

Impacto de factores aleatorios en la identificación de Cuellos de Botella en
manufactura.

Cristhian Eduardo Castaño Ruiz. Código: 201052134.

Marcela Guzmán García. Código: 201052200.

Universidad del Valle.

Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Industrial.

Palmira.

2015.

Impacto de factores aleatorios en la identificación de Cuellos de Botella en
manufactura.

Cristhian Eduardo Castaño Ruiz. Código: 201052134.

Marcela Guzmán García. Código: 201052200.

Trabajo de grado presentado como requisito para
optar por el título de Ingeniero Industrial.

Director

JUAN JOSÉ BRAVO BASTIDAS

PH. D. EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Universidad del Valle.

Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Industrial.

Palmira.

2015.

*A mi padre Carlos René por permitirme soñar en grande y
ser ejemplo de responsabilidad y trabajo duro.*

*A mi madre Rita Nubia por ser la más comprensiva mujer,
por siempre desear lo mejor por nuestra familia, por ser
mi primera y más dura maestra, ella merece este
título más que nadie.*

*A mis amadas hermanas Adriana y Alejandra María
por su amor y ser las guías de mi vida.*

*A mis sobrinos Alejandro e Isabella por creer
siempre en mí y ser mi alegría todos
los días de mi vida.*

A mi cuñado Julio César por su cariño y apoyo siempre.

*A Cristhian Eduardo por ser mi compañero de camino, por su
paciencia, sabiduría, amor y el complemento que
hizo posible esta tesis.*

Marcela.

*Dedicado a mi mamá María Jose y a mi hermano David
por siempre creer en mí, darme su apoyo
incondicional y sin ningún interés.*

*A la señora Rita Nubia por apoyarme y no dejar
que desistiera de mis sueños.*

*A Natasha por acompañarme en el proceso de
elaboración de la tesis.*

*A Marcela Guzmán García por toda su ayuda y apoyo
que permitieron plasmar nuestras ideas y ejecutar
esta tesis de la mejor manera.*

A mi padre Henry por querer lo mejor para mí.

Cristhian.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos gozar de su presencia entre nosotros, por ser la guía de nuestras vidas y darnos la energía para comenzar, continuar y completar esta tesis en las largas jornadas que no distinguían horario.

A la Universidad del Valle, especialmente a la sede Palmira, por habernos brindado la sólida formación que nos permitirá titularnos como Ingenieros Industriales.

Le damos gracias a nuestro maestro Juan José Bravo Bastidas, PH. D. en Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle, quien nos brindó su apoyo incondicional en éste proceso, nos enseñó todo lo necesario y a pesar de sus compromisos se tomó el tiempo para hacer las correcciones pertinentes y guiarnos en la correcta realización de la presente tesis.

Por último agradecemos a nuestras familias y amigos que nos alentaron a seguir trabajando y desearon que todo saliera de la mejor manera.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	17
3. MARCO REFERENCIAL.....	18
3.1. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.	18
3.2. TEORÍA DE RESTRICCIONES, THROUGHPUT Y CUELLOS DE BOTELLA.	19
3.3. TEORÍA DE COLAS.	22
3.4. SIMULACIÓN.	23
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
5. FACTORES ALEATORIOS RELACIONADOS CON CUELLOS DE BOTELLA AL INTERIOR DE UNA PLANTA MANUFACTURERA.....	28
5.1. FACTORES ALEATORIOS QUE PUEDEN PRESENTARSE EN UNA PLANTA DE MANUFACTURA.....	28
5.1.1. Demanda. Cambio en la mezcla de productos.	29
5.1.2. Demanda. Tiempo entre llegada de pedidos.	30
5.1.3. Actividad e inactividad en las máquinas.	30
5.1.4. Balance de carga entre estaciones.	31
5.1.5. Tasa de utilización.....	31
5.1.6. Tamaño de lote.....	31
5.2. MEDICIÓN DEL IMPACTO DE LOS FACTORES ALEATORIOS IDENTIFICADOS EN LA CAPACIDAD DE LOS RECURSOS CUELLOS DE BOTELLA.	33
6. EXPERIMENTACIÓN.....	41
6.1. CASO DE ESTUDIO PEQUEÑO.....	41
6.1.1. Experimento 1.	45
6.1.2. Experimento 2.	46

6.2. CASO DE ESTUDIO ADAPTADO DE UNA EMPRESA DEL SECTOR ALIMENTICIO.	52
6.2.1. Descripción del caso de estudio.	52
6.2.2. Modelación del caso de estudio.	53
6.2.3. Experimento 1.	64
6.2.4. Experimento 2.	67
6.3. Beta (β) en simulación.	71
7. CONCLUSIONES.	73
BIBLIOGRAFÍA.	75

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Cuello de botella móvil.	15
Figura 2. Sistema de producción.	18
Figura 3. Precedencia en cadena para un trabajo en Flow shop.	19
Figura 4. Factores aleatorios.	32
Figura 5. Flujo de proceso, caso de estudio pequeño.	42
Figura 6. Caso de estudio pequeño.	43
Figura 7. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (1).	44
Figura 8. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (1).	45
Figura 9. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (2).	48
Figura 10. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (3).	48
Figura 11. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (4).	49
Figura 12. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (6).	50
Figura 13. Diagrama de flujo, caso de estudio.	54
Figura 14. Diagrama de proceso, caso de estudio.	55
Figura 15. Modelación de las estaciones de trabajo.	56
Figura 16. Distribución de las estaciones de trabajo en ProModel.	56
Figura 17. Paros programados.	57
Figura 18. Entidades.	57
Figura 19. Redes de rutas de trabajo.	58
Figura 20. Recursos.	58
Figura 21. Llegada de materia prima.	59
Figura 22. Variables.	59
Figura 23. Secuenciación del caso de estudio.	60
Figura 24. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (3).	61
Figura 25. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio.	62
Figura 26. Ciclo de la subrutina.	63
Figura 27. Beta en la simulación.	64
Figura 28. Llegada de materia prima, experimento 1.	65
Figura 29. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 1.	65
Figura 30. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (4).	68
Figura 31. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 2, caso de estudio (1).	69
Figura 32. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 2, caso de estudio (2).	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores aleatorios revisados.	28
Tabla 2. Ejemplo de mezcla de productos (Tiempo de operación en horas).	29
Tabla 3. Ejemplo mezcla de productos cuando DA = 2DB (Tiempo de operación en horas).....	29
Tabla 4. Ejemplo mezcla de productos cuando DB = 2DA (Tiempo de operación en horas).....	30
Tabla 5. Aparición de factores aleatorios en la literatura.	35
Tabla 6. Comparación por pares (1).	36
Tabla 7. Comparación por pares (2).	37
Tabla 8. Comparación por pares (3).	38
Tabla 9. Vector de prioridad a juicio de expertos.	39
Tabla 10. Vector de prioridad promedio.	40
Tabla 11. Tiempos de operación, caso de estudio pequeño.....	41
Tabla 12. Variación de porcentaje de bloqueos y throughput, experimento 1 (1). .	46
Tabla 13. Variación de porcentaje de bloqueos y throughput, experimento 1 (2). .	46
Tabla 14. Tiempos de operación, experimento 2.	47
Tabla 15. Modelación del proceso del experimento 2 (1).	47
Tabla 16. Modelación del proceso del experimento 2 (2).	49
Tabla 17. Comparación demanda de pintura versus demanda de esmalte (1).....	50
Tabla 18. Comparación demanda de pintura versus demanda de esmalte (2).....	50
Tabla 19. Cambio del porcentaje de bloqueo de las estaciones ante cambios en el tiempo entre llegadas.....	66
Tabla 20. Porcentaje de veces en que los equipos poseen colas.....	66
Tabla 21. Modelación de proceso, experimento 2, caso de estudio (1).	67
Tabla 22. Resultados de las variables, experimento 2 (1).	69
Tabla 23. Modelación de proceso, experimento 2, caso de estudio (2).	70
Tabla 24. Resultados de las variables, experimento 2 (2).	70

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Elementos básicos de una simulación en ProModel.	78
ANEXO 2. Cuestionario.	82
ANEXO 3. Tiempo promedio de la pintura en el sistema (minutos).	87
ANEXO 4. Tiempo promedio de la masa en el sistema (minutos).	88

GLOSARIO.

FLOW SHOP: tipo de proceso de producción en dónde los recursos avanzan de manera lineal siguiendo la misma ruta [1].

TEORY OF CONSTRAINTS (T.O.C): en español, Teoría de las restricciones, enseña de forma ordenada y basada en el sentido común cómo lograr un mejoramiento de los procesos al interior de una organización en términos de utilidades administrando el recurso más débil llamado restricción [2].

THROUGHPUT: término que no tiene traducción al español y se define como la velocidad a la cual el sistema genera dinero a través de las ventas [2].

WORK IN PROCESS (W.I.P): en español, Trabajo en proceso, se define como los productos, dentro de un proceso productivo, que están a la espera de ser completamente procesados [3].

RESUMEN.

Hoy en día en el sector industrial el logro de una alta eficiencia en las operaciones es de vital importancia para competir en el mercado. Los cuellos de botella en manufactura, específicamente, impiden el flujo continuo de producto a través del proceso, ocasionando desperdicios en la capacidad de algunos recursos y retrasos en la producción, es por ello que en las organizaciones se busca cada vez más, maneras de identificar y mitigar dichos cuellos de botella, muchas veces, sin tener en cuenta la aleatoriedad a la que está sujeto el sistema de producción en sí mismo, debido a factores como la demanda.

En la presente investigación se seleccionan factores aleatorios y se analiza su impacto en la identificación de cuellos de botella de una planta manufacturera, específicamente en una configuración tipo Flow shop. Se mide que tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella soportándose en un análisis basado en simulación discreta utilizando el software Promodel. Después de hacer la selección de los factores aleatorios a través de un análisis basado en la metodología del AHP, se simula un caso de estudio pequeño y se hacen las experimentaciones pertinentes en relación con los factores aleatorios seleccionados, observando el cambio en el throughput, para después replicarlas en un caso de estudio de una línea de producción real de una empresa del sector alimenticio. Finalmente se puede evidenciar como factores aleatorios, principalmente el cambio la demanda, influyen en el comportamiento de los cuellos de botella al interior de una planta manufacturera haciéndolos cambiar de ubicación en el tiempo dentro del proceso productivo, dichos cuellos de botella son llamados comúnmente “cuellos de botella móviles, dinámicos, cambiantes o flotantes”.

Palabras clave: Cuello de botella, cuello de botella móvil, throughput, simulación discreta, Promodel, factores aleatorios, Flow shop, demanda.

INTRODUCCIÓN.

El creciente avance en la firma de acuerdos de libre comercio en Colombia permite al sector industrial su ingreso a nuevas economías, enfrentándose a competir en mercados nuevos y con mayor exigencia, haciendo que deba mejorar su productividad e innovación a todo nivel, de lo contrario pone en riesgo su participación en dichos mercados y permanencia en los actuales, por lo cual se hace necesario para la industria enfocar esfuerzos en mejorar la eficiencia de sus operaciones [4].

El sector industrial y más específicamente en los procesos productivos la capacidad de respuesta ante los cambios que se puedan producir es uno de los factores más importantes a considerar en la eficiencia de las operaciones y ésta a su vez normalmente se ve reflejada en términos de costos y tiempo. Es ahí cuando la identificación de cuellos de botella se hace necesaria, dado que éstos impiden el flujo continuo de producto a través del proceso, ocasionando desperdicios en la capacidad de algunos recursos y retrasos en la producción [5].

La identificación de cuellos de botella en manufactura se ha realizado mediante métodos analíticos principalmente y también se ha utilizado, aunque en menor medida, la simulación. Los métodos analíticos se enfocan principalmente en evaluar las cargas de trabajo en un proceso productivo, mientras que la simulación, que ha sido poco usada, intenta predecir el comportamiento del proceso productivo mediante la realización de experimentos [5].

Los llamados cuellos de botella son recursos restringidos, limitaciones, que causan bajos niveles de eficiencia en la producción al interior de una organización. Cuando se quiere eliminar un cuello de botella se requiere ubicarlo en una máquina, operario, operación, etcétera, ya que éste puede variar en el tiempo al ser afectado por factores aleatorios como la demanda, dificultando su análisis [6].

En ésta investigación se busca analizar el impacto de factores aleatorios en la identificación de cuellos de botella de una planta manufacturera, específicamente en una configuración tipo Flow shop, es decir, donde los recursos avanzan linealmente de una operación a otra. Se considerarán conceptos asociados a indicadores de la teoría analítica de líneas de espera y se combinará con análisis basado en simulación. La aleatoriedad de la demanda será un factor relevante a considerar en los análisis, y se determinará la sensibilidad de las probabilidades de las estaciones a ser cuellos de botella, ante incrementos de la variabilidad de la demanda.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El término cuello de botella fue acuñado por primera vez por Eliyahu Goldratt en 1984 y lo definió como la restricción que limita el rendimiento de un sistema independientemente de lo bien que funcione [7]. Los cuellos de botella afectan las decisiones de tipo operacional en una organización ya que están directamente relacionadas con el qué hacer, con la cotidianidad de ésta [8].

El análisis de los cuellos de botella es utilizado dentro de la metodología de la Teoría de las Restricciones, TOC por sus siglas en inglés, como una manera de evaluar el desempeño de la producción en las organizaciones llevando, por lo general, al análisis del throughput el cual se define como la velocidad a la cual el sistema genera dinero a través de las ventas [2].

El throughput es crítico para el diseño, control y administración de los sistemas de producción dado que si un cuello de botella hace que el throughput sea menor [9], esto implica un indeseable desperdicio de tiempo y recursos como dinero, haciendo que las organizaciones sean menos eficientes en sus operaciones, poniendo en riesgo no solo la participación en mercados nuevos sino también la permanencia en los actuales [10].

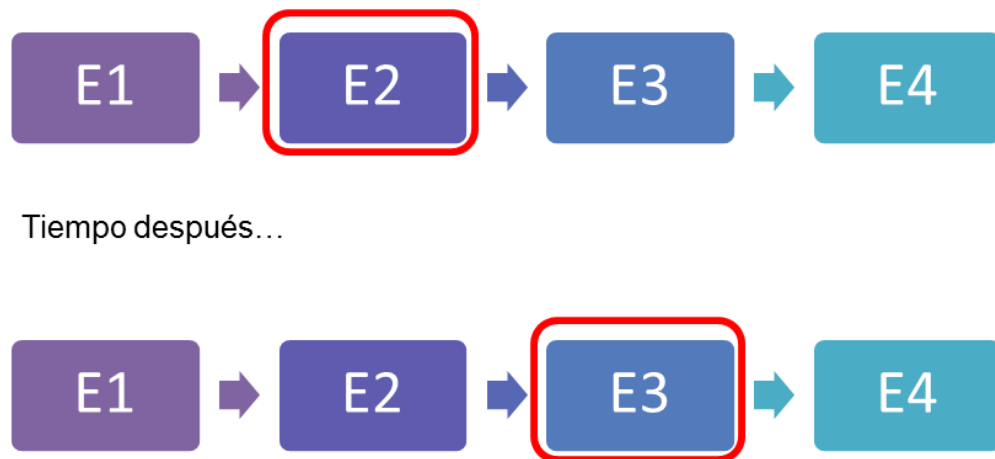
En la actualidad las organizaciones buscan maneras de mejorar su eficiencia a través de la identificación de cuellos de botella. Dicha identificación ha sido explorada desde diferentes puntos de vista dando lugar a diferentes métodos basados en la utilización [3], la actividad o inactividad de las máquinas [11], entre otros, teniendo en cuenta además la capacidad misma de los sistemas de producción y factores aleatorios como la demanda [12].

Un caso aplicativo que permite evidenciar las mejoras al identificar cuellos de botella, es Imusa S.A en donde se encontró a la operación de empaque como el cuello de botella del sistema y con la implementación de dicha metodología el throughput de esta restricción mejoró un 100% con respecto a su estado inicial, aumentando su capacidad de empaque al doble [13]. Sin embargo, en las organizaciones manufactureras existen factores aleatorios que afectan los cuellos de botella de un sistema, haciéndolos cambiar de ubicación en el tiempo, estos cuellos de botella hasta el momento han sido tratados sin tener en cuenta los cambios de ubicación que puedan tener, haciendo que aunque en el momento puedan ser mitigados después reaparezcan en otro lugar del sistema, haciendo persistir el problema.

Al abordar el análisis de cuellos de botella cambiantes, se deben evaluar los factores aleatorios que influyen en este comportamiento ya que estos son un resultado natural de los sistemas de producción. Un ejemplo que ilustra la

situación anteriormente descrita se muestra en la figura 1, donde se muestra una configuración tipo Flow shop de 4 estaciones de trabajo en la cual inicialmente el cuello de botella se encuentra en la estación 2 pero tiempo después cambia a la estación 3. La importancia del análisis de la dinámica de cuellos de botella cambiantes radica en que retrasos en producción se pueden dar en determinada operación pero tiempo después se podrán ubicar en otra operación haciendo difícil su seguimiento y control [3].

Figura 1. Cuello de botella móvil.



Fuente: elaboración propia.

Dada la necesidad de analizar cuellos de botella cambiantes en la industria [14], en la actual investigación se hará un estudio del impacto de factores aleatorios en estaciones de trabajo que sean propensos a ser cuellos de botella cambiantes en una planta con configuración tipo Flow shop, tal y como lo habían hecho Lawrence y Buss [3] en su investigación que, a través de un método analítico, miden qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella a través de una medida escalar que llamaron β . En la actual investigación, además, se pretende medir β soportándose en un análisis basado en simulación discreta apoyándose en conceptos asociados a indicadores de la teoría analítica de líneas de espera para el cálculo de las probabilidades, se capturará el estado de las estaciones de trabajo del caso de estudio elegido para saber en qué porcentaje son cuellos de botella, es decir, estaciones que poseen una cola que hacen que la estación inmediatamente anterior se bloquee y no pueda seguir produciendo a su ritmo habitual. Considerando lo anterior se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles factores aleatorios al interior de una planta manufacturera impactan en la identificación de cuellos de botella en una configuración tipo Flow shop?
- ¿Cuáles factores aleatorios son los más relevantes en relación con los cuellos de botella?
- ¿Qué relación se encuentra entre la aleatoriedad y los cuellos de botella en el modelo de simulación realizado?

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar el impacto de factores aleatorios en una planta tipo Flow shop, en la dinámica de cuellos de botella.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Identificar la relación entre los factores aleatorios de una planta de manufactura y la identificación de cuellos de botella.
- Seleccionar los factores aleatorios que sean más relevantes en la perturbación de los cuellos de botella, con fines de experimentación.
- Representar, a través de un modelo de simulación discreta, un caso de estudio tipo Flow shop que permita realizar experimentaciones asociadas a la relación entre aleatoriedad y cuellos de botella.

3. MARCO REFERENCIAL.

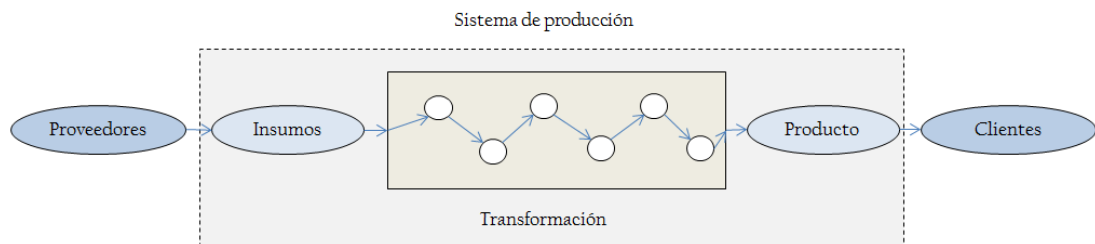
En este capítulo se tratarán conceptos relacionados con la presente investigación, los cuales permitirán entender el contexto en el cual ésta se desarrolla.

3.1. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.

Un sistema de producción es cualquier actividad que produzca algo. Sin embargo, se define de manera más formal como aquello que toma un insumo y lo transforma en una salida o producto con valor inherente [15].

En la figura 2 se observa un modelo de sistema de producción. Como parte del sistema ingresan los insumos que se adquieren mediante los proveedores, éstos ingresan al proceso de transformación que está compuesto por diferentes operaciones o estaciones de trabajo, la diversidad de los productos permite que no todos requieran ser sometidos a todas las operaciones. Como salida, se obtienen productos procesados con un valor agregado que posteriormente son entregados a los consumidores finales o clientes, y este proceso de distribución puede ser realizado mediante intermediarios como los centros de distribución o almacenes [15].

Figura 2. Sistema de producción.



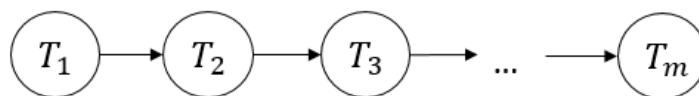
Fuente: adaptado de Sipper y Bulfin [15].

Una manera de clasificar un sistema de producción en manufactura es dependiendo del volumen y grado de personalización requerido en el proceso, así se distinguen cuatro opciones de procesos [1]:

- **Procesos de trabajo:** Es un proceso con la flexibilidad necesaria para producir una amplia variedad de productos en cantidades significativas, con complejidad y divergencia considerables en los pasos ejecutados [1].
- **Proceso por lotes:** Proceso que se distingue de un proceso de trabajo por sus características de volumen, variedad y cantidad [1].
- **Proceso en línea:** Proceso que se sitúa en el continuo entre el proceso por lotes y el proceso de flujo continuo; los volúmenes altos y los productos están estandarizados, lo que permite organizar los recursos en torno a productos particulares. Dentro de este tipo de proceso se distinguen dos estructuras básicas, el Job shop es dónde cada orden tiene una ruta de producción propia y el Flow shop donde todas las órdenes tienen la misma ruta [1].
- **Proceso de flujo continuo:** Representa el extremo de la producción estandarizada de alto volumen y flujos en línea rígidos; en el que la producción no se inicia ni se detiene durante períodos largos [1].

En la presente investigación se simulará un sistema de producción tipo Flow shop, en éste todos las tareas visitan las estaciones de trabajo en el mismo orden y la secuencia está altamente especificada, esto es llamado precedencia en cadena como se muestra la figura 3 [16].

Figura 3. Precedencia en cadena para un trabajo en Flow shop.



Fuente: Emmons y Vairaktarakis [16].

3.2. TEORÍA DE RESTRICCIONES, THROUGHPUT Y CUELLOS DE BOTELLA.

La “Teoría de las restricciones”, TOC por sus siglas en inglés, fue desarrollada por el físico israelí Eliyahu Goldratt, y enseña de forma ordenada y basada en el sentido común cómo lograr un mejoramiento de los procesos al interior de una organización en términos de utilidades administrando el recurso más débil llamado

restricción (cuello de botella), que es cualquier operación que limita a la organización de su objetivo principal: Ganar dinero [2].

Throughput es un término que no tiene traducción al español y se define como la velocidad a la cual el sistema genera dinero a través de las ventas. Existen diferentes tipos de restricciones que impiden que una organización aumente el throughput, las más comunes son [2]:

- De manufactura.
- De mercado.
- De materiales.
- Logísticas.
- De políticas.

Una restricción en manufactura es llamada frecuentemente cuello de botella, que se define como la operación que tiene la capacidad efectiva (máxima salida de producción) más baja entre todas las de la instalación y que, por lo tanto, limita la salida de productos del sistema [17].

Se han definido tres métodos principales para identificar el cuello de botella existente basados en las TOC, los cuales son: el centro de trabajo que tiene más trabajos en curso (o la línea de espera más larga), el equipo cuya tasa de utilización se acerca al 100% o el equipo cuya capacidad de producción es inferior o igual a la demanda [18].

Los cuellos de botella se pueden dar por circunstancias diversas, las más comunes son cargas de trabajo variables y mezclas de productos cambiantes dando lugar a los cuellos de botella cambiantes, también llamados móviles, flotantes o dinámicos, los cuales cambian de manera aparentemente aleatoria complicando la medición de la capacidad y por ende, la identificación de los mismos [8].

Los cuellos de botella que no se ven afectados por circunstancias cambiantes, como las mencionadas anteriormente, son llamados simples o estáticos. En su investigación Lawrence y Buss [3], definen cuello de botella Dominante al cuello de botella que a lo largo del tiempo tiene la tasa de utilización más alta, cuello de botella Exclusivo al centro de trabajo que, a lo largo del tiempo, tiene más trabajo en cola, en promedio que cualquier otro, e Inclusivos cuando varios centros de trabajo poseen colas muy similares a lo largo del tiempo.

Existen múltiples métodos para medir la capacidad de los recursos cuellos de botella, Lawrence y Buss [3] determinan la probabilidad de que un centro de trabajo sea el cuello de botella, es decir que tiene la mayoría de trabajo o clientes.

Se considera una instalación de manufactura con variedad de productos en n centros de trabajo. Esta instalación de producción se puede modelar con una Red de Jackson, asumiendo que: (1) cada centro de trabajo k tiene una distribución de tiempo de servicio exponencial con tasa μ_k . (2) Los trabajos de fuera del sistema llegan al centro de trabajo k como procesos Poisson independientes con tasa γ_k . (3) Cada vez que se completa el proceso en un centro de trabajo i , un trabajo se mueve a un centro de trabajo j con probabilidad p_{ij} o deja el taller con probabilidad $1 - \sum_j p_{ij}$. (4) La tasa de llegada agregada al centro de trabajo k es λ_k , donde $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ es la solución a las ecuaciones $\lambda_k = \gamma_k + \sum_i p_{ik} \lambda_i$. (5) La condición para estado estable es $\lambda_k < \mu_k$ para todos los centros de trabajo k [3].

Con estas suposiciones, se puede determinar la probabilidad de que un centro de trabajo sea el cuello de botella actual. Sea $(L_{q1}, \dots, L_{qn})$ un vector del número de clientes en cola en cada nodo de la Red de Jackson en estado estable. Por el resultado de Jackson, los L_{qi} son marginalmente independientes, con L_{qi} una función de masa idéntica con servidores de tipo $M/M/1$, como lo muestra la ecuación 1 [3].

Ecuación 1. Función de masa con servidores de tipo $M/M/1$.

$$\Pr\{L_{qi} = m\} = \begin{cases} 1 - \rho_i^2, & m = 0 \\ (1 - \rho_i)\rho_i^{m+1}, & m = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

Fuentes: Lawrence y Buss [3].

Donde $\rho_i \triangleq \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ es la utilización del centro de trabajo i . La medida del cuello de botella exclusivo será una proporción a largo plazo del tiempo que una maquina i particular tiene más clientes que ninguna otra máquina [3].

En configuraciones de trabajo casi o completamente equilibradas la tasa de utilización ρ en las estaciones llega a ser casi idéntica. Esto motiva a encontrar un método más exacto que permita evidenciar la relación de los factores aleatorios con cuellos de botella cambiantes. Lawrence y Buss sugieren la utilización de la medida escalar β para cuantificar el rango de aleatoriedad de un cuello de botella y es definido como se muestra la ecuación 2 [3].

Ecuación 2. Rango de aleatoriedad de un cuello de botella.

$$\beta = 1 - \frac{cv}{\sqrt{n}}$$

Fuentes: Lawrence y Buss [3].

Donde cv es el coeficiente de variación de las probabilidades de los cuellos de botella inclusivos de los n centros de trabajo y es igual a la magnitud relativa de la desviación estándar S , en comparación con la media de las probabilidades $\bar{x}$, como se muestra en la ecuación 3 [3].

Ecuación 3. Cálculo del coeficiente de variación.

$$cv = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

Fuente: Lawrence y Buss [3].

$\sqrt{n}$ Denota el coeficiente de variación de un vector de un 1 y $n-1$ ceros. Por lo tanto, β mide la diferencia relativa entre la instalación en cuestión y la condición ideal de un solo cuello de botella dominante. La medida de aleatoriedad β toma valores que van desde 0, para el caso de un único cuello de botella estático, es decir, que nunca se mueve, a 1, para el caso en el que todos los centros de trabajo son un cuello de botella con igual probabilidad [3].

3.3. TEORÍA DE COLAS.

Existen muchos fenómenos al interior de las organizaciones en los que ciertas entidades de carácter discreto (hombres, máquinas, mensajes, productos, etc.), llamados clientes o usuarios, utilizan, adaptándose a normas preestablecidas, ciertos servicios y medios que, con carácter limitado, hay a su disposición. Estas situaciones se conocen con el nombre de colas. Cada sistema de colas cuenta con cierto número de servidores o unidades de punto y de servicio y estos en conjunto reciben el nombre de centro de servicio [19].

En la teoría analítica de colas tanto las llegadas de los clientes como los tiempos de servicio se consideran usualmente de carácter aleatorio (que solo dependen del azar), y en ocasiones los clientes se verán obligados a esperar formando una cola o línea de espera [19].

Cuando un sistema de colas posee dos o más centros de servicio interconectados constituyen los que se llama una red de colas. Las redes de colas pueden ser abiertas, cuando los clientes entran y salen del sistema y cerradas, cuando los clientes no salen del sistema [19].

Las Redes de Jackson son redes de colas abiertas o cerradas que hacen parte de la teoría analítica de líneas de espera y satisfacen las condiciones del Teorema de Jackson, lo que es útil cuando se impone la restricción de que los clientes que son servidos por una de las colas de la red se deben mover con ciertas probabilidades prefijadas a otra cola de la red [20].

En su investigación Lawrence y Buss [3] usan las Redes de Jackson para entender el comportamiento de las colas en cada centro de trabajo dado que, dichas redes son flexibles pudiendo usarse en talleres de trabajo puros hasta en sistemas de producción de flujo en línea, además apoyados en un método analítico dan lugar a β , una medida escalar que mide qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella, es decir, la estación que en determinados momentos tiene el mayor número de trabajos o clientes.

3.4. SIMULACIÓN.

Cuando en el análisis de cuellos de botella existen variables aleatorias se hace útil emplear métodos diferentes a los analíticos, como lo es la simulación. Thomas H. Naylor, considerado el padre de la simulación la define como: “Una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo” [21].

La ejecución de modelos de simulación implica cálculos de manejo de archivos que tienen que ver con el almacenamiento y procesamiento cronológicos de los eventos del modelo, y de cálculos aritméticos y de contabilidad asociados con la generación de muestras aleatorias y recolección de estadísticas del modelo. Estos cálculos implican una lógica extensa en el desarrollo del procesamiento de listas y cálculos tediosos que requieren mucho tiempo. La naturaleza de estos cálculos hace que la computadora sea una herramienta esencial para ejecutar modelos de simulación y, a su vez, promueve el desarrollo de lenguajes de simulación especiales para computadora para realizar estos cálculos de una forma conveniente y eficiente [22].

Cuando la simulación evoluciona dependiendo de la ocurrencia de eventos en el tiempo se conoce como simulación de eventos discretos. Este proceso consiste en relacionar los diferentes eventos que pueden cambiar el estado de un sistema bajo

estudio por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas de un determinado evento que se esté analizando [23].

Existen diferentes lenguajes de simulación en el mercado, uno de los más usados es ProModel, paquete de software que cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más exactos respecto a lo que realmente sucede en el sistema estudiado [22].

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Para la realización de la presente investigación, se exploraron diferentes artículos publicados en revistas científicas relacionadas con cuellos de botella, cuellos de botella móviles, factores aleatorios y simulación, pero sólo se seleccionaron los que se consideraron pertinentes a la actual investigación. Diferentes autores han abordado el concepto de cuellos de botella, su identificación, análisis y mitigación, como lo son:

Lawrence y Buss [3] proponen un método para la detección de cuellos de botella en producción que cambian con el tiempo ya que hasta ese momento no se había investigado acerca de esto. Para entender el comportamiento de las colas en cada centro de trabajo utiliza la Red de Jackson y se analiza la probabilidad de que un centro de trabajo pueda ser un cuello de botella en el tiempo. Para efectos de comparación el sistema de producción es simulado mostrando resultados similares a los del modelo analítico. También se compara este método con dos políticas comúnmente utilizados en producción cuando el sistema se ve afectado por la variabilidad de la demanda, específicamente en el cambio de la mezcla de productos y el tiempo entre llegadas, en una de las políticas la capacidad adicional se asigna temporalmente al centro de trabajo cuello de botella actual y otra, en la que la capacidad del centro de trabajo más altamente utilizado es permanentemente aumentada, llegando a que estas ayudan a mejorar el funcionamiento del taller. Esto tiene un efecto secundario indeseable de incrementar significativamente la aleatoriedad del cuello de botella, es decir, la capacidad que posee una estación de trabajo de ser cuello de botella cuando su tasa de utilización es casi idéntica a la de las demás estaciones. Por el contrario, se demuestra que al aumentar la capacidad de centros de trabajo que no son cuellos de botella se mejora tanto el rendimiento del sistema como la reducción de la aleatoriedad aunque esta reducción es menor a la presentada por las políticas anteriores.

Esta fue la primera vez que se habló del concepto de cuellos de botella cambiantes y su robusto contenido analítico y metodología utilizada lo hace ideal para tomarlo como base para la presente investigación.

Lawrence y Buss [24] amplían la noción de cuello de botella desde la perspectiva económica, desarrollando el concepto de “cuello de botella económico”, el cual da una base económica para la administración y mejora de los cuellos de botella, lo cual es un claro avance dada la dificultad del anterior método para ser aplicado desde una perspectiva administrativa.

En su investigación Lu et al [12], estudian algunos factores que influyen en la aleatoriedad de los cuellos de botella al interior de una planta de manufactura.

Primero se dan las definiciones de cuello de botella y cuello de botella cambiante, después se analizan tres factores que pueden causar aleatoriedad, los cuales son la mezcla de productos, el tamaño de lote y el nivel equilibrado de carga, después se dan posibles soluciones para estos tres factores y para los cuellos de botella inevitables basándose en la TOC. El cambio en la mezcla de productos en ésta investigación es consecuencia de la variabilidad de la demanda, la cual también perturba el comportamiento del factor aleatorio el tiempo entre llegadas de productos.

Roser et al [11] proponen un método que detecta y monitorea cuellos de botella móviles momentáneos y determina el periodo de tiempo en que lo son, basándose en el tiempo en que una máquina está activa sin interrupción, es decir, se evalúa los factores aleatorios tasa de utilización y la actividad e inactividad de las máquinas. La idea es que la máquina con el mayor tiempo sin interrupción restringe a las demás. Se toman dos ejemplos computacionales con fines de experimentación, el primero es un Flow shop en el que se utiliza la medida escalar β introducida por Lawrence y Buss [3], el segundo es un ejemplo complejo de un sistema ramificado, y en estos el método propuesto es demostrado.

Roser et al [25] continúan con su método de detección y monitoreo de cuellos de botella móviles incluyendo un análisis de sensibilidad del throughput del sistema debido a dichos cuellos de botella. La mejora consiste en incluir un método para determinar el periodo de tiempo en el cual una máquina es cuello de botella simple y cuándo es un cuello de botella cambiante; después, el efecto de un estado j , en reparación o trabajando, por ejemplo, en una máquina i es calculado mediante ecuaciones, es decir, éste es el efecto que tiene el cuello de botella encontrado sobre el throughput en determinado periodo de tiempo. El método permite la predicción del desempeño del sistema basado en los cambios de variables en las máquinas y es verificado mediante un ejemplo de Flow shop en una sola simulación.

Li et al [9] estudian un nuevo método de detección de cuellos de botella evaluando el factor aleatorio tasa de utilización de las estaciones de trabajo. El método es impulsado por datos en tiempo real y este demostró ser efectivo para el corto y largo plazo usando los resultados de métodos analíticos y de simulación, que luego fueron comparados como se espera hacer en la presente investigación.

Tamilselvan [26] compara siete casos de estudio donde se identifica cuellos de botella y cuellos de botella cambiantes, en éstos se evalúan los factores aleatorios tasa de utilización y actividad e inactividad de las máquinas. Se propone un nuevo método para la determinación del tamaño del buffer ideal y estrategias para la mitigación de dichos cuellos, demostrando la eficacia en la reducción del impacto del cuello de botella y aumentando el rendimiento del sistema.

El análisis de cuello de botella para agotar el potencial de los recursos cuellos de botella como ruta eficiente para elevar la capacidad del sistema de fabricación en

red, optimizando la asignación de recursos, es usado por Jinzhao y Liangqing [27]. Proponen un modelo de proceso de manufactura de asignación de recursos basado en Redes de Petri el cual señala los recursos con la máxima tasa de utilización, es decir, los recursos cuellos de botella y asigna de manera eficiente los recursos disponibles, esto es validado con un ejemplo de simulación que indica que el modelo propuesto es factible y eficaz.

La anterior investigación es pertinente en cuanto a que el modelo propuesto soportado con simulación discreta demuestra buenos resultados aunque los autores reconocen en sus conclusiones que es necesario llevar a cabo una investigación más profunda para evaluar la factibilidad del método propuesto frente a otros.

Wang et al [28] desarrollaron un enfoque de identificación de la transición de un cuello de botella en el área de calidad de una fábrica utilizando los datos disponibles. Se presenta un modelo de cadena de Markov para evaluar el rendimiento de la calidad en sistemas de fabricación flexible con producción por lotes, evaluando los factores aleatorios: actividad e inactividad de las máquinas y los relacionados con la demanda, tiempo entre llegadas de pedidos y cambio en la mezcla de productos.

El modelo anterior es especialmente importante porque también utiliza las probabilidades de falla para identificar lo que llaman “cuello de botella de calidad” y realizan expresiones analíticas de la sensibilidad de la calidad con respecto a dichas probabilidades, lo cual será útil si uno de los factores aleatorios a simular tiene que ver con las fallas en las estaciones de trabajo.

El análisis de cuellos de botellas fue usado por Jian et al [18] para hacer un mejoramiento en cadena de las operaciones dando lugar a un balance entre la demanda y la logística interna en una organización basado en el principio de equilibrio logístico propuesto en la TOC. En cada eslabón se hace el cálculo de la tasa de la brecha entre la demanda y la oferta, la tasa de oferta se refiere al factor aleatorio tasa de utilización de las estaciones de trabajo. Es relevante porque demuestra en un caso real la aplicación de la TOC para la identificación de cuellos de botella.

Para la realización de la presente investigación se retomará la investigación Lawrence y Buss y los factores aleatorios tratados en las investigaciones anteriormente mencionadas.

5. FACTORES ALEATORIOS RELACIONADOS CON CUELLOS DE BOTELLA AL INTERIOR DE UNA PLANTA MANUFACTURERA.

Sin duda, las operaciones de las organizaciones se mueven en entornos cada vez más cambiantes, haciendo que las necesidades de producción cambien constantemente así como los cuellos de botella que se presentan dentro de dichas organizaciones. La dificultad está en que puede parecer que dichos cuellos de botella cambian de manera aparentemente aleatoria sin tener en cuenta que son causados por factores particulares que sí son aleatorios o que se ven afectados a su vez por otros factores como la demanda que en sí misma es cambiante y aleatoria. Al presentarse factores aleatorios que perturban los cuellos de botella en producción se hace difícil su identificación, seguimiento y control, disminuyendo la eficiencia de la producción y por ende la eficiencia de la organización, ya que pueden presentarse cambios en los plazos de entrega, niveles de inventarios, tiempos de proceso, entre otros.

5.1. FACTORES ALEATORIOS QUE PUEDEN PRESENTARSE EN UNA PLANTA DE MANUFACTURA.

Al hablar de factores aleatorios que pueden presentarse en una planta manufacturera, sin duda, el primero que se puede visualizar es la demanda, dado que si bien puede presentarse en forma de patrón también se sabe que está sujeta a la aleatoriedad inherente del mercado, así que si ésta cambia, la mezcla de productos y el tiempo entre llegadas también suele cambiar pudiendo perturbar en gran medida los cuellos de botella del sistema de producción. También existen otros factores que se ven influenciados por la demanda como lo son el tamaño de lote y la tasa de utilización de las estaciones de trabajo. Además existen otros factores que serán contemplados a continuación y son resumidos en la tabla 1, y que son producto de la revisión de literatura hecha previamente.

Tabla 1. Factores aleatorios revisados.

Factores revisados.	
1	Demanda. Cambio en la mezcla de productos.
2	Demanda. Tiempo entre llegada de pedidos.
3	Actividad e inactividad de las máquinas.
4	Balance de carga entre estaciones.
5	Tasa de utilización.
6	Tamaño de lote.

Fuente: elaboración propia.

5.1.1. Demanda. Cambio en la mezcla de productos.

La mezcla de productos consiste en todas las líneas de productos o artículos que una determinada compañía ofrece a la venta [29].

Sin lugar a dudas, el cambio en los pedidos de los clientes es un factor externo al proceso productivo de una compañía pero lo afecta haciendo cambiar la mezcla de productos de esta. Cambios en la mezcla de productos hacen que cambien las cargas en las estaciones de trabajo generando cuellos de botella [12].

Por ejemplo, considere dos máquinas M1 y M2 en una planta manufacturera las cuales producen principalmente dos productos A y B, como se muestra en la tabla 2. Si las cantidades demandadas cambian, la mezcla de productos también cambiará [12].

Tabla 2. Ejemplo de mezcla de productos (Tiempo de operación en horas).

Producto	Máquina	
	1	2
A	3	4
B	4	3

Fuente: Lu et al [12].

Considere D_A y D_B , las cantidades demandadas de A y B respectivamente, T_1 y T_2 el tiempo de trabajo total de M1 y M2 respectivamente [12].

Cuando $D_A = D_B$, las máquinas M1 y M2 ambas son cuellos de botellas o ninguna lo es, dado que $T_1 = T_2$;

Cuando $D_A > D_B$, M2 es la máquina cuello de botella, dado que si $D_A = 2D_B$ el producto A pasara 6 horas en M1 y 8 horas en M2, entonces $T_1 = \frac{10}{11}T_2$, M2 está más ocupada que M1, como se muestra en la tabla 3;

Tabla 3. Ejemplo mezcla de productos cuando $D_A = 2D_B$ (Tiempo de operación en horas).

Producto	Máquina		Demanda total
	1	2	
A	$2*3=6$	$2*4=8$	14
B	4	3	7
T	10	11	

Fuente: Lu et al [12].

Cuando $D_A < D_B$, M1 es la máquina cuello de botella, dado que si $D_B = 2D_A$ el producto B pasará 8 horas en M1 y 6 horas en M2, entonces $T_2 = \frac{10}{11}T_1$, M1 está más ocupada que M2, como se muestra en la tabla 4;

Tabla 4. Ejemplo mezcla de productos cuando $D_B = 2D_A$ (Tiempo de operación en horas).

Producto	Máquina		Demanda total
	1	2	
A	3	4	7
B	$2*4=8$	$2*3=6$	14
T	11	10	

Fuente: Lu et al [12].

5.1.2. Demanda. Tiempo entre llegada de pedidos.

Se define como el tiempo que transcurre entre la llegada de dos pedidos de clientes consecutivos. Si el tiempo entre llegadas de los pedidos es variable o aleatorio, la carga de las estaciones de trabajo también cambiará y la capacidad de producción se verá afectada.

Siendo λ la tasa de llegadas, el tiempo entre llegadas $\frac{1}{\lambda}$ de pedidos puede relacionarse con el número de trabajos en un centro de trabajo a través de la ecuación de Little, ecuación 4.

Ecuación 4. Ecuación de Little.

$$W = L * \left(\frac{1}{\lambda}\right)$$

Donde L es el número de trabajos en un centro de trabajo, λ se define como la tasa media de llegadas de trabajos y W es el tiempo que toma un trabajo para moverse a través del centro de trabajo [3].

5.1.3. Actividad e inactividad en las máquinas.

La actividad en una máquina se define como el tiempo en el que está activa, es decir el tiempo en el que está al servicio del proceso de producción. Sin embargo,

una máquina activa puede causar que otras máquinas esperen ya sea porque está completando una tarea causando la espera de la siguiente máquina o porque está siendo reparada causando bloqueos en las máquinas anteriores [11].

La inactividad en una máquina se define como el tiempo en el que esta no está al servicio del proceso de producción ya que está esperando a que se complete una tarea en otra máquina por ejemplo, la llegada de una parte o servicio, o por la remoción de una parte [11].

5.1.4. Balance de carga entre estaciones.

En las actividades de producción reales, hay muchos factores que pueden hacer cambiar la carga de trabajo entre estaciones, como la mezcla de productos que se ha mencionado anteriormente. Si la nueva gama de productos hace que la utilización de la capacidad de todos los recursos se equilibre, es decir, que la tasa de utilización sea casi idéntica, hace que la probabilidad de aparición de un cuello de botella en el sistema se vea reforzada dado que, cualquier cambio aleatorio o no, en la demanda por ejemplo, generará un nuevo cuello de botella en cualquier parte del sistema y será difícil predecir su ubicación, por lo que la gestión de la producción será más compleja [12].

5.1.5. Tasa de utilización.

Se refiere al grado en que el equipo, el espacio o la mano de obra se emplean, y se expresa como la razón porcentual de la tasa de producción entre la capacidad máxima de producción. La tasa de producción podría estar directamente afectada por la aleatoriedad de la demanda haciendo aleatoria la tasa de utilización, es decir, la aleatoriedad de la tasa de utilización es una consecuencia de la aleatoriedad de la demanda.

Una alta tasa de utilización puede indicar la existencia de cuellos de botella, ya que a mayor tasa de utilización menor holgura para absorber cambios en la demanda [9].

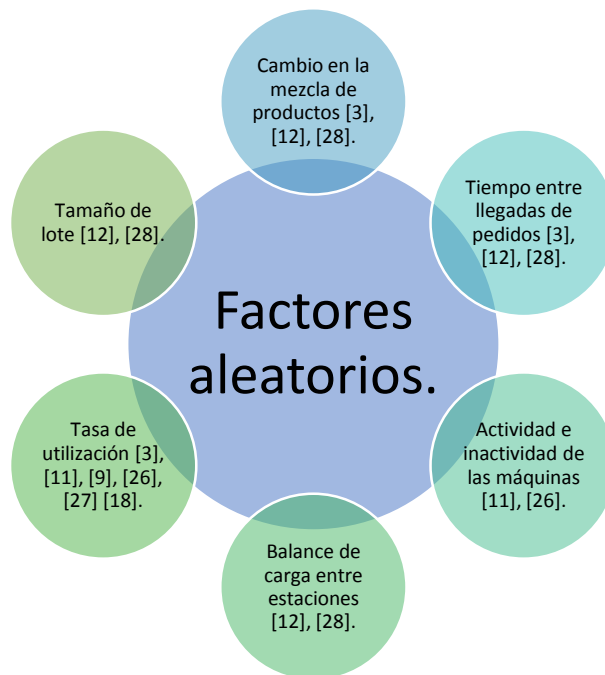
5.1.6. Tamaño de lote.

El tamaño del lote, sin duda, está directamente relacionado con la demanda de productos, ya que ésta determina cuándo y cuánta va ser la producción en determinado periodo de tiempo, además el tamaño de lote de producción también tiene mucho que ver con el tiempo de preparación y el inventario de trabajo en proceso, W.I.P., por sus siglas en inglés. Cuanto más grande es el tamaño de lote, menos el tiempo de preparación y más alto será el inventario W.I.P. Sin embargo, si el tamaño de lote es demasiado pequeño, el tiempo de preparación

será demasiado largo comparado con el tiempo de procesamiento, y se desperdiciará la capacidad de la máquina, incluso puede causar desplazamiento en los cuellos de botella [12].

A través de la revisión de literatura se pudieron evidenciar varios factores aleatorios que perturban a los cuellos de botella en una planta manufacturera. En la figura se pueden observar los factores aleatorios que han sido claramente tratados como causantes de perturbaciones de cuellos de botella por diversos autores, demostrándose su relevancia dentro del campo estudiado y de esta investigación además, tomándose dichos factores como base para hacer la selección de los más importantes que serán simulados y analizados posteriormente.

Figura 4. Factores aleatorios.



Fuente: elaboración propia.

5.2. MEDICIÓN DEL IMPACTO DE LOS FACTORES ALEATORIOS IDENTIFICADOS EN LA CAPACIDAD DE LOS RECURSOS CUELLOS DE BOTELLA.

En esta parte de la investigación se seleccionarán los factores aleatorios que serán usados para experimentar en la simulación. La selección se hace basándose en la metodología de selección del Proceso Analítico Jerárquico, AHP por sus siglas en inglés. El AHP está diseñado para situaciones en que las ideas, sentimientos y emociones que afectan el proceso de toma de decisiones se cuantifican y así obtener una escala numérica para priorizar las alternativas [30].

En este caso se tienen cuatro criterios de selección, el primero: “Número de veces que aparece un factor en la literatura consultada”, de esta manera se podrá conocer la relevancia que se le ha dado a cada uno de los factores en la literatura científica y los que más han sido usados son considerados los más pertinentes en ésta investigación ya que se evidencia la necesidad de conocer más de cómo dichos factores perturban el comportamiento de los cuellos en manufactura.

El tipo de variable a utilizar es cuantitativa, relaciona la cantidad de veces que un factor aleatorio ha sido usado en relación con el impacto en cuellos de botella en la literatura consultada. En la tabla 5 se muestra la cantidad de veces que ha sido mencionado por algunos autores, cada factor, relacionado con la perturbación de los cuellos de botella en manufactura. En esta misma tabla se promedia la aparición de cada factor con respecto a la totalidad de veces que han aparecido los factores aleatorios con relación a los cuellos de botella.

Los otros dos criterios de selección son el juicio de tres expertos en el área de producción/operaciones con una amplia experiencia en dicho campo. Se catalogaron como expertos a aquellas personas que han investigado y publicado artículos científicos relacionados con problemáticas de plantas de manufactura, a saber:

- Pablo César Manyoma Velásquez, Ingeniero Industrial de la Universidad Autónoma de Occidente. Especialista en Sistemas Gerenciales en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Magister en Ingeniería de la Universidad del Valle. Doctor en Ingeniería: Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle. Entre sus áreas de interés se destacan los Métodos de trabajo y mejoramiento de procesos. Actualmente hace parte de grupo de investigación de Logística y Producción de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle. Ha publicado investigaciones relacionadas con manufactura en diferentes revistas científicas.
- Oscar Rubiano Ovalle, Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, Especialista en Finanzas de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, Experto en Prospección y Gestión de la Tecnología, de la

Universidad de Sevilla (España). Doctor en Ingeniería Industrial de la Universidad de Sevilla (España). Posee 11 años de experiencia trabajando para la Organización Carvajal en las áreas de planificación y control de la producción y proyectos, costos industriales y logística. Adicionalmente ha realizado publicaciones en Journals Internacionales y presentaciones. Especialista colaborador en el Centro Nacional de Productividad, en el área de Productividad, y ha participado en asistencia a reconocidas organizaciones en Colombia, como Panamco-CocaCcola, Schneider Electric, Sucromiles, Frutaroma, Clínica Valle de Lili, Coats Cadena, Comfamiliar Cartagena, Comfamiliar Pereira, Banco de Occidente, Niviglobal, entre otras. Entre sus áreas de interés se destacan la Gerencia de Operaciones y la Logística. Actualmente hace parte de grupo de investigación de Logística y Producción de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle. Ha publicado investigaciones relacionadas con manufactura en diferentes revistas científicas además de haber hecho ponencias a nivel nacional e internacional sobre sus investigaciones.

- Juan Pablo Orejuela Cabrera, Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle, Cali, Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle, Cali. Entre sus áreas de interés se destacan la Administración de la cadena de abastecimiento y Simulación de sistemas de producción y logística. Actualmente hace parte de grupo de investigación de Logística y Producción de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle. Ha publicado investigaciones relacionadas con manufactura en diferentes revistas científicas.

Dichos expertos calificaron la importancia de un factor en relación al siguiente nuevo factor como se muestra en el anexo 2.

El AHP establece una matriz de comparación por pares de $n \times n$, que cuantifica el juicio del tomador de decisiones de la importancia relativa de los criterios. La comparación por pares se hace de modo que el criterio en la fila i ($i = 1, 2, \dots, n$) se califica con respecto a cada criterio alterno. Si a_{ij} define el elemento (i, j) de la matriz, el AHP utiliza una escala numérica del 1 al 9 en la cual $a_{ij} = 1$ significa que i y j son de igual importancia, $a_{ij} = 5$ indica que i es mucho más importante que j , y $a_{ij} = 9$ indica que i es extremadamente más importante que j . Otros valores intermedios entre 1 y 9 se interpretan según corresponda. La consistencia en el juicio implica que si $a_{ij} = k$, entonces $a_{ji} = \frac{1}{k}$.

Tabla 5. Aparición de factores aleatorios en la literatura.

Factor						
Autor	Cambio en la mezcla de productos	Tiempo entre llegadas de pedidos	Actividad e inactividad en las máquinas	Balance de carga entre estaciones	Tasa de utilización	Tamaño de lote
Lawrence y Buss	X	X		X	X	
Lu et al	X	X		X		X
Roser et al			X		X	
Li et al					X	
Tamiselvan			X		X	
Jinzhao et al					X	
Wang et al	X	X				X
Jian et al					X	
Total (veces)	3	3	2	2	6	2
Promedio	16,67%	16,67%	11,11%	11,11%	33,33%	11,11%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Comparación por pares (1).

Alternativas		Mezcla de productos	Tiempo entre llegadas	Inactividad de máquinas	Balance de carga	Utilización	Tamaño de lote
		A	B	C	D	E	F
Mezcla de productos	A	1	1/3	5	7	5	5
Tiempo entre llegadas	B	3	1	7	7	7	5
Inactividad de máquinas	C	1/5	1/7	1	1/5	1/5	1/7
Balance de carga	D	1/7	1/7	5	1	3	5
Utilización	E	1/5	1/7	5	1/3	1	3
Tamaño de lote	F	1/5	1/5	7	1/5	1/3	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Comparación por pares (2).

Alternativas		Mezcla de productos	Tiempo entre llegadas	Inactividad de máquinas	Balance de carga	Utilización	Tamaño de lote
		A	B	C	D	E	F
Mezcla de productos	A	1	3	5	7	7	1
Tiempo entre llegadas	B	1/3	1	1/3	5	9	7
Inactividad de máquinas	C	1/5	3	1	5	5	5
Balance de carga	D	1/7	1/5	1/5	1	1	1/3
Utilización	E	1/7	1/9	1/5	1	1	1/5
Tamaño de lote	F	1	1/6	1/5	3	5	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Comparación por pares (3).

Alternativas		Mezcla de productos	Tiempo entre llegadas	Inactividad de máquinas	Balance de carga	Utilización	Tamaño de lote
		A	B	C	D	E	F
Mezcla de productos	A	1	5	3	1/3	3	5
Tiempo entre llegadas	B	1/5	1	1/3	1/7	1/3	1
Inactividad de máquinas	C	1/3	3	1	1/5	1	3
Balance de carga	D	3	7	5	1	5	7
Utilización	E	1/3	3	1	1/5	1	3
Tamaño de lote	F	1/5	1	1/3	1/7	1/3	1

Fuente: elaboración propia.

Además, todos los elementos diagonales a_{ii} de la matriz son iguales a 1, porque estos elementos califican cada criterio contra sí mismo. En las tablas 6, 7 y 8 se muestra la comparación por pares de los factores aleatorios relacionados con el comportamiento de los cuellos de botella en manufactura según el juicio de los expertos, éstos resultados fueron obtenidos de los cuestionarios realizados [30].

Los pesos relativos de las alternativas se determinan normalizando las matrices para crear una nueva matriz. Este proceso requiere dividir los elementos individuales de cada columna entre la suma de la columna. En las matrices normalizadas se calcula el promedio de las filas y así se obtienen los vectores de prioridad mostrados en tabla 9.

Tabla 9. Vector de prioridad a juicio de expertos.

Alternativas	Experto 1	Experto 2	Experto 3
1.	26%	35%	24%
2.	42%	22%	5%
3.	3%	23%	11%
4.	13%	4%	25%
5.	9%	3%	11%
6.	8%	13%	5%

Fuente: elaboración propia.

Promediando los resultados del criterio 1 (número de veces que aparece un factor en la literatura consultada) consignados en la tabla 5, con los pesos relativos de los vectores de prioridad, tabla 9, se obtiene la prioridad de cada una de las alternativas como se muestra en la tabla 10. Finalmente se toma la decisión de con cuáles se experimentará así que se eligen los tres de mayor peso: 1. Mezcla de productos, 2. Tiempo entre llegada de pedidos y 6. Tasa de utilización. El resultado también es pertinente a la investigación ya que los factores seleccionados se ajustan para ser programados a la simulación.

Tabla 10. Vector de prioridad promedio.

Alternativas	Prioridad
1.	25%
2.	21%
3.	12%
4.	13%
5.	14%
6.	9%

Fuente: elaboración propia.

6. EXPERIMENTACIÓN.

Para dar cumplimiento a este objetivo se representa un caso de estudio pequeño donde se experimentará con los factores aleatorios seleccionados, véase sección 5.2. Se estudiará de qué forma impactan dichos factores aleatorios al sistema de producción con el fin de analizar y entender de una forma más sencilla y clara los factores para replicarlos en un caso de estudio basado en una línea de producción real ya que si un sistema tan pequeño y controlado sufre perturbaciones por causa de la aleatoriedad, ¿qué pasará con un sistema mucho más grande y estocástico?

6.1. CASO DE ESTUDIO PEQUEÑO.

Este caso de estudio pequeño fue adaptado de Lozano [31] y tomado como base para realizar las experimentaciones de los factores aleatorios seleccionados a través de la metodología del A.H.P., para luego ser replicados en un caso de estudio de una empresa dedicada a la producción de dulces del Valle del Cauca, Colombia.

Una compañía se dedica a la producción de pinturas, posee 5 líneas de producción y su línea de vinilos es la más vendida. Los vinilos son manufacturados a partir de cierta materia prima. Cada 20 minutos llegan 12 unidades de materia prima. La materia prima es procesada en un molino, donde se produce 1 unidad pintura. El tiempo de proceso para el molino es de 35 minutos, luego la pintura es llevada a un tanque de dilución donde es homogenizada en un tiempo de 43 minutos. La pintura es puesta en un tanque de tintura donde es procesada según el color requerido y éste proceso sigue una distribución normal de media 45 minutos y una desviación estándar de 5 minutos. Al final de este proceso la pintura sale de la línea de producción.

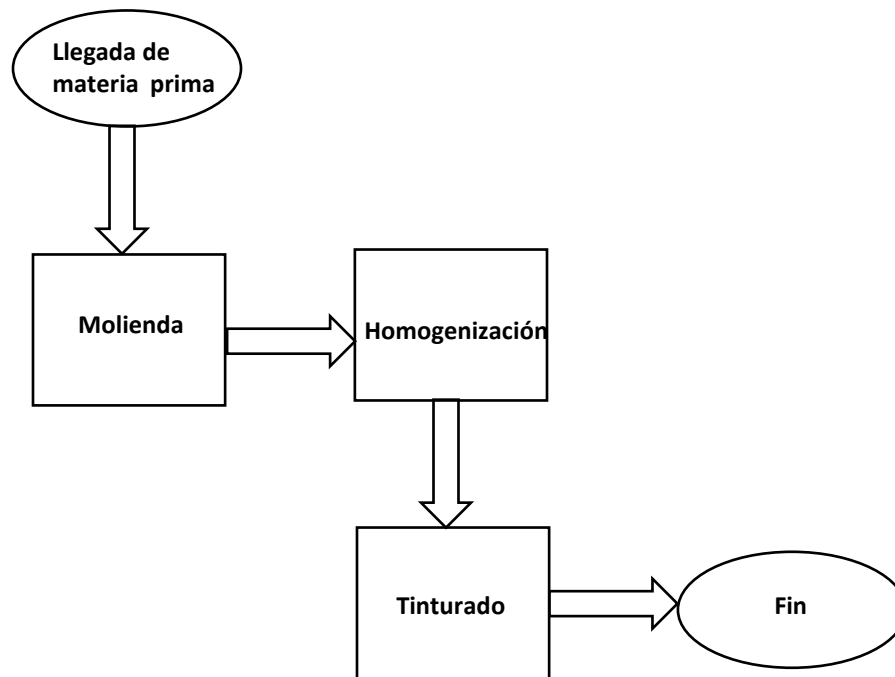
A continuación se muestran los tiempos de operación en la tabla 11 y el diagrama de flujo del proceso de elaboración de pintura, figura 5.

Tabla 11. Tiempos de operación, caso de estudio pequeño.

Estación de trabajo	Tiempo de operación (Minutos)
Molino	35
Tanque de dilución	43
Tanque de tintura	Normal: $\mu = 45$, $\sigma = 5$

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Flujo de proceso, caso de estudio pequeño.



Fuente: elaboración propia.

Se procede a simular en el software Promodel el proceso productivo (caso de estudio pequeño) como se representa en la figura 6. Debido a la naturaleza aleatoria del modelo es necesario determinar su distribución de probabilidad y la longitud de las réplicas. La variable aleatoria elegida para determinar el número de réplicas es el tiempo promedio de la pintura en el sistema (minutos). El procedimiento que se lleva a cabo para determinar el número de réplicas consiste en correr el modelo de simulación con 50 réplicas inicialmente como se muestra en el anexo 3. Mediante la utilización de la herramienta Stat::Fit se hace el análisis de ajuste de probabilidad y se determina que la distribución puede ser uniforme (121, 136), o puede ser exponencial con media 121 minutos y desviación estándar de 7,42 minutos.

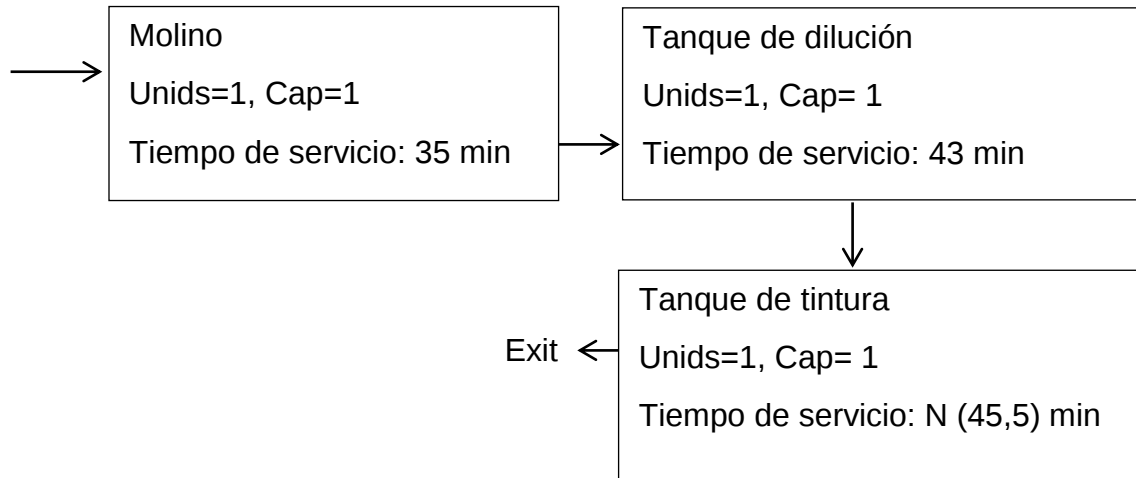
Dado que la variable aleatoria, tiempo promedio de la pintura en el sistema, no sigue una distribución normal se hace uso del Teorema de Tchebycheff, ecuación 5, da para calcular la longitud de la réplica [32].

Figura 6. Caso de estudio pequeño.

Arribo

Entidad= Materia_prima

Frecuencia= 20 min



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 5. Número de réplicas para una variable aleatoria que no sigue una distribución Normal.

$$n = \frac{1}{\alpha} * \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)^2$$

Fuente: García et al [32].

Dónde:

n= Número de réplicas.

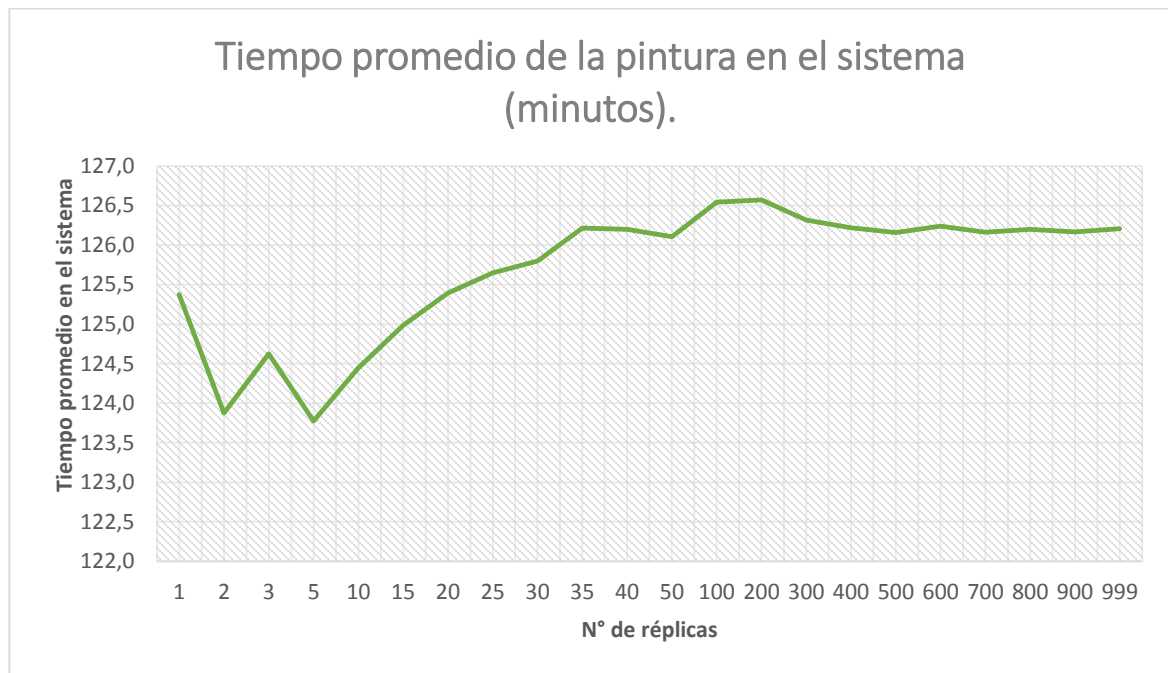
α = Nivel de rechazo.

σ = Desviación estándar.

ϵ = Exactitud deseada.

Para las 50 réplicas se obtiene una media de 128,41 minutos y una desviación estándar de 3,09 minutos. Se reemplazan los datos en la ecuación 5, con un nivel de aceptación del 90% y una exactitud deseada de $\pm 0,5$ se obtiene que el modelo se debe replicar 382 veces. La figura 7 muestra el comportamiento de la variable aleatoria donde se puede observar que a partir de 382 veces las réplicas tienden a tener poca variación.

Figura 7. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (1).

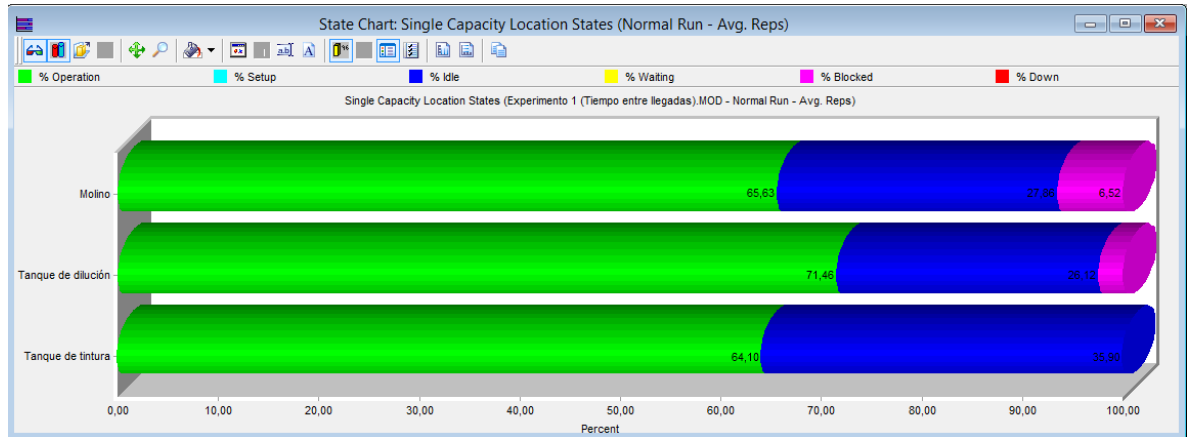


Fuente: elaboración propia.

El caso de estudio planteado es simulado con 382 réplicas, obteniendo los resultados mostrados en la figura 8, extraída de Promodel, para los estados de la capacidad de cada locación, dónde las partes sombreadas en verde representan el porcentaje del tiempo en qué la estación de trabajo está en operación, azul cuando está ociosa y morado cuando está bloqueado, es decir, no puede producir a su ritmo habitual ya que existe una cola de producto en la estación posterior.

A partir de la figura 8 se observa que el mayor bloqueo, lo presenta el molino, el 6,52% de las veces, el tanque de dilución sólo el 2,42% y el tanque de tintura no presenta bloqueos, en éste caso la simulación en Promodel arroja un throughput, en promedio, de 8 productos.

Figura 8. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (1).



Fuente: elaboración propia.

Conociendo las variables de interés, porcentaje de bloqueo en los equipos y throughput, se tiene un escenario base del caso de estudio pequeño en el cual se experimentará con los factores aleatorios (tiempo entre llegadas y mezcla de productos) seleccionados mediante la metodología del A.H.P., véase la sección 5.2.

6.1.1. Experimento 1.

En este experimento surge la pregunta: ¿De qué manera el tiempo entre llegadas de pedidos afecta el porcentaje de bloqueos de equipos y el throughput a la planta objeto de estudio?

Para responder esta pregunta, se simula el caso de estudio planteado con 382 réplicas, y variando el tiempo entre llegadas de pedidos del escenario base, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 12 para los estados de la capacidad de cada locación y el throughput.

Después de hacer una perturbación al factor tiempo entre llegadas de pedidos se observa en la tabla 12 que el porcentaje de bloqueos y throughput para cada tiempo entre llegadas es diferente. Se muestra así que si el tiempo entre llegadas de los pedidos cambia, la carga de las estaciones de trabajo por lo tanto cambiará el cuello de botella de un equipo a otro y su throughput se verá afectado.

Tabla 12. Variación de porcentaje de bloqueos y throughput, experimento 1 (1).

Tiempo entre llegadas (minutos)	% Bloqueo en el molino	% Bloqueo en tanque de dilución	Throughput
15	5,49	4,4	7,96
17	0,01	0,54	7
20	6,52	2,42	8
23	3,36	3,7	7,79
25	0,06	0,84	7

Fuente: elaboración propia.

En el escenario base con un tiempo entre llegadas de pedidos de 20 minutos el mayor porcentaje de bloqueo lo presenta el molino y un throughput de 8 unidades, variando el tiempo entre llegadas de pedidos cambiará el porcentaje de bloqueo y throughput como se observa en la tabla 13.

Tabla 13. Variación de porcentaje de bloqueos y throughput, experimento 1 (2).

Tiempo entre llegadas (minutos)	Mayor % de bloqueos		Throughput
	Molino	Tanque de dilución	
15	X		7,96
17		X	7
20	X		8
23		X	7,79
25		X	7

Fuente: elaboración propia.

6.1.2. Experimento 2.

Otro factor seleccionado en la sección 5.2 es la mezcla de producto con el cual también se experimentará.

En este punto surge otra pregunta interesante para responder ¿Cuál sería el efecto en el porcentaje de bloqueos de equipos y el throughput en la planta al adicionar otro producto? Dicha pregunta está directamente relacionada con el factor: Cambio en la mezcla de productos.

En este caso se agrega al escenario base el producto Esmalte que se manufactura a partir de la materia prima “Y” que llega cada 40 minutos y la pintura

se manufactura a partir de la materia prima “X” que llega cada 20 minutos. En la tabla 14 se muestran los tiempos de proceso para cada una de las entidades pintura y esmalte.

Tabla 14. Tiempos de operación, experimento 2.

Productos a procesar	Tiempo de operación (minutos)		
	Molino	Tanque de dilución	Tanque de tintura
Pintura	35	43	Normal: $\mu= 45$, $\sigma= 5$
Esmalte	43	10	Normal: $\mu= 30$, $\sigma= 1$

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de establecer el número de réplicas para este experimento se corre el modelo con 50 réplicas evaluando como variable aleatoria el tiempo de los productos en el sistema en promedio, resultando que no siguen una distribución normal, por lo tanto se usa el teorema de Chevycheff, ecuación 5, y se obtiene que deben realizarse 513 réplicas, como se muestra en la figura 9. Los resultados del porcentaje de bloqueo de los equipos se muestran en la figura 10 para los estados de la capacidad de cada locación. Allí se observa que el mayor bloqueo se presenta en el tanque de dilución. También en el experimento se obtiene un throughput de 8 productos procesados, 6 unidades de pintura y 2 de esmalte.

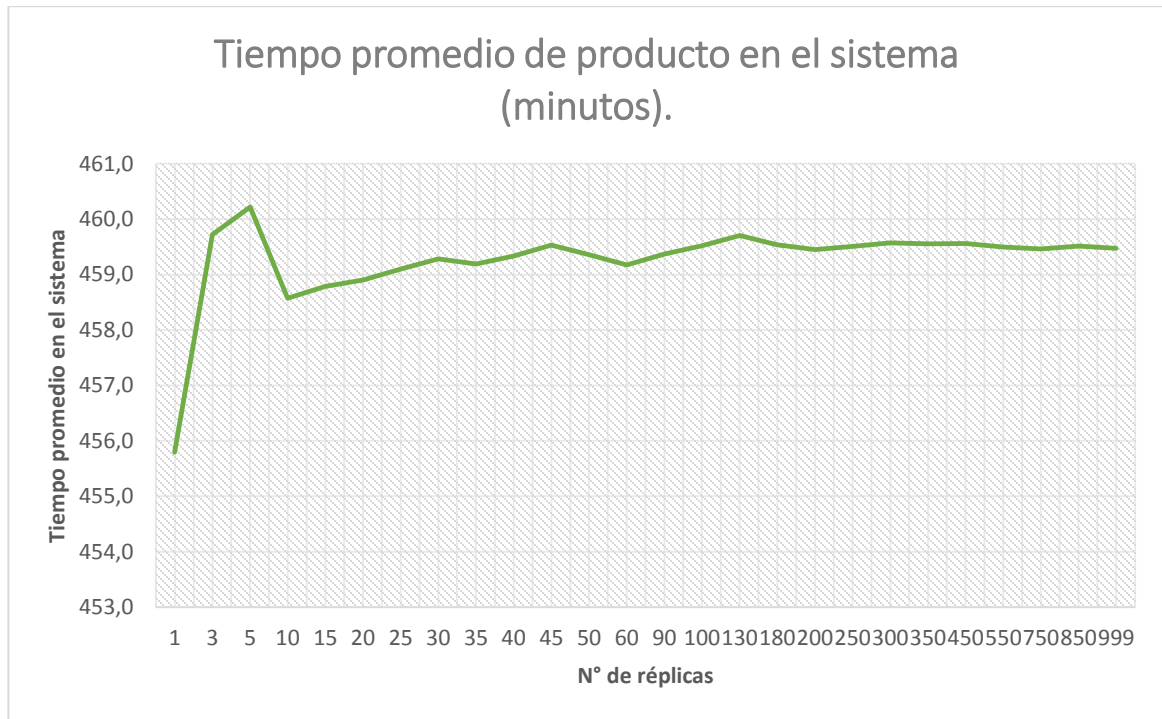
Ahora, como adición a este experimento, si las cantidades demandas cambian, la mezcla de productos cambiará y ¿los bloqueos de los equipos también cambiarán?, ¿qué sucede si la demanda del esmalte es mayor que la de pintura? Para responder a dichas preguntas se hace que la demanda de esmalte el doble que la de la pintura por lo cual los tiempos de procesamiento en cada equipo cambian como se muestra la tabla 15.

Tabla 15. Modelación del proceso del experimento 2 (1).

Productos a procesar	Tiempo de operación (minutos)		
	Molino	Tanque de dilución	Tanque de tintura
Pintura	35	43	Normal: $\mu= 45$, $\sigma= 5$
Esmalte	86	20	Normal: $\mu= 60$, $\sigma= 2$

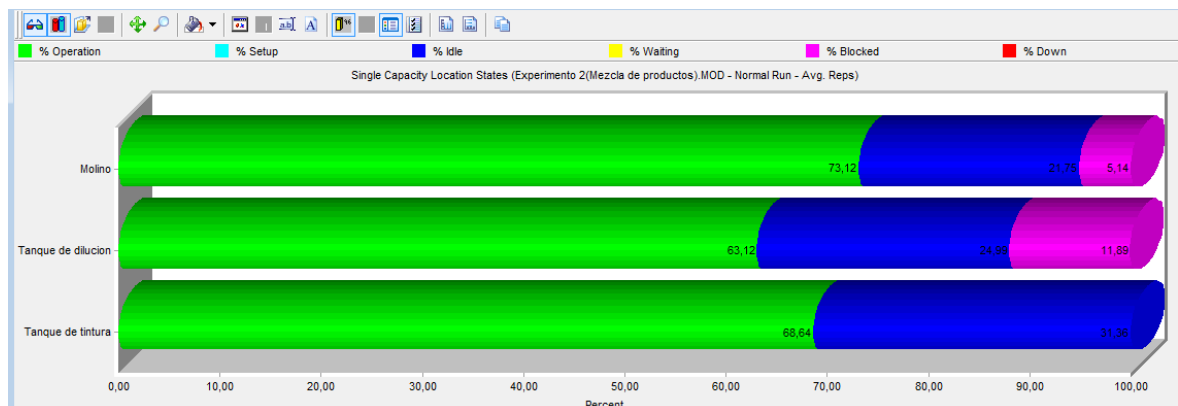
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (2).



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (3).

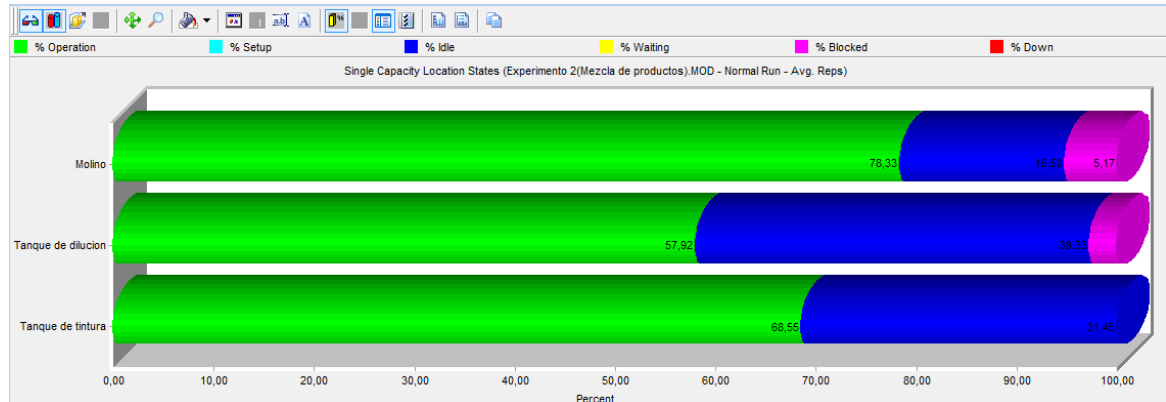


Fuente: elaboración propia.

Se corre el modelo con 513 réplicas y se obtiene que el mayor bloqueo se presenta en el molino, como se muestra en la figura 11. También se obtiene un

throughput menor, de 7 productos procesados, tal como se esperaba ya que aumenta el tiempo de procesamiento del esmalte.

Figura 11. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (4).



Fuente: elaboración propia.

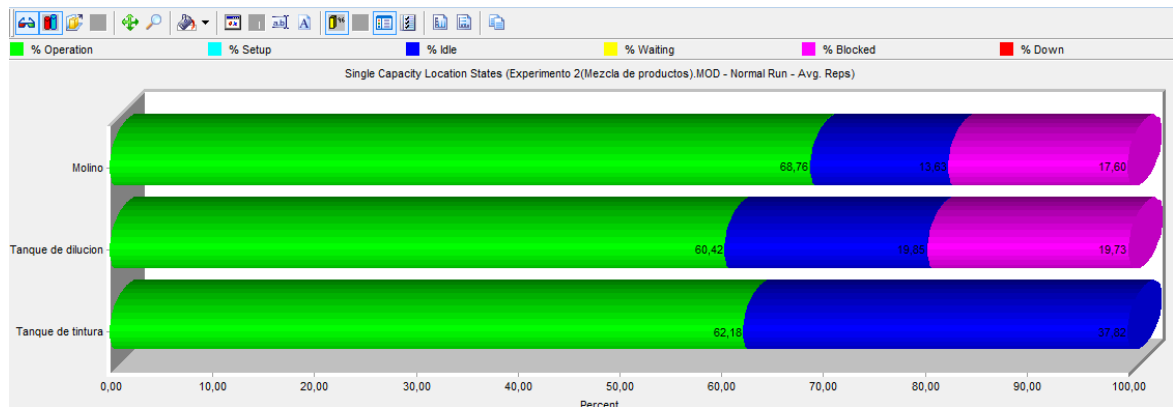
Ahora tomando el caso contrario, es decir, doblando la demanda de pintura, los tiempos de procesamiento de los equipos cambian como se muestra la tabla 16. Se corre el modelo con 513 réplicas y se obtiene que el mayor bloqueo se encuentra en el tanque de dilución como muestra la figura 12 y un throughput de 4,4 productos procesados, en promedio.

Tabla 16. Modelación del proceso del experimento 2 (2).

Productos a procesar	Tiempo de operación (minutos)		
	Molino	Tanque de dilución	Tanque de tintura
Pintura	70	86	Normal: $\mu=90$, $\sigma=10$
Esmalte	43	10	Normal: $\mu=30$, $\sigma=1$

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio pequeño (6).



Fuente: elaboración propia.

En experimentos posteriores se observa un comportamiento iterativo del cuello de botella, estando en el molino y en el tanque de dilución dada cierta demanda de pintura, 2, 3, 4 y 5 veces mayor que la demanda de esmalte como se observa en las tablas 17 y 18.

Tabla 17. Comparación demanda de pintura versus demanda de esmalte (1).

Demanda de pintura > demanda esmalte	% BLOQUEO EN MOLINO	% BLOQUEO EN TANQUE DE DILUCIÓN
2:1	17,6	19,73
3:1	13,85	3,3
4:1	26,8	28,75
5:1	34,79	12,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Comparación demanda de pintura versus demanda de esmalte (2).

Demanda de pintura > Demanda de esmalte	Cuello de botella	
	Molino	Tanque de dilución
Factor		
2:1		X
3:1	X	
4:1		X
5:1	X	

Fuente: elaboración propia.

De ésta manera se concluye que el cambio en los tiempos de llegada involucrando aleatoriedad en el sistema abre la interesante posibilidad de presentar bloqueos de manera iterativa ante aumentos en la demanda de pintura.

En ésta sección se pudo experimentar con los factores aleatorios seleccionados y observar como dichos factores impactan a un sistema de producción pequeño, el más pequeño a representar, demostrando que con simples cambios en el tiempo entre llegadas y la mezcla de productos los cuellos de botella del sistema se movilizan, haciéndose preguntar si eso también sucederá en un caso de estudio más grande, basado en una línea de producción real como el representado en la siguiente sección. Además hace notar que la aleatoriedad en los cuellos de botella tiene gran impacto en la práctica dado que, es bien conocida, que hasta ahora en muchas organizaciones se sigue considerando que los cuellos de botella son estáticos, cuando a veces no lo son y la solución más sencilla, de aumentar la capacidad del sistema, no mitiga el cuello de botella causando retrasos en producción y los indeseables desperdicios de tiempo y recursos. Es por lo anterior que la apreciación de dónde están los cuellos de botella debería pasar a ser flexible, es decir, no sólo tratar de mitigar el cuello de botella actual, sino también descubrir si se mueve dicho cuello de botella y cómo lo hace a través del tiempo, con el objetivo de enfrentar la aleatoriedad inherente a la que se ve sometida el sistema y así mitigar efectivamente los cuellos de botella.

6.2. CASO DE ESTUDIO ADAPTADO DE UNA EMPRESA DEL SECTOR ALIMENTICIO.

En la sección anterior se comprobó la relación entre la aleatoriedad y los cuellos de botella en un caso de estudio pequeño tipo Flow shop, de hecho, el caso más pequeño a representar. En dicho caso se hicieron evidentes las perturbaciones causadas por la aleatoriedad de la demanda en el comportamiento de los cuellos de botella, con cambiar tan sólo el tiempo entre llegadas o introducir otro producto al sistema el cuello de botella se movilizó de una estación a otra, haciéndose preguntar ¿si eso sucedió con el caso de estudio más pequeño, qué sucederá con un caso de estudio tipo Flow shop adaptado de una línea de producción real? Es por ello, que en esta sección se procede a simular los factores aleatorios seleccionados en la sección 5.2, tal como se hizo en el caso de estudio pequeño para determinar qué tan sensible es el sistema ante los cambios de estos factores y cómo se perturban los cuellos de botella. Además se introducirán algunas variables que capturarán y almacenarán la cantidad de veces en que las estaciones de trabajo son cuellos de botella, tal y como lo habían hecho Lawrence y Buss [3] en su investigación a través de un método analítico.

6.2.1. Descripción del caso de estudio.

El caso de estudio usado en ésta investigación es adaptado de Sánchez [33] y se centrará en una de las líneas de producción de una empresa del sector alimenticio dedicada a la producción de dulces del departamento del Valle del Cauca, Colombia. El proceso de producción inicia con la carga de 148 kilogramos de materias primas cada 45 minutos en un mezclador, centro de trabajo donde se homogeniza y estabiliza la fórmula del producto. Algunos materiales son cargados por tubería y otros deben ser cargados manualmente por el operador de la máquina, tomando en promedio, según el estudio realizado un tiempo de 4.78 minutos para la actividad de cargue de materiales.

El producto debe ser homogenizado por un periodo de 27.63 minutos, para luego ser transportado a la siguiente estación de trabajo, dicha actividad de transporte es realizada por el operador ayudado de una olla con rodamiento y el producto es dividido en 4 lotes de 37 kilogramos cada uno. Para la operación de descargue se ha observado que el operador requiere de 30 segundos para descargar un lote de 37 kilogramos desde el mezclador hacia una olla, transporta el producto a una velocidad de 40 metros por minuto, requiere de 80 segundos para descargar la olla en una mesa de enfriamiento y regresa con la olla vacía a una velocidad de 60 metros por minuto, recorriendo una distancia de 10 metros entre el mezclador y las mesas de enfriamiento.

Los lotes deben permanecer por un tiempo mínimo de 20 minutos en la mesa de enfriamiento, con el fin de que cumplan con el temperado requerido por el

producto. Actualmente se cuenta en la planta de producción con mesas de enfriamiento con capacidad de almacenamiento para 10 lotes de 37 kilogramos. De las mesas de enfriamiento el producto se transporta en un tiempo aproximado de 10 segundos hacia una maquina estiradora (actualmente se cuenta con 2) donde se ejecuta la operación correspondiente, la cual según análisis estadísticos procesa los 37 kilogramos en un tiempo distribuido normalmente con una media de 19 minutos y una desviación estándar de 2 minutos. Todo el producto estirado se destina hacia unas mesas que generan calor, en las cuales los lotes deben permanecer alrededor de 5 minutos en estabilización. Posteriormente los lotes se procesan en el Extruder que cuenta con una velocidad de proceso de 211.43 kg / hora, es decir, 1 lote de 37 kilogramos demora 10.5 minutos en ser procesado.

Por último el producto pasa por 3 troqueles, con las velocidades de producción descritas a continuación:

Troquel 1: 66.3 Kg / Hr, 33.5 min/lote de 37 kg.

Troquel 2: 89.2 Kg / Hr, 24.88 min/lote de 37 kg.

Troquel 3: 80.0 Kg / Hr, 27.75 min/lote de 37 kg.

Estas máquinas presentan continuos problemas mecánicos y eléctricos, los cuales representan paros de proceso que afectan el flujo de la línea y se les ha realizado seguimiento estadístico, dando como resultado tiempos distribuidos uniformemente así:

Troquel 1: U(8.49,16.99) min.

Troquel 2: U(10.42,16.05) min.

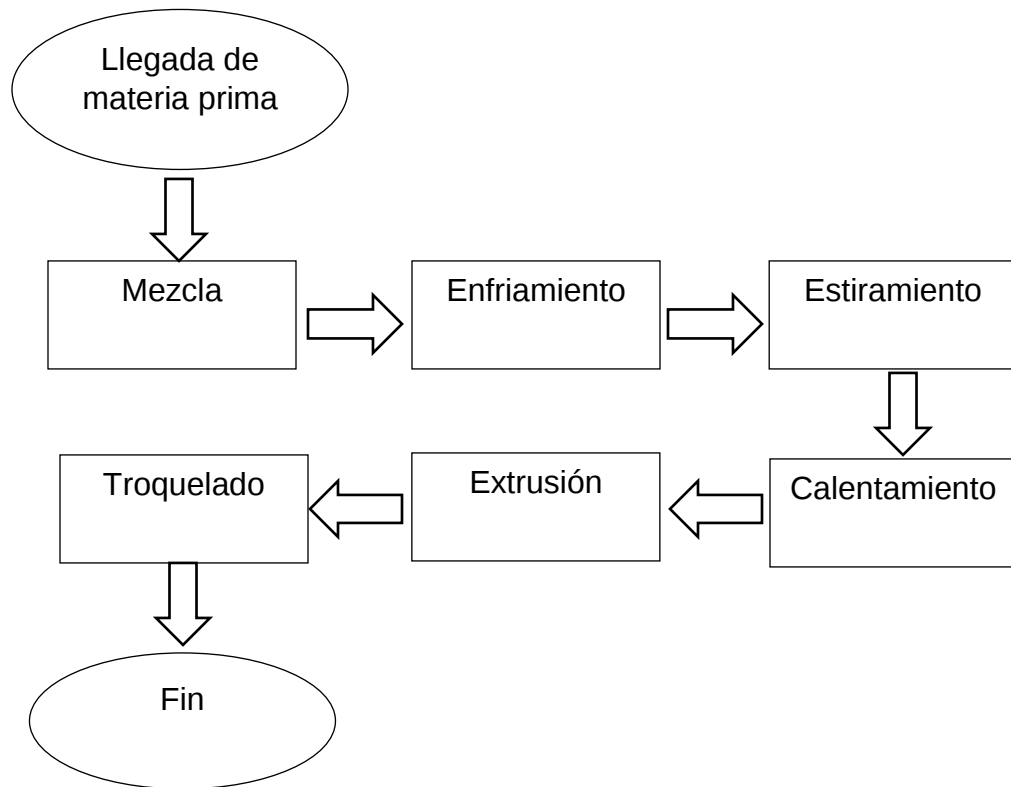
Troquel 3: U(22.43,31.28) min.

La planta opera desde las 10:00 pm del día domingo hasta las 10:00 pm del día sábado en turnos rotativos de 8 horas, además los paros programados se hacen cada 9 turnos (4320 minutos).

6.2.2. Modelación del caso de estudio.

Con el fin de entender mejor el proceso de la línea de producción se ha realizado el diagrama mostrado en la figura 13, a continuación.

Figura 13. Diagrama de flujo, caso de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se procede a modelar el proceso productivo, como se muestra en la figura 14. El primer paso fue crear los centros de trabajo de manera individual con sus respectivas capacidades, número de unidades y reglas de llegada como se muestra en la figura 15, exportada desde el software ProModel, todo esto con base en la información recopilada anteriormente excepto por el almacén de materia prima, el cual no existe físicamente ya que la materia prima llega a través de una tubería a la mezcladora.

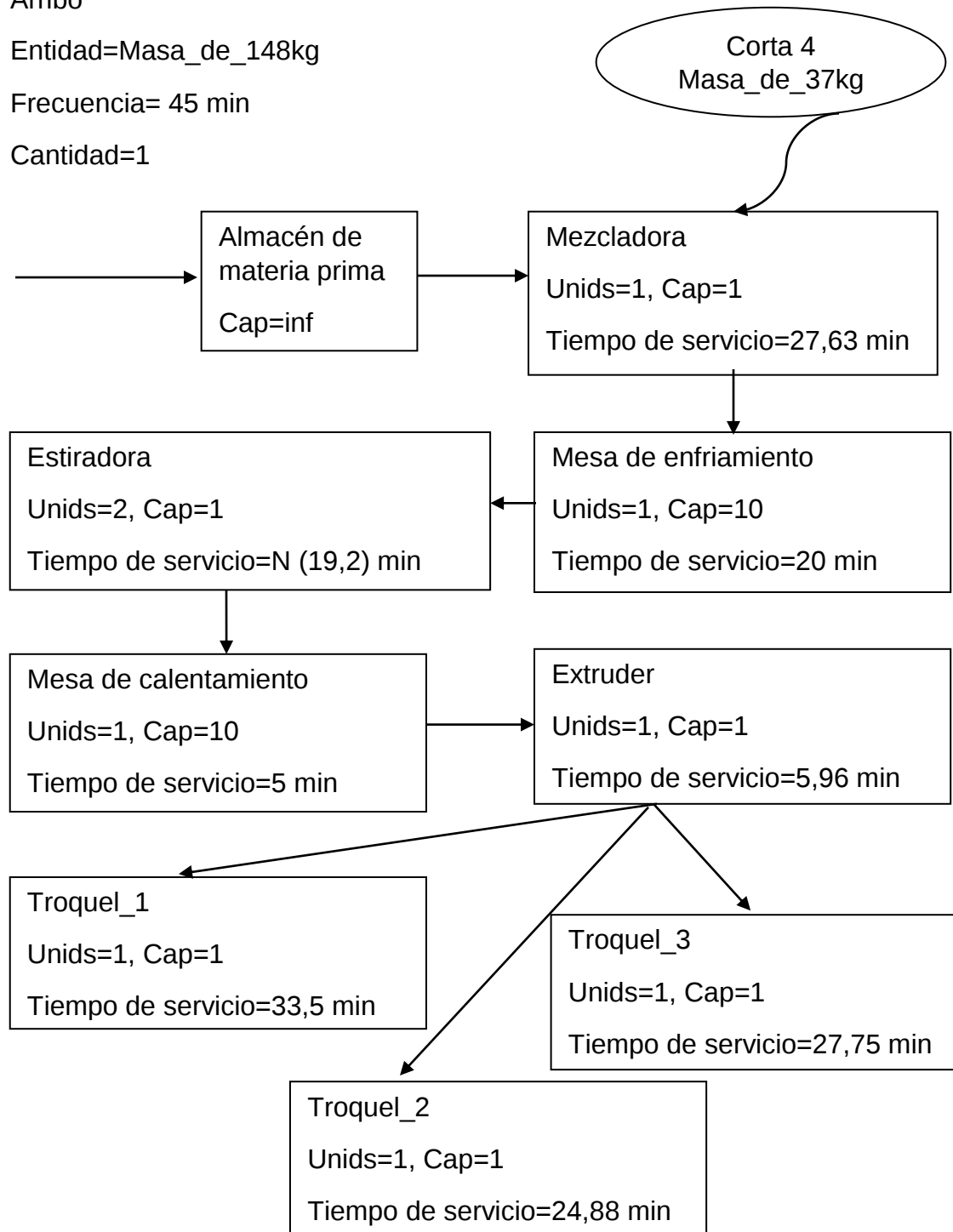
Figura 14. Diagrama de proceso, caso de estudio.

Arribo

Entidad=Masa_de_148kg

Frecuencia= 45 min

Cantidad=1



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Modelación de las estaciones de trabajo.

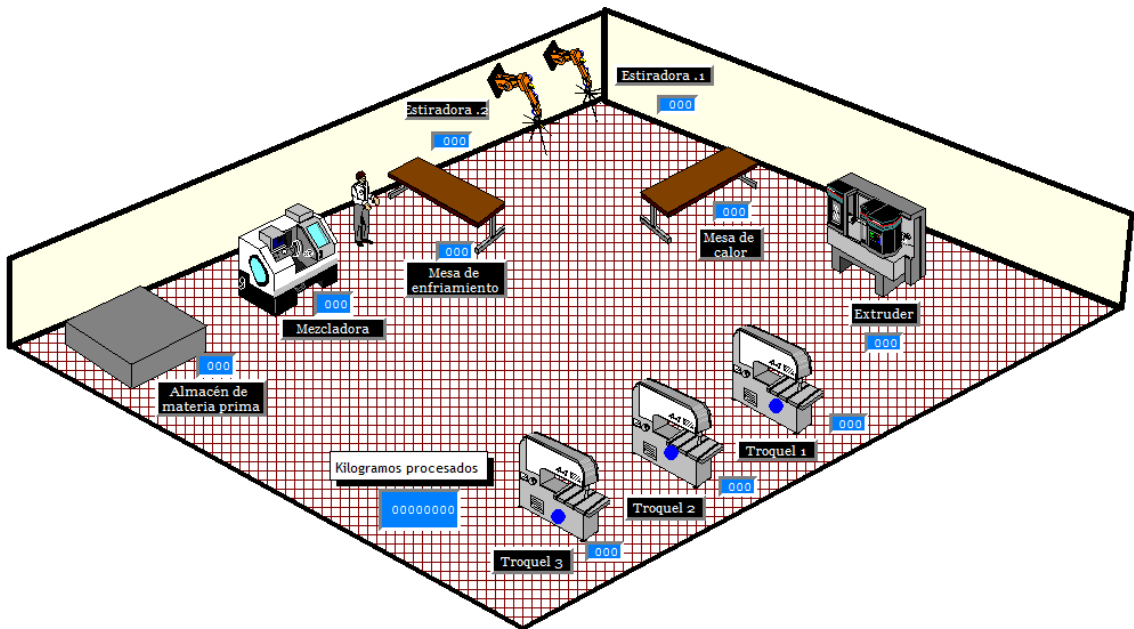
***** Locations *****						
Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost	
Mezcladora	1	1	Time Series	Oldest, ,		
Estiradora_	1	2	Time Series	Oldest, , First		
Estiradora_.1	1	1	Time Series	Oldest, ,		
Estiradora_.2	1	1	Time Series	Oldest, ,		
Extruder	1	1	Time Series	Oldest, ,		
Mesa_de_enfriamiento	10	1	Time Series	Oldest, FIFO,		
Mesa_de_calor	10	1	Time Series	Oldest, FIFO,		
Troquel_1	1	1	Time Series	Oldest, , First		
Troquel_2	1	1	Time Series	Oldest, , First		
Troquel_3	1	1	Time Series	Oldest, ,		
materia_prima	inf	1	Time Series	Oldest, ,		

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

Como se observa en la figura 15, existen 2 estiradoras y la mesa de enfriamiento y la de calor pueden almacenar hasta 10 lotes de 37 kilogramos. La distribución de los centros de trabajo es mostrada en la figura 16.

Los paros de los troqueles también fueron programados en el modelo en el software en el menú Locations, columna DTs, clock, como muestra la figura 16 para el Troquel 1.

Figura 16. Distribución de las estaciones de trabajo en ProModel.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Paros programados.

```
*****
*                               Clock downtimes for Locations                               *
*****
```

Loc	Frequency	First Time	Priority	Scheduled	Disable	Logic
Troquel_1	4320 min	rand <4320>	99	No	No	WAIT U<8.49,16.99>
Troquel_2	4320 min	rand <4320>	99	No	No	WAIT U<10.42,16.05>
Troquel_3	4320 min	rand <4320>	99	No	No	wait U<22.43,31.28>

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

Se asumen fallas con una frecuencia de 4320 minutos, 9 turnos, entre cada paro y la primera ocurrencia es programada al azar entre 0 y 4320 minutos para garantizar la aleatoriedad del sistema. Cuando se corre el modelo se puede observar un punto sobre los troqueles, el color verde es en operación, azul ocioso y rojo es parado por mantenimiento.

Posteriormente son creados la materia prima y el producto terminado como muestra la figura 18.

Figura 18. Entidades.

```
*****
*                               Entities                               *
*****
```

Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
Masa_de_148kg	50	Time Series	
Masa_de_37kg	50	Time Series	

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

Con el objetivo de que el operario de la línea pueda transportar los lotes de 37 kilogramos se programa una ruta de 10 metros de longitud que va desde la mezcladora hasta la mesa de enfriamiento y el operario puede moverse en ambas direcciones como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Redes de rutas de trabajo.

***** * Path Networks * *****							
Name	Type	T/S	From	To	BI	Dist/Time	Speed Factor
Red	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	10	1

***** * Interfaces * *****							
Net	Node	Location					
Red	N1	Mezcladora					
	N2	Mesa_de_enfriamiento					

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

El recurso es llamado Operario 1, transporta un lote cada vez y regresa a la mezcladora, posee las velocidades para cargar, depositar y transportarse con o sin lotes descritas anteriormente. La programación en el software Promodel es mostrada en la figura 20.

Figura 20. Recursos.

***** * Resources * *****							
Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search	Path	Motion	Cost
Operario 1		By Unit	Closest	Oldest	Red Home: N1 <Return>	Empty: 60 mpm Full: 40 mpm Pickup: 30 Seconds Deposit: 80 Seconds	

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

La materia prima llega en lotes de 148 kilogramos al almacén de materia prima ficticio de uno por vez cada 45 minutos como en la figura 21, garantizando inventario para la mezcladora.

Figura 21. Llegada de materia prima.

```
*****
*                               Arrivals                               *
*****
```

Entity	Location	Qty Each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Masa_de_148kg	materia_prima	1	0	inf	45	

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

También se programa una variable llamada Kg_procesados que captura la cantidad de kilogramos procesados en el tiempo de simulación como muestra la figura 23.

Figura 22. Variables.

```
*****
*                               Variables (global)                       *
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
kg_Procesados	Integer	0	Time Series

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

Ahora se procede a secuenciar el proceso como se muestra en la figura 22.

Primero los lotes de 148 kilogramos llegan al almacén de materia prima, luego pasan a la mezcladora en un movimiento que dura 4.78 minutos, en la mezcladora es procesado durante 27.63 minutos y monitoreado por el operario, posteriormente es dividido en 4 lotes de 37 kilogramos y el operario los transporta uno a uno a la mesa de enfriamiento donde esperan 20 minutos para después pasar, en un movimiento que dura 10 segundos, a alguna de las estiradoras. Cuando el lote pasa a alguna de las estiradoras es procesado en un tiempo que se distribuye uniformemente con una media de 19 minutos y una desviación estándar de 2 minutos, luego es transportado a la mesa de calor en un movimiento que dura 20 segundos y permanece allí durante 5 minutos. Después cada lote es transportado al extruder en un movimiento que dura 10 segundos, permanece allí 10.5 minutos para después pasar a alguno de los troqueles disponibles en un movimiento que dura 10 segundos y permanece allí un tiempo de 33.5, 24.88 ó 27.75 minutos según sea el caso.

Figura 23. Secuenciación del caso de estudio.

***** * Processing *							

Process				Routing			
Entity	Location	Operation	Blk	Output	Destination	Rule	Move Logic
Masa_de_148kg	materia_prima	SEND 1 Masa_de_148kg	1	Mezcladora	Mezcladora	FIRST 1	MOVE FOR 4.78 MIN
Masa_de_148kg	Mezcladora	GET Operario WAIT 27.63 MIN FREE Operario SPLIT 4 AS Masa_de_37kg	1	Masa_de_37kg	Mezcladora	SEND 1	
Masa_de_37kg	Mezcladora		1	Masa_de_37kg	Mesa_de_enfriamiento	FIRST 1	MOVE WITH Operario THEN FREE
Masa_de_37kg	Mesa_de_enfriamiento	WAIT 20 MIN	1	Masa_de_37kg	Estiradora_	TURN 1	MOVE FOR 10 SEC
Masa_de_37kg	Estiradora_	WAIT N(19,2) MIN	1	Masa_de_37kg	Mesa_de_calor	FIRST 1	MOVE FOR 20 SEC
Masa_de_37kg	Mesa_de_calor	WAIT 5 MIN	1	Masa_de_37kg	Extruder	FIRST 1	MOVE FOR 10 SEC
Masa_de_37kg	Extruder	WAIT 10.5 MIN	1	Masa_de_37kg	Troquel_1	FIRST 1	MOVE FOR 10 SEC
				Masa_de_37kg	Troquel_2	FIRST	MOVE FOR 10 SEC
				Masa_de_37kg	Troquel_3	FIRST	MOVE FOR 10 SEC
Masa_de_37kg	Troquel_1	WAIT 33.50 MIN INC kg_Procesados	1	Masa_de_37kg	EXIT	FIRST 1	
Masa_de_37kg	Troquel_2	WAIT 24.88 MIN INC kg_Procesados,37	1	Masa_de_37kg	EXIT	FIRST 1	
Masa_de_37kg	Troquel_3	WAIT 27.75 MIN INC kg_Procesados,37	1	Masa_de_37kg	EXIT	FIRST 1	

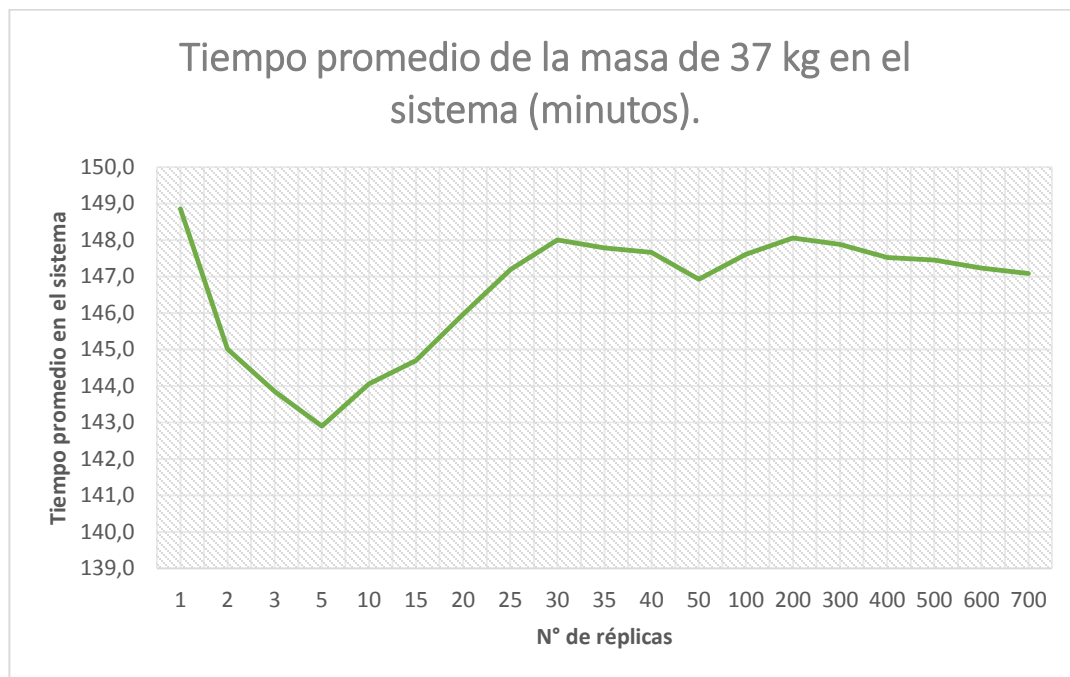
Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel.

Se procede a simular en el software Promodel el proceso productivo. Debido a la naturaleza aleatoria del modelo es necesario determinar su distribución de probabilidad y la longitud de las réplicas. La variable aleatoria elegida para determinar el número de réplicas es el tiempo promedio de la masa de 37 kg en el sistema (minutos). El procedimiento que se lleva a cabo para determinar el número de réplicas es el mismo que en el caso de estudio pequeño, consiste en correr el modelo de simulación con 50 réplicas inicialmente como se muestra en el anexo 4. Mediante la utilización de la herramienta Stat::Fit se hace el análisis de ajuste de probabilidad y se determina que la distribución puede ser Binomial (223, 0,659), o puede ser Poisson con media de 147 minutos.

Dado que la variable aleatoria, tiempo promedio de la masa de 37 kg en el sistema, no sigue una distribución normal se hace uso del Teorema de Tchebycheff, ecuación 5, para calcular la longitud de la réplica.

Para las 50 réplicas se obtiene una media de 146,9 minutos y una desviación estándar de 6,9 minutos. Se realizan los cálculos pertinentes, con un nivel de aceptación del 90% y una exactitud deseada de ± 1 se obtiene que el modelo se debe replicar 483 veces. La figura 24 muestra el comportamiento de la variable aleatoria donde se puede observar que a partir de 483 veces las réplicas tienden a tener poca variación.

Figura 24. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (3).

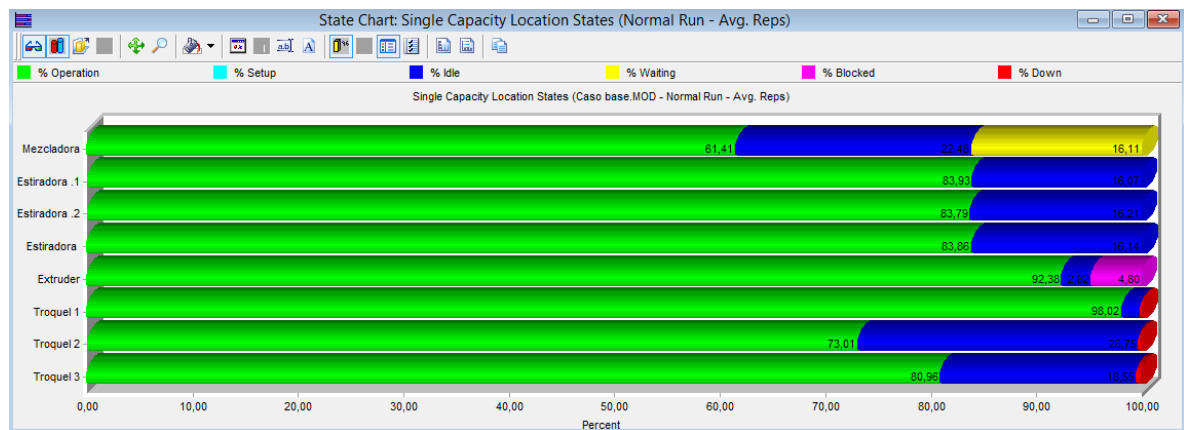


Fuente: elaboración propia.

Ahora se corre el modelo de simulación en el software ProModel comenzando el domingo a las 10:00 pm hasta el sábado a las 10:00 pm, con 483 réplicas, obteniendo los resultados mostrados en la figura 24 para los estados de la capacidad de cada locación, en promedio.

Se puede observar de la gráfica que existe un bloqueo el 4% del tiempo de simulación en promedio en el extruder, resultado natural, dado que el troquel 1 permanece el 98,02% del tiempo en operación y éste es el primer opcionado para troquelar los lotes de 37 kg. El throughput, en promedio, resulta es de 28013,44 kilogramos procesados por semana.

Figura 25. Estados de la capacidad de cada locación, caso de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Para efectos de la medición de qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella se procede a programar una subrutina que captura y almacena dicha medida a lo largo del tiempo tal y como lo habían hecho Lawrence y Buss [3] en su investigación a través de un método analítico. La subrutina ubica la cantidad de veces que las estiradoras, los troqueles y el extruder generan colas. No se tiene en cuenta la cola que puede generar la mezcladora ya que su tiempo de procesamiento es determinístico y es menor al tiempo entre llegadas de materia prima, por lo tanto, cada vez que llega un lote de materia prima esta estación está disponible. Tampoco se tienen en cuenta las posibles colas generadas por las mesas de calor y enfriamiento, ya que éstas cuentan con capacidad suficiente para atender el flujo de proceso.

El estado de las locaciones se captura a través de la función Locstate, la cual toma valores del 1 y al 7 según sea el caso:

1 = Ocioso.

2 = En configuración.

3 = Operando.

4 = Bloqueado.

5 = Esperando.

6 = Funcionado, para locaciones de capacidad múltiple.

7 = Parado.

Es importante aclarar que para saber si la estiradora genera una cola por ejemplo, el estado de la locación se captura en la estación de trabajo inmediatamente anterior, es decir, la mezcladora para este caso y de esta manera se halla que tan propensa es una estación a ser cuello de botella en el tiempo.

La subrutina cuenta y almacena, a través de un ciclo, como lo muestra la figura 26 el número de veces que el estado de la locación es 4, bloqueado, en una variable llamada A1, para el caso de la estiradora. La subrutina también cuenta y almacena el número de veces que el estado de la locación no es 4 en una variable llamada A2, al final de cada réplica se halla el porcentaje de veces en que una estación es cuello de botella, genera una cola, a través de una variable llamada CB1 para este caso se calcula como se muestra en la ecuación 6.

Figura 26. Ciclo de la subrutina.

```
Top:
WAIT 1 MIN
IF LOCSTATE(Mezcladora)=4 THEN
{
  A1=A1+1
}
ELSE
{
  A2=A2+1
}
CB1=A1/(A1+A2)
GOTO Top
```

Fuente: elaboración propia.

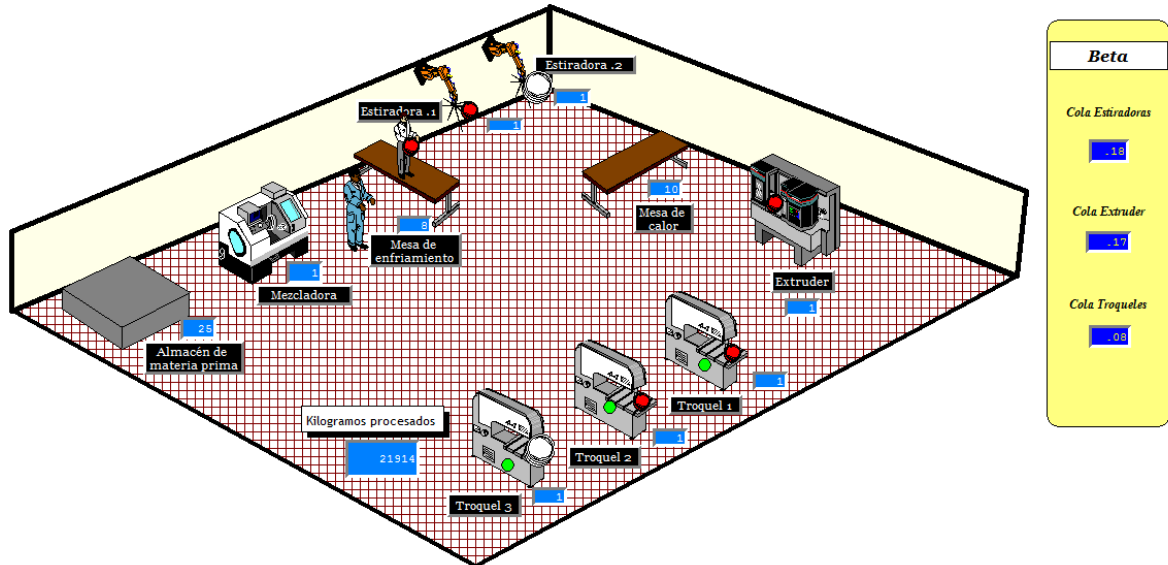
Ecuación 6. Porcentaje de veces en que una estación de trabajo es cuello de botella.

$$CB1 = \frac{A1}{A1 + A2}$$

Fuente: elaboración propia.

Durante la simulación también es posible observar cómo va cambiando la adaptación de Beta en ésta investigación, es decir las colas de las estaciones de trabajo tal y como se observa en el recuadro amarillo de la figura 27.

Figura 27. Beta en la simulación.



Fuente: elaboración propia.

6.2.3. Experimento 1.

En ésta parte de la investigación se pretende repetir el experimento 1 realizado para el caso de estudio pequeño, así que se procede a variar el tiempo entre llegadas de materia prima que es inicialmente de 45 minutos y se plantean las siguientes preguntas ¿Qué sucede si el tiempo entre llegadas de la materia prima disminuye algunos minutos? ¿Cuánto es lo máximo que puede disminuir el tiempo entre llegadas sin que se presenten perturbaciones o genere bloqueos en algunos equipos?

Para resolver estas preguntas se procede a cambiar el tiempo entre llegadas de la materia prima en el caso de estudio base, el cual arbitrariamente se le disminuye 5 minutos para observar si el tiempo entre llegadas de la materia prima presenta cambios o bloqueos en el caso de estudio.

Con un tiempo entre llegadas o una frecuencia de arribos de 40 minutos entre cada lote de 148 kg de materia prima en el almacén de materia como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Llegada de materia prima, experimento 1.

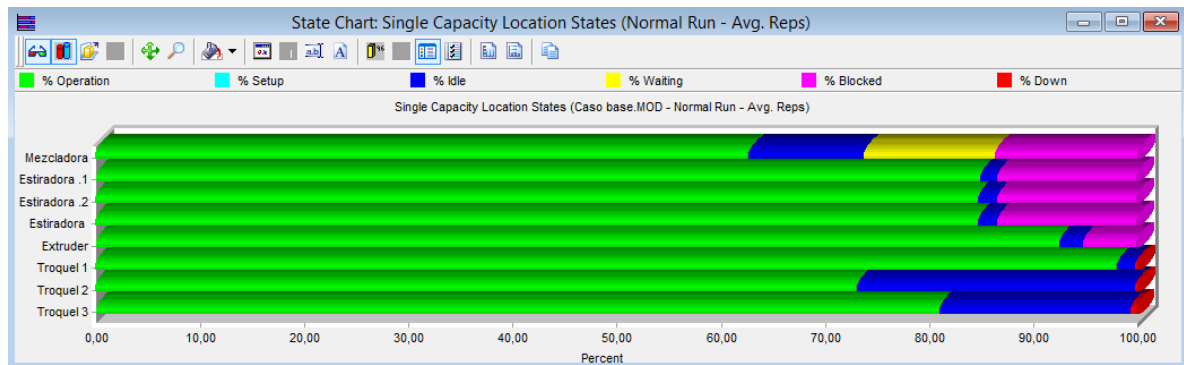
```
*****
*                               Arrivals                               *
*****
```

Entity	Location	Qty Each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Masa_de_148kg	materia_prima	1	0	inf	40 MIN	

Fuente: elaboración propia, exportado desde el software ProModel..

Simulando el proceso productivo y corriendo 483 réplicas, se obtiene el estado para cada locación mostrado en la figura 29.

Figura 29. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 1.



Fuente: elaboración propia.

Se observa que disminuyendo en 5 minutos el tiempo entre llegadas de la materia prima se generan bloqueos en la Mezcladora, Estriradoras y Extruder siendo el bloqueo de la Mezcladora el mayor con un 13.68%, evidenciando que el tiempo entre llegadas en este caso de estudio si afecta la disponibilidad de las estaciones de trabajo.

Para responder a la pregunta: ¿Qué sucede si el tiempo entre llegadas de la materia prima disminuye algunos minutos? Se procede a realizar múltiples experimentaciones variando en 0,5 minutos el tiempo entre llegadas mostrados en la tabla 19, en dicha tabla se muestra el porcentaje de tiempo en que los equipos mezcladora, estiradora y extruder están bloqueados a causa de las colas generadas por la estiradora, extruder y troqueles respectivamente. Se puede observar que la variación del tiempo entre llegadas pedidos cambia la carga de las estaciones de trabajo por lo tanto cambiará el cuello de botella de un equipo a otro.

Tabla 19. Cambio del porcentaje de bloqueo de las estaciones ante cambios en el tiempo entre llegadas.

Tiempo entre llegadas	%DE BLOQUEO		
	Mezcladora	Estiradora	Extruder
45.00 minutos	0	0	5.04
44.50 minutos	0	2.92	5.35
44.00 minutos	0.48	6.18	4,94
43.50 minutos	6.91	10.08	5.55
43.00 minutos	9.02	10.96	5.06
42.50 minutos	10.24	11.48	4.92
42.00 minutos	11.30	11,12	4.92
41.50 minutos	12.03	12.35	4.92
41.00minutos	12.59	12.43	4.92
40.50 minutos	13.31	12.91	4.92
40.00 minutos	13.34	12.91	4.92

Fuente: elaboración propia.

Ahora con la subrutina se procede a capturar la cantidad de veces en que los equipos tienen colas que impiden el flujo normal del sistema, en promedio. En la tabla 20 se muestran dichos porcentajes.

Tabla 20. Porcentaje de veces en que los equipos poseen colas.

Tiempo entre llegadas	% de veces en que los equipos poseen colas		
	Estiradora	Extruder	Troquel
45.00 minutos	0	0	3
44.00 minutos	10	11	3
43.00 minutos	16	13	3
42.00 minutos	18	14	3
41.00minutos	19	15	3
40.00 minutos	20	15	3

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la subrutina, tabla 20, muestran ligeros cambios en la cantidad de veces que una estación es cuello de botella frente a las otras, además se llega

a la interesante conclusión de que a pesar que un equipo puede causar retrasos por más tiempo en el sistema dado cierto tiempo entre llegadas, como muestra la tabla 19, esto no necesariamente hace que sea el que mayor cantidad de veces tenga colas, todo esto causado por la aleatoriedad es decir, con esta subrutina es posible determinar qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella a causa del cambio del tiempo entre llegadas de pedido, lo cual es muy útil en las organizaciones ya que se tiene en cuenta aleatoriedad inherente del sistema en la identificación de cuellos de botella.

6.2.4. Experimento 2.

En este punto, la pregunta a responder es ¿Cuál sería el efecto en la planta al adicionar otro producto? Tal como se hizo en el experimento 2 del caso de estudio pequeño.

En este caso se agrega el producto Masa_de_12kg que se manufactura a partir de la Masa_de_36kg que llega cada 120 minutos y la Masa_de_37kg se manufactura a partir de la Masa_de_148kg que llega cada 45 minutos. En la tabla 21 se muestran los tiempos de proceso para el proceso de transformación de la Masa_de_36kg en lotes de Masa_de_12kg, el resto de la modelación se asume igual que el de la transformación de la Masa_de_37kg.

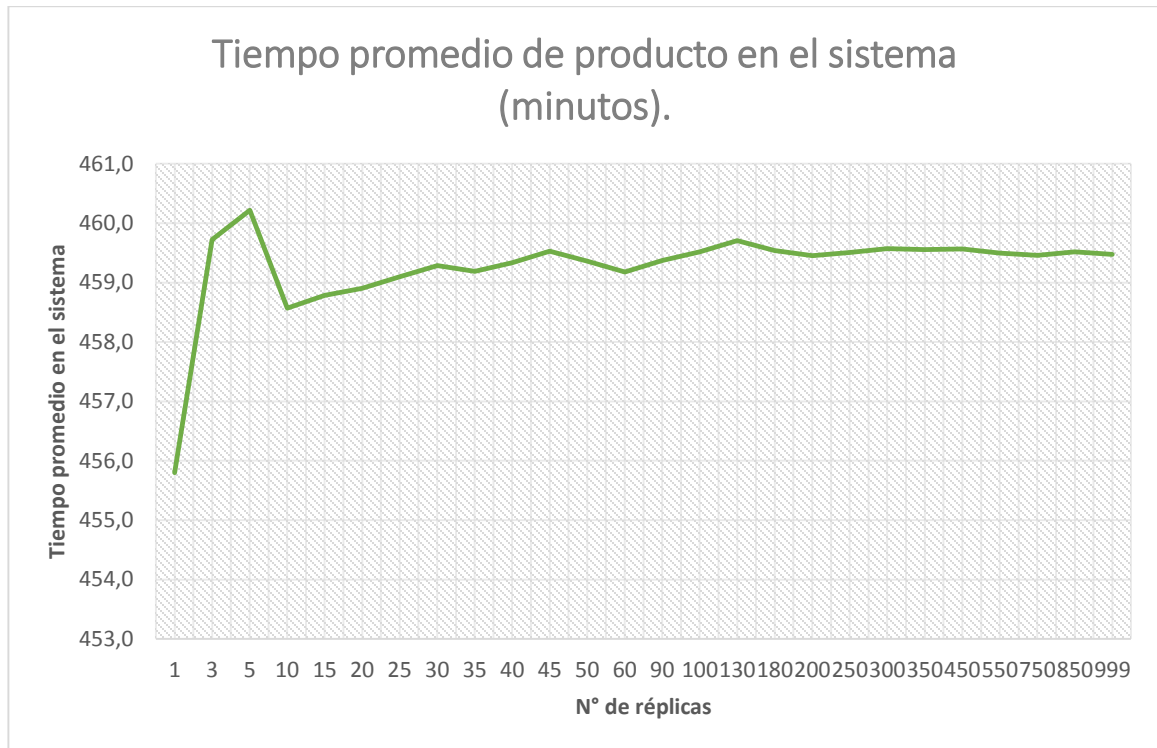
Tabla 21. Modelación de proceso, experimento 2, caso de estudio (1).

Equipo	Tiempo de operación (minutos)
Mesa de enfriamiento	6.5
Estiradora	$N(8.1, 0.2)$
Mesa de calor	6
Extruder	4.4
Troquel 1	11.3
Troquel 2	8.33
Troquel 3	9.24

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de establecer el número de réplicas para este experimento se corre el modelo con 50 réplicas evaluando como variable aleatoria el tiempo de los productos en el sistema en promedio, resultando que no siguen una distribución normal, por lo tanto se usa el teorema de Chevycheff, ecuación 5, y se obtiene que deben realizarse 92 réplicas, como se muestra en la figura 30.

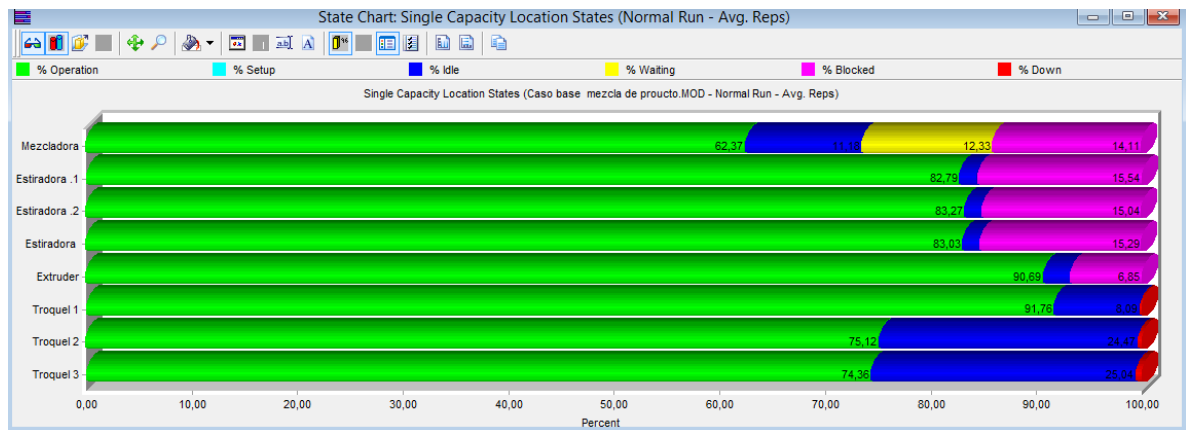
Figura 30. Comportamiento promedio de la variable aleatoria (4).



Fuente: elaboración propia.

Al correr el modelo durante 1 semana, comenzando el domingo a las 10 pm hasta el siguiente sábado a la misma hora, con 92 réplicas se obtiene la figura 31 que muestra los estados de la capacidad de cada locación. Allí se observa que el mayor bloqueo, se presenta en la estiradora, es decir, el extruder es el mayor cuello de botella del sistema pues no permite a la estiradora tener un flujo constante de trabajo. También en el experimento se obtiene un throughput promedio de 26447.44 kilogramos de producto procesados. En la tabla 22 se pueden observar la cantidad de veces en que la estiradora, el extruder y los troqueles poseen colas, siendo mayor, la de la estiradora, es decir, en todo el tiempo que opera el 13% de las veces es cuello de botella, aunque el extruder es cuello de botella por más tiempo como se observa en la figura 31.

Figura 31. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 2, caso de estudio (1).



Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Resultados de las variables, experimento 2 (1).

Equipo	% de veces en que los equipos poseen colas
Estiradora	13%
Extruder	12%
Troqueles	7%

Fuente: elaboración propia.

Ahora si las cantidades demandas cambian, la mezcla de productos cambiará y ¿los cuellos de botella también cambiarán en éste caso? Para responder a dicha pregunta se hace la demanda de la masa de 12 kilogramos más grande que la de la masa de 36 kilogramos, el doble como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23. Modelación de proceso, experimento 2, caso de estudio (2).

Equipo	Tiempo de operación (minutos)
Mesa de enfriamiento	13
Estiradora	N(16.2, 0.4)
Mesa de calor	12
Extruder	8.8
Troquel 1	22.66
Troquel 2	16.66
Troquel 3	18.48

Fuente: elaboración propia.

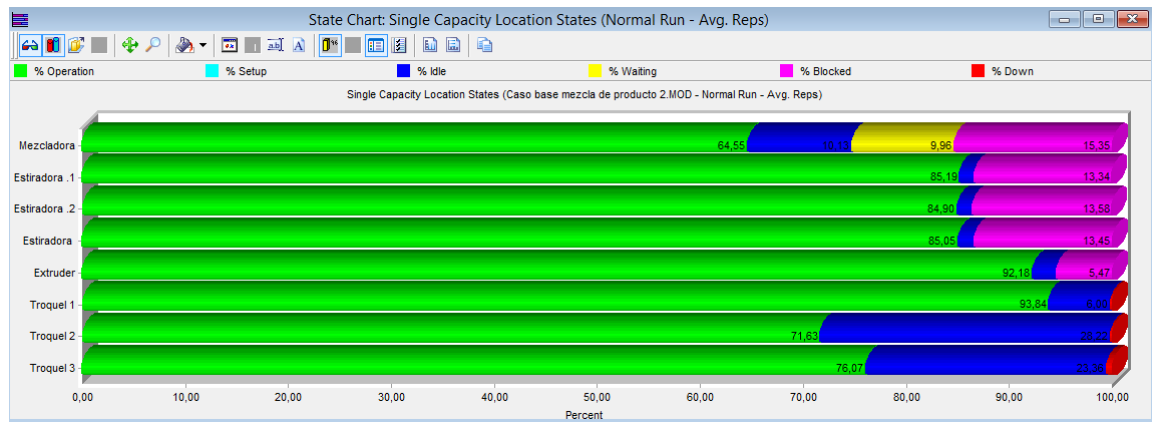
Al correr el modelo durante 1 semana, comenzando el domingo a las 10 pm hasta el siguiente sábado a la misma hora, con 92 réplicas se obtiene la figura 32 que muestra los estados de la capacidad de cada locación. Allí se observa que el mayor bloqueo, se presenta en la mezcladora, es decir, las estiradoras son el mayor cuello de botella del sistema pues no permiten a la mezcladora tener un flujo constante de trabajo. También en el experimento se obtiene un throughput promedio de 24347.98 kilogramos de producto procesados, como se esperaba, es menor al del experimento original ya que se aumentan los tiempos de proceso para la masa de 12 kilogramos. En la tabla 24 se pueden observar los valores promedios de las colas de la estiradora, el extruder y los troqueles, siendo el mayor el de la estiradora es decir, en este caso, la estiradora es la que mayor cantidad de veces es cuello de botella y además es la que más tiempo lo es como se observa en la figura 32. De ésta manera se confirma que el cambio en los tiempos de llegada involucrando aleatoriedad en el sistema hace que se presentan bloqueos y por tanto cuellos de botella en el sistema ante aumentos en la demanda de pintura.

Tabla 24. Resultados de las variables, experimento 2 (2).

Equipo	% de tiempo en que los equipos poseen colas
Estiradora	15%
Extruder	10%
Troqueles	5%

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Estados de la capacidad de cada locación, experimento 2, caso de estudio (2).



Fuente: elaboración propia.

En ésta sección se pudo experimentar con los factores aleatorios seleccionados y observar como dichos factores impactan a un sistema de producción basado en una línea de producción real y se confirmó que con cambios en el tiempo entre llegadas y la mezcla de productos los cuellos de botella del sistema cambian de ubicación en el sistema, demostrando así el gran impacto en la práctica que tiene la aleatoriedad en los cuellos de botella. También se introdujeron algunas variables que capturaron y almacenaron el número de veces en que las estaciones de trabajo son cuellos de botella, tal y como lo habían hecho Lawrence y Buss [3] en su investigación a través de un método analítico.

6.3. Beta (β) en simulación.

Lawrence y Buss [3] investigaron acerca de cuellos de botella en producción que cambian con el tiempo dado que hasta ese momento sólo se habían tratado los cuellos de botella como estáticos. Con su investigación, ellos abrieron la posibilidad de pensar en cuellos de botella como dinámicos dejando atrás anteriores políticas que identificaban y trataban de mitigar ubicadas en determinadas estaciones de trabajo. Lawrence y Buss [3] proponen un método analítico para la detección de cuellos de botella dinámicos e introducen una medida escalar que llamaron β , que mide que tan propensa es una estación a ser cuello de botella en el tiempo, dado que cuando las tasas de utilización son muy similares es difícil decidir cuál es el cuello de botella actual y cuál estación es más propensa a ser cuello de botella en el futuro.

En la actual investigación se adaptó la medida escalar β en la simulación a través de una subrutina, véase sección 6.2.2., de ésta manera se midió qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella en el tiempo, dados ciertos cambios en la demanda siendo éste el primer hallazgo con la implementación de la subrutina, la cual es muy útil al interior de las organizaciones pues se adapta a la inherente aleatoriedad de los sistemas de producción. El segundo y más evidente es la confirmación, que ante cambios en la demanda los cuellos de botella del sistema cambian de ubicación en el tiempo. Por último se observa que la estación más propensa a ser cuello de botella en el tiempo, es decir la que genera más número de colas, no necesariamente es la que bloquea el flujo del sistema durante más tiempo, lo cual abre la posibilidad de realizar futuras investigaciones que puedan abarcar ambos fenómenos en un mismo método que permita identificar los cuellos de botella móviles del sistema.

7. CONCLUSIONES.

Los cuellos de botella al interior de cualquier proceso productivo restringen la capacidad de dar respuesta al mercado ya que se causan retrasos en la producción, disminuyendo la efectividad de la organización en la entrega de bienes a los clientes y consumidores finales en los plazos establecidos.

La dinámica de los cuellos de botella posee gran importancia dado que hasta ahora se sigue considerando que los cuellos de botella son estáticos cuando en ocasiones no lo son y erróneamente, se trata de mitigar los cuellos de botella sin antes hacer su identificación, distinguiendo si su naturaleza es estática o móvil, dado que los cuellos de botella móviles al ser tratados con métodos como el aumento de la capacidad de los recursos restrictivos resuelven la problemática momentáneamente pero el cuello de botella persistirá dentro del sistema en el tiempo. Es por lo anterior que la apreciación de dónde están los cuellos de botella debería pasar a ser flexible, es decir, no sólo tratar de mitigar el cuello de botella actual, sino también descubrir si se mueve dicho cuello de botella y cómo lo hace a través del tiempo, con el objetivo de enfrentar la aleatoriedad inherente a la que se ve sometida el sistema y así mitigar efectivamente los cuellos de botella.

A través de la revisión bibliográfica se evidenció que los factores aleatorios relacionados con la perturbación de los cuellos de botella han sido poco estudiados, a pesar de ser un resultado inherente de la aleatoriedad de los sistemas de producción.

A lo largo del proceso de investigación se pudo constatar como factores aleatorios, principalmente el cambio la demanda, influyen en el comportamiento de los cuellos de botella al interior de una planta manufacturera haciéndolos cambiar de ubicación en el proceso productivo, en ocasiones haciéndolos pasar de ser estáticos a ser cuellos de botella móviles.

Se lograron seleccionar los factores aleatorios más relevantes en relación a la perturbación de los cuellos de botella, teniendo en cuenta criterios como la cantidad de veces que han aparecido en la literatura consultada, el criterio de expertos y la adaptabilidad a la simulación.

En ésta investigación se logró, a través de la inclusión de una subrutina en la simulación del proceso productivo, capturar y almacenar en una variable, qué tan propensa es una estación de trabajo a ser cuello de botella a lo largo del tiempo, como lo habían hecho Lawrence y Buss [3] en su momento a través de un modelo analítico, llegando al interesante hallazgo de que la estación más propensa a ser cuello de botella en el tiempo no necesariamente es la que más tiempo bloquea el flujo de sistema cuando lo es. Además la subrutina es muy útil en la medida de

que se adapta a la aleatoriedad inherente del sistema permitiendo tomar decisiones más acertadas respecto a la mitigación de los cuellos de botella actuales y posibles al interior de las organizaciones que se dedican a actividades de producción.

La simulación de procesos productivos es una eficaz herramienta cuando se dificulta comprobar en la práctica alguna tesis acerca de dichos procesos, ya que la simulación puede predecir el comportamiento de los sistemas ante los cambios con que el analista considere que debe experimentar. Además la simulación permitió adaptar los experimentos que se plantearon teóricamente de manera eficaz en el modelo de simulación.

La presente investigación abre la posibilidad de hacer investigaciones futuras acerca de cómo la aleatoriedad perturba el comportamiento de los cuellos de botella ya que aquí sólo se estudiaron algunos factores aleatorios y se podrían explorar los demás.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] L. J. Krajewski y L. P. Ritzman, «Estrategia de procesos,» de *Administración de operaciones*, México, Pearson educación, 2008, pp. 130-131.
- [2] J. A. González Gómez, K. Ortegón Mosquera y L. Rivera Cadavid, «Desarrollo de una metodología de implementación de los conceptos de TOC (Teoría de restricciones), para empresas colombianas,» *Estudios gerenciales*, 2003.
- [3] S. R. Lawrence y A. H. Buss, «Shifting bottlenecks production causes,» *Production and operation management*, vol. 3, nº 1, pp. 27-38, 1994.
- [4] A. Garavito, A. M. Iregui y M. T. Ramírez, «Inversión Extranjera Directa en Colombia: Evolución reciente y marco normativo,» *Borradores de economía*, nº 713, 2012.
- [5] K. A. Gamarra Martínez y J. E. Jiménez Martínez, «Análisis de dos metodologías para identificar el cuello de botella en procesos productivos,» Tesis de pregrado. Bucaramanga, Santander, 2012.
- [6] R. B. Chase, F. R. Jacobs y N. J. Aquilano, «Administración de las restricciones,» de *Administración de operaciones*, México, McGraw-Hill Companies, 2009, pp. 678-712.
- [7] E. M. Goldratt y J. Cox, *La meta*, Goldratt Institute Ibérica, 2005.
- [8] L. J. Krajewski y L. P. Ritzman, «Administración de restricciones,» de *Administración de operaciones*, México, Pearson educación, 2008, p. 260.
- [9] L. Li, Q. Chang, J. Ni, G. Xiao y S. Biller, «Bottleneck Detection of Manufacturing Systems using data driven method,» de *International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 2007.
- [10] J. Arévalo, «En busca de la meta, gerenciando la incertidumbre, la complejidad y los conflictos,» de *Webinar Virtual Pro*, Medellín, 2014.
- [11] C. Roser, N. Masaru, Minoru y Takana, «Shifting Bottleneck Detection,» de *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Japón, 2002.
- [12] J. Lu, M. Shen y X. Lan, «Study of the shifting production bottleneck: possible causes and solutions,» *System Science*, vol. 2, pp. 213-216, 2010.
- [13] A. J. Abisambra y L. A. Mantilla Cuadros, «Aplicación de la teoría de restricciones (TOC) a los procesos de producción de la planta de fundición de

Imusa,» *Soluciones de Posgrado EIA*, 2008.

- [14] «El mejor secreto de las empresas exitosas,» *Dinero*, 2012.
- [15] D. Sipper y R. L. Bulfin Jr, «El paradigma de la producción,» de *Planeación y control de las operaciones*, México, McGraw-Hill Companies, 1998, pp. 8-9.
- [16] H. Emmons y G. Vairaktarakis, «Introduction,» de *Flow Shop Scheduling*, New York, Springer Science, 2013, p. 2.
- [17] L. J. Krajewski y L. P. Ritzman, «Administración de restricciones,» de *Administración de operaciones*, México, Pearson educación, 2008, p. 254.
- [18] X. Jian, Z. Yumei y W. Xin, «Bottleneck Identification of Equipment Manufacturing Industry Chain Upgrading Based on the TOC,» de *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 2011.
- [19] A. Sarabia Viejo, «Teoría de colas,» de *La investigación operativa: una herramienta para la adopción de decisiones*, España, Universidad Pontifica Comillas, 1996, p. 338.
- [20] R. Cao, «Redes de colas,» de *Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas*, España, Netbiblo, 2002, p. 181.
- [21] R. Coss, «Introducción,» de *Simulación: Un enfoque práctico*, México, Limusa, 1998, p. 11.
- [22] E. García Dunna, H. García Reyes y L. E. Cárdenas Barrón, «Simulación con ProModel,» de *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*, Mexico, Pearson educación, 2006, p. 120.
- [23] E. García Dunna, H. García Reyes y L. E. Cárdenas Barrón, «Principios básicos de la simulación,» de *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*, México, Pearson Educación, 2006, p. 2.
- [24] S. E. Lawrence y A. H. Buss, «Economic analysis of production bottlenecks,» *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 1, pp. 341-363, 1995.
- [25] C. Roser, N. Masaru, Minoru y Takana, «Throughput Sensitive Analysis using single simulation,» de *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Japón, 2002.
- [26] P. Tamilselvan, «Bottleneck shifting in production lines impact of variability,

new detection method and control strategies,» India, 2007.

- [27] A. Jinzhao y F. Liangqing, «Optimization of Networked Manufacturing System Based on Bottleneck Resources,» de *International Seminar on Business and Information Management*, 2008.
- [28] J. Wang, J. Li, J. Arinez y S. Biller, «Quality Bottleneck Transitions in Flexible Manufacturing Systems,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Alaska, USA, 2010.
- [29] P. Kotler y G. Armstrong, «Desarrollar la mezcla de marketing,» de *Marketing*, México, Pearson Educación, 2001, p. 266.
- [30] H. A. Taha, «Toma de decisiones bajo certidumbre. Proceso de jerarquía analítica (PJA),» de *Investigación de operaciones*, Novena ed., Pearson Educación, 2012, pp. 513-519.
- [31] D. D. Lozano, «PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UN AMBIENTE FLOW SHOP FLEXIBLE CON RESTRICCIONES DE BLOQUEO RSb y RCb,» Tesis de pregrado. Cali, Colombia, 2009.
- [32] E. García Dunna, H. García Reyes y L. E. Cárdenas Barrón, «Simulación de variables aleatorias,» de *Simulación y análisis de sistemas con Promodel*, Mexico, Pearson Educación, 2006, pp. 110-111.
- [33] J. F. Sánchez Mosquera, «SIMULACIÓN DE PROCESOS MANUFACTUREROS EN EMPRESAS DEL SECTOR DE DULCES Y PASABOCAS DEL VALLE DEL CAUCA COMO GUÍA DIDÁCTICA PARA EL APRENDIZAJE DEL SOFTWARE PROMODEL,» Tesis de pregrado. Cali, Colombia, 2002.

ANEXO 1. Elementos básicos de una simulación en ProModel.

ProModel básicamente se enfoca a procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros. En ProModel se pueden distinguir una serie de módulos que permiten al analista hacer un estudio más completo sobre el modelo que se quiere simular. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

ProModel. Es el área de trabajo donde se definirán el modelo y todos sus componentes. En este módulo se programa todo lo que tiene que ver con las relaciones entre variables del modelo, tanto contadores como relaciones lógicas, flujos, actividades y ciclos de producción, por ejemplo.

Editor gráfico. Cuenta con una serie de bibliotecas que permiten dar una mejor presentación visual a los modelos realizados, incluso es posible importar y crear las imágenes necesarias para representar con mayor propiedad el problema a simular.

Resultados. ProModel cuenta con una interfaz de resultados que se reportan de manera automática o pueden ser obtenidos mediante solicitud expresa del analista, dicha interfaz facilita la administración, el manejo y análisis de la información.

Stat: :Fit. Permite hacer pruebas de bondad de ajuste sobre datos de muestra, produciendo información muy importante para determinar las distribuciones asociadas a las variables aleatorias del modelo.

Editor de turnos. El editor de turnos permite asignar turnos de trabajo a los elementos del modelo que lo requieran, por ejemplo descansos programados o el tiempo de alimentación.

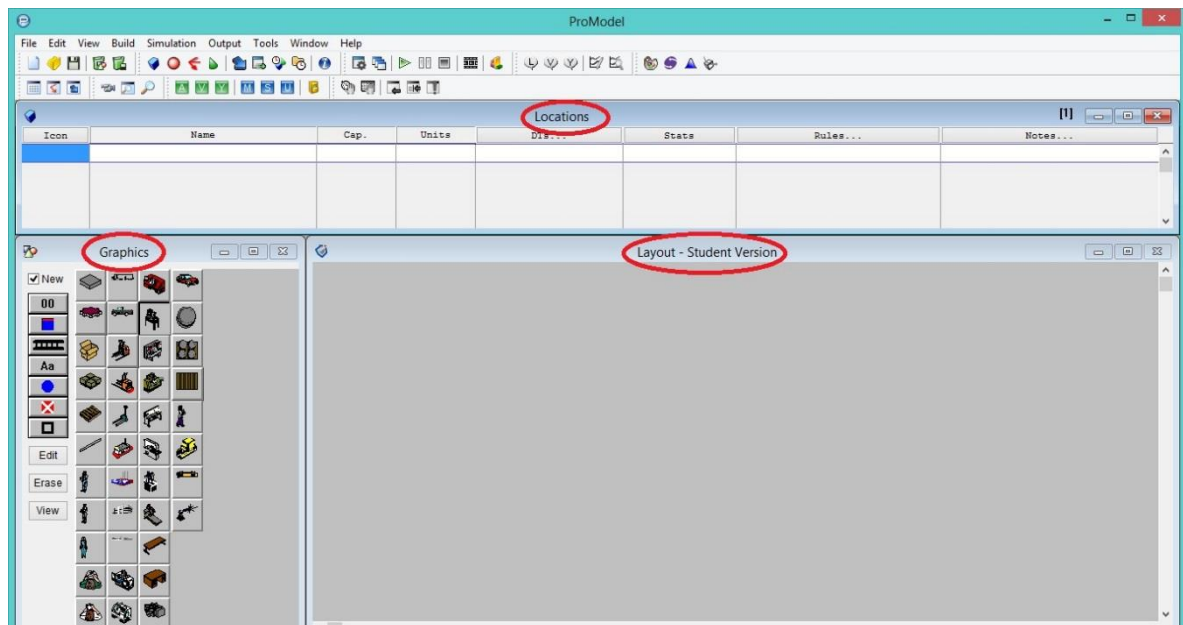
Simrunner. Es muy útil en el análisis posterior del modelo ya que se pueden diseñar experimentos destinados a conocer el impacto de factores críticos que se generan a partir de la variación en los valores de las variables aleatorias seleccionadas para ello.

Referencias y ayuda. Estos módulos facilitan el uso y programación del software.

En ProModel el menú **Build** agrupa todos los comandos referentes a la construcción de elementos dentro del diseño un sistema a simular: **Locations** (locaciones), **Entities** (entidades), **Path Networks** (rutas de movimientos de los recursos o entidades), **Resources** (recursos), **Arrivals** (llegadas de entidades al sistema) y **Processing** (la programación de la simulación en sí misma, entre otros).

Para comenzar se debe ejecutar el comando **Locations** y a continuación aparecerán tres ventanas en pantalla: **Locations**, **Graphics** y **Layout**, en la primera se define las características de las locaciones, en la segunda las

características de los gráficos y la tercera es el área donde se hace la configuración general del modelo, tal como se muestra en la figura a continuación.



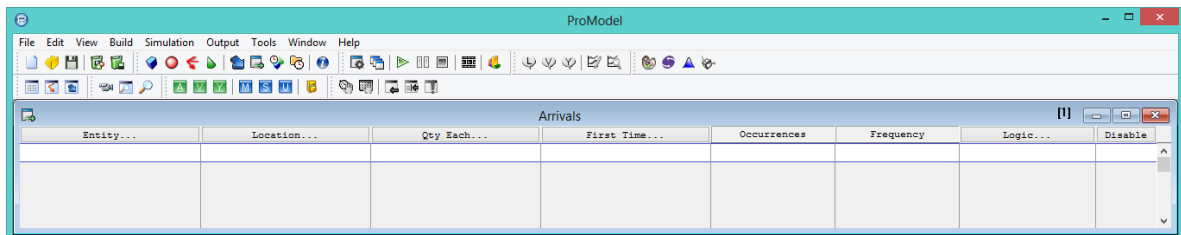
Definición de locaciones en ProModel.

Para crear una nueva locación se hace clic en uno de los iconos del área **Graphics** y sin soltar el botón del ratón se arrastra hasta la ventana **Layout** y se libera el botón. En la ventana **Locations** se alimenta el modelo con la información del nombre, la capacidad, el número de unidades, reglas, entre otros. Se debe tener en cuenta si las piezas que llegan deben esperar para ser atendidas, si es así se debe asignar una capacidad infinita a la locación, esto se hace escribiendo *infinite* en el campo **Cap.**

Una vez definidas las locaciones se procede a definir las entidades, para ello en el menú **Build** se hace clic en el comando **Entities** y una vez más aparecerán tres ventanas: **Entities**, **Entity Graphics** y **Layout**, cuyo propósito es muy similar al de sus equivalentes en el caso de la definición de locaciones.

Tanto la definición de entidades como su edición se llevan a cabo mediante procedimientos parecidos a los que se realizaron con las locaciones. Es posible modificar el gráfico seleccionado para cambiar sus dimensiones y su color, y definir varios gráficos para una misma entidad.

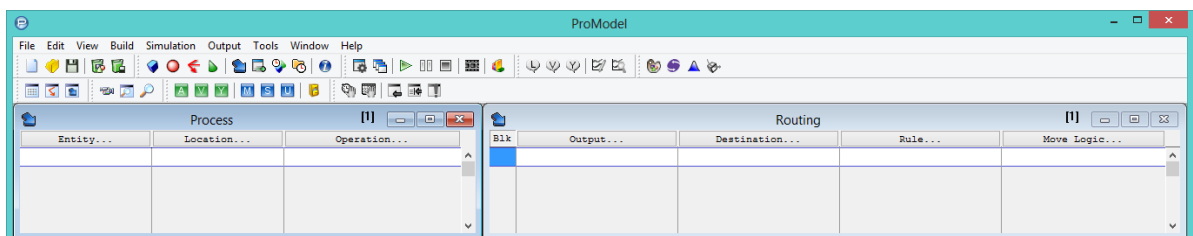
Una vez definidas las entidades se puede determinar la frecuencia de llegadas al modelo. Se abre el menú **Build** y haciendo clic en el comando **Arrivals**, estando en esta ventana se define la frecuencia de llegadas por pieza.



Definición de llegadas al sistema.

Se debe seleccionar la entidad, luego especificar a qué locación va a llegar en el campo **Location**, donde se desplegarán todas las locaciones definidas previamente. En el campo **Qty Each**, se determina cuantas piezas llegarán cada vez que se cumpla el tiempo entre llegadas. En el campo **First Time** se especifica el tiempo de ocurrencia del primer evento. En **Ocurrences** se indica el número de repeticiones del evento de llegada, pueden ser infinitos, y en **Frequency** se especifica la distribución del tiempo entre llegadas.

Finalmente un modelo es completado definiendo la lógica de la simulación, para ello en el menú **Build** se elige **Processing**, allí se desplegarán dos ventanas: **Process** y **Routing for**. En la primera se definirán las operaciones que se harán sobre la entidad, pueden colocarse comandos como **WAIT** (esperar), y en la segunda se indicará la ruta secuencial del proceso, es decir, hacia que locación debe dirigirse, en el campo Rule se indica la regla de movimiento el valor predeterminado aquí es **FIRST 1**, lo que indica que la entidad avanzará tan pronto como se tenga capacidad disponible en la localización de destino. En **Move Logic** se define el movimiento lógico de salida.



Definición de la primera línea de programación

Finalizada la programación, se debe definir el tiempo de simulación. Para ello en el menú **Simulation** se hace clic en el comando **Options**, enseguida se abrirá la ventana correspondiente, en cuyo campo **Run hours** se escribe la cantidad de tiempo a simular, si van a ser 100 días se escribe: **100 day**. En el campo **Number of Replications** se puede determinar el número de réplicas, repeticiones.

Para ejecutar el modelo se hace clic en el menú **Simulation** y luego en el comando **Save & Run**. Al terminar la simulación se desplegará un cuadro de

mensaje confirmando la finalización del tiempo programado. Si se desea ver los resultados se hace clic en el botón **Yes**, enseguida se abrirá una ventana con varias fichas que muestran los resultados estadísticos de la simulación. Los datos pueden leerse o graficarse con las herramientas de ProModel, o guardarse en archivos con formato de Excel. Los resultados pueden variar dependiendo de los números aleatorios que se hayan utilizado durante la simulación.

ANEXO 2. Cuestionario.



Cuestionario: Selección de los factores aleatorios que sean más relevantes en la perturbación de los cuellos de botella en manufactura.

Tesis: Impacto de los factores aleatorios en la identificación de Cuellos de Botella en manufactura.

Tesistas: Marcela Guzmán García – Cristhian Eduardo Castaño Ruiz.

Director: Juan J. Bravo

Estimado profesor, considere el siguiente fenómeno a explorar:

Impacto de los factores aleatorios en la perturbación de cuellos de botella en planta.

Según una revisión realizada de la literatura científica, los factores aleatorios tradicionalmente considerados para los análisis de planta, se muestran en la tabla 1.

Factores aleatorios.		Autores.
A	Demanda. Cambio en la mezcla de productos.	[1], [2], [7]
B	Demanda. Tiempo entre llegada de pedidos.	[1], [2], [7]
C	Actividad e inactividad de las máquinas.	[3],[5]
D	Balance de carga entre estaciones.	[1], [2]
E	Tasa de utilización.	[1], [3], [4], [5], [6], [8]
F	Tamaño de lote.	[2], [7]

Tabla 1.

A continuación lo invitamos a responder unas preguntas, que buscan obtener su concepto respecto a qué factores aleatorios son según su opinión los que tendrían un mayor impacto en la perturbación de los cuellos de botella en planta (asumiendo una configuración básica tipo flow shop). Para facilidad se le preguntará por pares de factores y su respuesta deberá corresponder a una escala de la Tabla 2.

Se muestra aquí un ejemplo para facilitar el entendimiento de lo que se quiere obtener con su opinión.

EJEMPLO:

Considerando los factores A y E, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta (perturba) más los cuellos de botella en una planta? R/ <u>A</u>
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? (use la Tabla 2) R/ <u>7</u>

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos factores generan igual impacto
3	El impacto de la aleatoriedad de este factor es levemente superior , respecto a lo que pasaría con la aleatoriedad del otro factor.
5	El impacto de la aleatoriedad de este factor es superior , respecto a lo que pasaría con la aleatoriedad del otro factor.
7	El impacto de la aleatoriedad de este factor es muy superior , respecto a lo que pasaría con la aleatoriedad del otro factor.
9	El impacto de la aleatoriedad de este factor es significativamente superior , respecto a lo que pasaría con la aleatoriedad del otro factor.

Tabla 2.

Con apoyo en el ejemplo anterior, a continuación presentamos las preguntas de las cuales deseamos su opinión, agradeciendo de antemano su gentil colaboración.

Considerando los factores A y B, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores A y C, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores A y D, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores A y E, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores A y F, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores B y C, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores B y D, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores B y E, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores B y F, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores C y D, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores C y E, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores C y F, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores D y E, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____

¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores D y F, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que

impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Considerando los factores E y F, ¿la aleatoriedad de cuál de estos dos factores cree usted que impacta más los cuellos de botella en una planta? ____
¿En qué medida ese factor elegido impacta más que el otro? ____

Muchas gracias.

Referencias

- [1] S. R. Lawrence y A. H. Buss, «Shifting bottlenecks production causes,» Production and operation management, vol. 3, nº 1, pp. 27-38, 1994.
- [2] J. Lu, M. Shen y X. Lan, «Study of the shifting production bottleneck: possible causes and solutions,» System Science, vol. 2, pp. 213-216, 2010.
- [3] C. Roser, N. Masaru, Minoru y Takana, «Shifting Bottleneck Detection,» de Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, Japón, 2002.
- [4] L. Li, Q. Chang, J. Ni, G. Xiao y S. Biller, «Bottleneck Detection of Manufacturing Systems using data driven method,» de International Symposium on Assembly and Manufacturing, 2007.
- [5] P. Tamilselvan, «Bottleneck shifting in production lines impact of variability, new detection method and control strategies,» India, 2007.
- [6] A. Jinzhao y F. Liangqing, «Optimization of Networked Manufacturing System Based on Bottleneck Resources,» de International Seminar on Business and Information Management, 2008.
- [7] J. Wang, J. Li, J. Arinez y S. Biller, «Quality Bottleneck Transitions in Flexible Manufacturing Systems,» de IEEE International Conference on Robotics and Automation, Alaska, USA, 2010.
- [8] X. Jian, Z. Yumei y W. Xin, «Bottleneck Identification of Equipment Manufacturing Industry Chain Upgrading Based on the TOC,» de International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2011.

ANEXO 3. Tiempo promedio de la pintura en el sistema (minutos).

No. de réplicas	Tiempo promedio de la pintura en el sistema (minutos)	No. de réplicas	Tiempo promedio de la pintura en el sistema (minutos)
1	125,40	26	131,63
2	123,88	27	127,38
3	129,38	28	127,88
4	122,88	29	128,38
5	129,00	30	136,43
6	125,13	31	129,14
7	132,88	32	130,13
8	124,00	33	131,43
9	129,50	34	127,63
10	129,00	35	126,63
11	127,75	36	127,63
12	129,63	37	124,88
13	124,13	38	129,00
14	132,71	39	129,25
15	128,50	40	135,25
16	134,86	41	125,38
17	128,63	42	128,00
18	128,75	43	130,75
19	126,25	44	126,86
20	128,63	45	129,13
21	127,88	46	127,38
22	129,38	47	131,14
23	120,88	48	131,38
24	129,13	49	123,86
25	129,13	50	127,00

Fuente: elaboración propia.

ANEXO 4. Tiempo promedio de la masa en el sistema (minutos).

No. de réplicas	Tiempo promedio de la masa en el sistema (minutos)	No. de réplicas	Tiempo promedio de la masa en el sistema (minutos)
1	148,85	26	147,33
2	141,17	27	146,19
3	141,51	28	158,32
4	136,34	29	153,69
5	146,63	30	154,13
6	141,68	31	139,63
7	141,90	32	140,15
8	149,88	33	146,04
9	148,73	34	154,71
10	148,65	35	151,99
11	143,61	36	138,26
12	149,72	37	149,74
13	145,32	38	157,85
14	153,22	39	141,32
15	137,43	40	146,96
16	162,99	41	149,56
17	141,78	42	147,40
18	165,66	43	145,68
19	138,21	44	151,25
20	138,82	45	141,77
21	157,87	46	142,68
22	145,87	47	141,25
23	151,90	48	135,21
24	156,92	49	146,01
25	146,65	50	139,64

Fuente: elaboración propia.

