que no haya lotes es del 46.6 %. El nivel óptimo de WIP es de 1 lote por día. El tiempo estimado que cada lote pasa en el sistema es de 2.41 días. El Throughput rate estimado es de 0.8924 días.

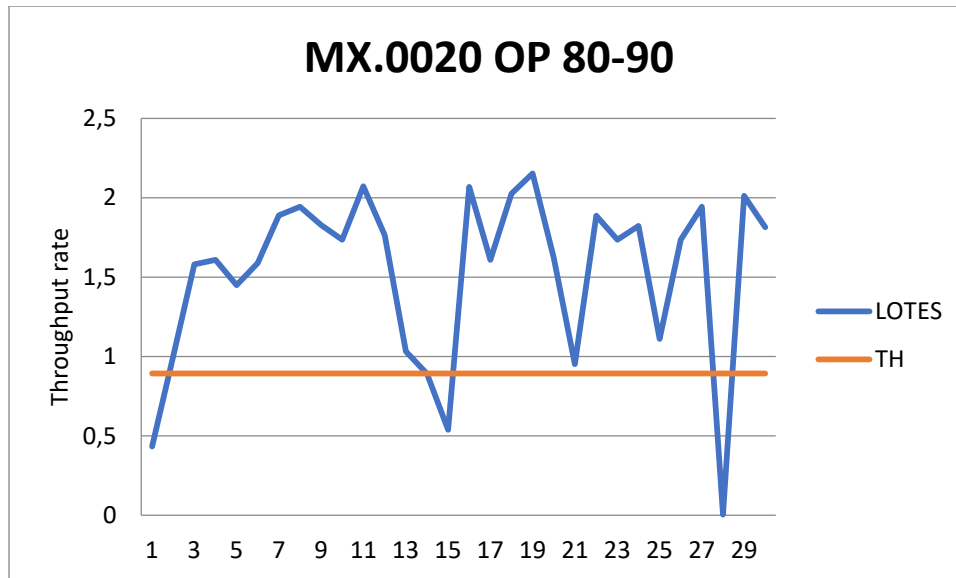


Figura 71. Grafica R OP 80-90. Fuente: Elaboración propia, 2018.

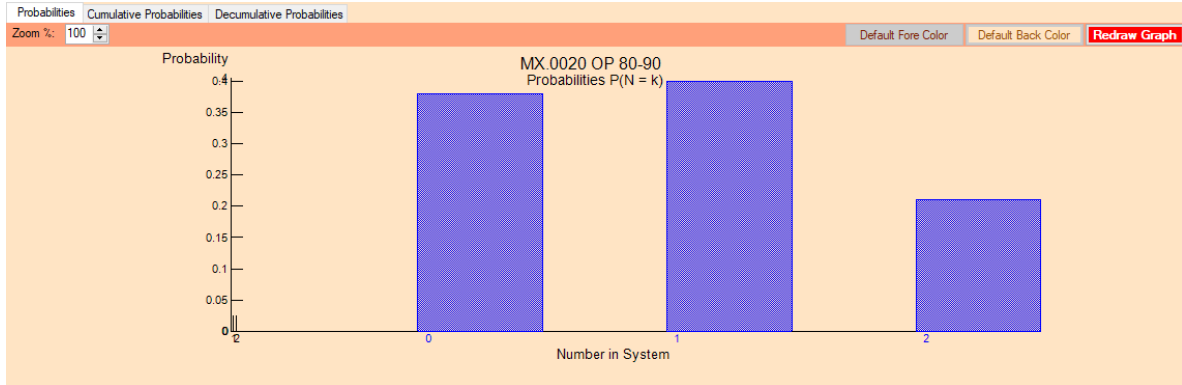
El comportamiento de este sistema es muy variable, pues, constantemente solo se encuentra operando un solo servidor. Los días en los que el sistema supera a casi el doble de Throughput rate es cuando los dos servidores están trabajando por causa de acumulación de material. Es un sistema en el que la utilización del tiempo disponible supera al 80 % debido a que los tiempos de comedor son cubiertos.

MX.0020 OP 80-90 Solution						
Parameter	Value		Parameter	Value	Hours (based on 8	Hours (based on
M/M/s with a Finite System Size			Average server utilization	.42		
Arrival rate(lambda)	1.21		Average number in the queue(Lq)	0		
Service rate(mu)	1.14		Average number in the system(L)	.83		
Number of servers	2		Average time in the queue(Wq)	0	0	0
Maximum system size	2		Average time in the system(W)	.88	7.02	21.05
			Effective arrival rate	.95		
			Probability that system is full	.21		

Figura 72. Medidas de desempeño MX.0020 OP80-90. Fuente: Elaboración propia, 2018.

MX.0020 OP 80-90 Solution			
k	Prob (num in sys = k)	Prob (num in sys <= k)	Prob (num in sys >k)
0	.38	.38	.62
1	.4	.79	.21
2	.21	1	0

Figura 73. Probabilidad de n lotes MX.0020 OP80-90. Fuente: Elaboración propia, 2018.



**Figura 74. Distribución de Poisson MX.0020 OP80-90. Fuente: Elaboración propia, 2018.**

## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Este proyecto tuvo como bien la aplicación de la metodología de teoría de colas para analizar el comportamiento del área de maquinado.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos matemáticos, son de gran relevancia para conocer cómo es que funciona el sistema y posteriormente el área de control de producción podrá establecer una política de control de WIP.

El establecer una política de control de WIP le permitirá a la empresa tener una reducción en sus costos, ser más competitiva y tener una mayor rotación de inventario. Al reducir los niveles de WIP podrá optimizar el uso de espacio, lo cual será de gran importancia para sus planes de expansión e instalación de nueva maquinaria. Al mantener los niveles adecuados de WIP, los tiempos de paro causados por falta de material podrán ser eliminados ya que, con el diagnóstico hecho, el departamento de control de producción sabrá cuanto y cuando producir.

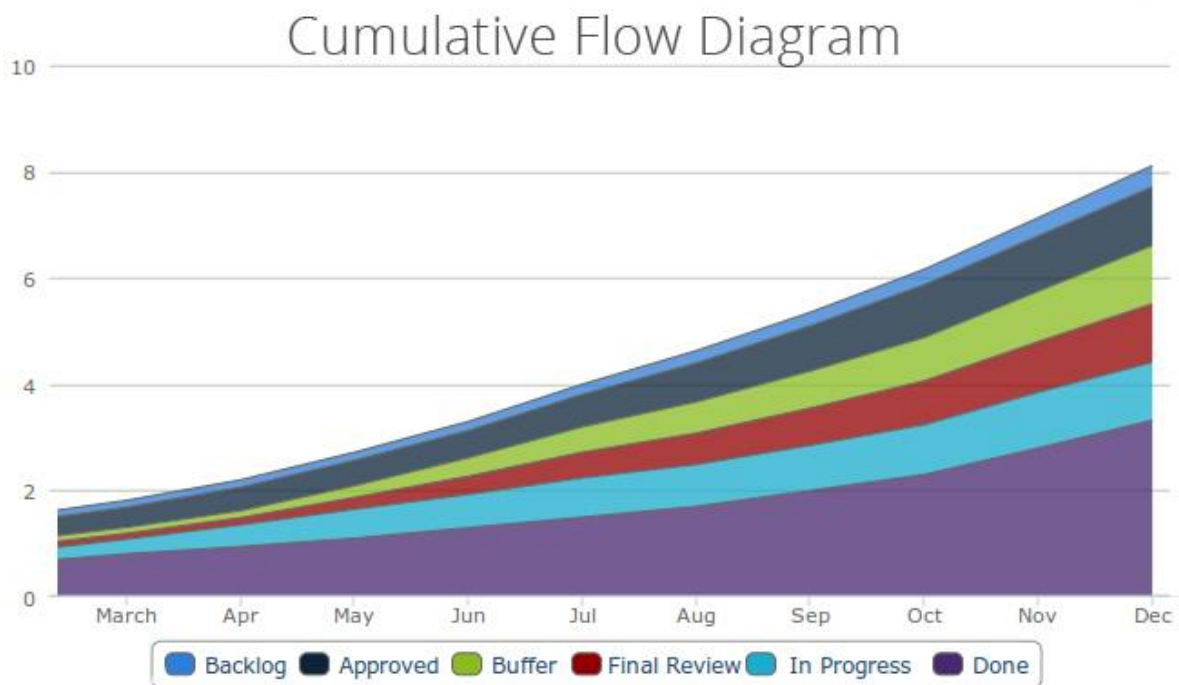
En los gráficos R se nota claramente que la utilización del tiempo constantemente supera (de manera ligera) 80 % con el cual este proyecto fue basado. Lo que causa que limite estimado sea ligeramente inferior al caso real. Para ello, el departamento de control de producción debe prestar especial atención al momento de la planeación, pues, planear menos de lo debido, podrá causar paros por falta de material; planear más de lo que es necesario, puede causar una saturación en los sistemas y demanda de espacio.



### **Recomendaciones.**

SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V. está próximo a instalar un sistema de trazabilidad, con el objetivo principal de tener control absoluto sobre lo que pasa en el proceso productivo. Esta herramienta puede ser utilizada para controlar y monitorear los niveles de WIP en tiempo real mediante un Cumulative Flow Diagram (CFD) que es una herramienta fundamentada en la metodología Kanban.

A continuación, se muestra una representación de un CFD:



**Figura 75. Cumulative Flow Diagram. Fuente: KanbanTool.com, 2018.**

El CFD permite monitorear la acumulación de las tareas en sus diferentes etapas a través del tiempo, muestra la cantidad de taras realizadas y en diferentes procesos. Además, permite calcular el Lead Time y el Throughput Rate que están directamente relacionados con el nivel de WIP.

## **VII. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y APLICADAS.**

A lo largo de mi formación académica en el Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga pude adquirir conocimientos y habilidades en matemáticas que fueron de vital importancia en el desarrollo de este proyecto.

A continuación se hace mención sobre las competencias desarrolladas y aplicadas.

Aplicación de conocimientos sobre la Teoría de colas el cual fue adquirido en la materia de Investigación de Operaciones. Esta habilidad fue esencial al momento de determinar el “cómo” calcular los niveles óptimos de WIP.

Así mismo, apliqué conocimientos de Algebra Lineal que me permitieron resolver y entender los modelos matemáticos provenientes de la teoría de colas.

Durante mi estancia en SUMITOMO ELECTRIC SINTERED COMPONENTS S.A. de C.V. pude adquirir conocimientos y experiencia que serán de vital importancia para mi desarrollo profesional.

Gracias a la disposición de mi jefa Monserrat Medrano, se cuáles son las funciones principales del departamento de Control de Producción. Dicho departamento tiene contacto y está directamente relacionado con todos los departamentos de la empresa.

Además, tuve la fortuna de que la empresa se encontraba en proceso de certificación en la norma IATF 16949:2016. Pude aprender mucho sobre la norma y como es el proceso de certificación.

## **VIII. FUENTES DE INFORMACION.**

Bernd Scholz-Reiter. (2012). A Dynamic Bottleneck-oriented Manufacturing Control. Berlin: GITO mbH Verlag.

Dieter Armbruster. Karl G. Kempf. (2012). Decision Policies for Production Networks. United States of America: Springer.

Guy. L. Curry, Richard M. Feldman. (2009). Manufacturing Systems Modeling and Analysis. United States of America: Springer.

Jean-Luc David, Mickey Gousset, Erik Gunvaldson. (2007). Professional Team Foundation Server. United States of America: Wiley Publishing, Inc.

Juan Prawda Witenberg. (2004). MÉTODOS Y MODELOS. DE INVESTIGACION DE OPERACIONES. México: Limusa.

L.R. Weatherford. (1998). INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN LA CIENCIA ADMINISTRATIVA. México: PEARSON.

Serret Moreno Jaime. (1995). MANUAL DE ESTADÍSTICA UNIVERSITARIA. Esic Editorial.

Stephen N. (2006). Planificación y Control de la Producción. México: PEARSON EDUCACIÓN.

Wallace J. Hopp, Mark L. Spearman. (2008). FACTORY PHYSICS. United States of America: Waveland Press, Inc.

Wallace J. Hopp. (2008). Supply Chain Science. United States of America: Waveland Press, Inc.