

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DIAGNÓSTICO DE FLUJO DEL ÁREA DE ENSAMBLE FINAL  
UBICADA EN LA PLANTA DE ESTAMPADO Y ENSAMBLE  
FORD HERMOSILLO

### **T E S I S**

PRESENTADA POR

**CHRISTIAN RAFAEL MÉNDEZ ARÉCHIGA**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS  
DR. LUIS FELIPE ROMERO DESSENS

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

OCTUBRE 2014

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# **CARTA VOTOS APROBATORIOS**

## RESUMEN

Los sistemas de producción industriales son a menudo sumamente complejos. La dimensión y complejidad de estos sistemas, junto al carácter dinámico y estocástico de los componentes individuales, así como sus dependencias e interacciones, hacen muy difícil obtener una configuración óptima del sistema en cuestión. Asimismo, la limitación del tiempo siempre está presente en el entorno productivo y las empresas han apostado en la utilización de técnicas como la simulación para evaluar diferentes propuestas y alternativas de mejora para ahorro de costos y tiempo al momento de la toma de decisiones.

En este estudio se plantea un esquema metodológico referente a la construcción de un modelo de simulación de flujo de aéreas productivas dentro de una organización manufacturera, con la finalidad de localizar los cuellos de botella dentro de su proceso y fungir como una herramienta de evaluación y toma de decisiones acerca de la implementación de propuestas de mejora para el modelo productivo sometido a escrutinio y para la elaboración de una tesis de maestría, acerca de un diagnóstico de flujo de una planta automotriz del noroeste del país.

Se realizó el diagnóstico de flujo utilizando la metodología propuesta en el capítulo 3 de esta investigación, se realizó el análisis de cuellos de botella y se identificaron propuestas de solución para los cuellos de botella identificados, posteriormente las mejoras fueron documentadas bajo un esquema de caso de negocios y presentados a la compañía, la cual decidió la implementación de algunas de estas propuestas para mejorar el flujo de proceso del área estudiada.

Los resultados obtenidos con la implementación de estas mejoras fueron muy similares a los previamente obtenidos en el modelo de simulación y la compañía consiguió cumplir los objetivos de flujo a raíz de la implementación de lo propuesto en este documento de tesis.

# ABSTRACT

Industrial production systems are often highly complex. The size and complexity of these systems, together with the dynamic and stochastic character of the individual components and their dependencies and interactions, make it very difficult to obtain an optimal configuration of the system in question. Furthermore, the time constraint is always present in the production environment and companies have invested in the use of techniques such as simulation to evaluate various proposals and alternatives for improvement in cost and time savings when making decisions.

This study presents a methodological framework regarding the construction of a simulation model of air flow within an organization productive manufacturing, in order to locate bottlenecks within the process and serve as a tool of evaluation and decision decisions about the implementation of proposed improvements to the production model under scrutiny and to the development of a master's thesis about a diagnosis of an automotive plant flow northwest of the country.

I realize the flow diagnosis using the methodology proposed in the chapter 3 of this investigation, then I realize the bottleneck analysis and we offer some solutions for bottlenecks in the production system, later the improvements were documented under a scheme of business case and presented to the company, which decided the implementation of some of these offers to improve the process flow of the studied area. The results obtained with the implementation of these improvements were identical to the results obtained in the simulation model and the company managed to fulfill the aims of flow immediately after the implementation of the proposed in this document of thesis.

# DEDICATORIA

Mi dedicatoria no podía ser para nadie más que no fuese Dios nuestro señor, ya que fue a él a quien le prometí que me superaría para ser una mejor persona y poder apoyar a mi prójimo a pesar de toda complicación, reto o adversidad que se presentara en el camino.

Solo él fue necesario a lo largo de este camino para darme fuerzas e interconectarme con las personas indicadas en los momentos claves de este viaje y darme los recursos necesarios y la paz en mi vida que tanto requería para dar este importante paso.

Agradezco al cuerpo académico del posgrado por su guía, paciencia y profesionalismo y por la calidad humana que ha compartido conmigo durante los últimos dos años.

De igual manera agradezco a mis padres por darme la vida e inculcarme una mentalidad enfocada hacia la superación personal bajo el lema de “ser mejor cada día” en cada aspecto de una vida integral.

Una dedicatoria a mis tres hermanos Carlos, Guillermo e Isaac y a mi hermana Norma que viene en camino ya que el deseo de darles el mejor ejemplo posible como hermano mayor me impulsa a levantarme cada día y dar lo mejor de mí.

Y por último, una dedicatoria sumamente especial hacia mi actual pareja Carmen Cristina Martínez Rodríguez, ya que el deseo de formar una familia a su lado y poder darle lo mejor a ella y a los hijos que Dios nos conceda ha sido la razón fundamental para emprender este viaje y superarme personal y profesionalmente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Carmen, por su amor y apoyo para superarme.

A mis padres, hermanos y familiares por su invaluable apoyo.

A mi director de tesis, Dr. Luis Felipe Romero Dessens, por su ayuda, guía y paciencia.

Al Dr. Alonso Pérez Soltero y a todo el comité académico, por empujarme y permitirme terminar este proyecto.

A Planta Ford Hermosillo, por abrirme sus puertas, apoyarme con los estudios y permitirme desarrollar este proyecto.

Agradezco a la Universidad de Sonora por aceptarme en el programa de maestría, al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) y a programa integral de fortalecimiento institucional (PIFI 2014) por su apoyo económico.

# INDICE GENERAL

|  |     |
|--|-----|
| CARTA VOTOS APROBATORIOS.....  | ii  |
| RESUMEN.....   | iii |
| ABSTRACT.....  | iv  |
| DEDICATORIA.....   | v   |
| AGRADECIMIENTOS.....   | vi  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | ix  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....  | xi  |
| ÍNDICE DE ECUACIONES.....  | xii |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1   |
| 1.1. Presentación.....   | 1   |
| 1.2. Planteamiento del problema.....                                       | 3   |
| 1.3. Objetivo general.....   | 4   |
| 1.4. Objetivos específicos.....  | 4   |
| 1.5. Hipótesis.....  | 5   |
| 1.6. Alcances y delimitaciones.....  | 5   |
| 1.7. Justificación.....  | 5   |
| 2. MARCO DE REFERENCIA.....  | 6   |
| 2.1. La industria automotriz.....  | 6   |
| 2.1.1. La industria automotriz en México.....                              | 7   |
| 2.1.2. Ford en México.....   | 11  |
| 2.2. Sistemas de producción.....   | 13  |
| 2.2.1. Clasificación de los sistemas de producción.....                    | 13  |
| 2.3. La industria manufacturera y la simulación.....                       | 14  |
| 2.4. Simulación.....   | 15  |
| 2.5. Simulación de eventos discretos.....                                  | 16  |
| 2.6. Conceptos de simulación.....  | 17  |
| 2.7. Etapas para la realización de estudios de simulación.....             | 19  |
| 2.8. Ventajas y desventajas de la simulación.....                          | 22  |
| 2.8.1. Ventajas de la simulación.....                                      | 22  |
| 2.8.2. Desventajas de la simulación.....                                   | 23  |
| 2.9. Ejemplos de usos de simulación.....                                   | 23  |
| 2.10. Análisis de paros de línea y optimización utilizando simulación..... | 24  |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.11. Análisis de cuellos de botella. ....  | 25        |
| 2.12. Balanceo de líneas y cuellos de botella.....  | 27        |
| 2.12.1. Identificación de cuellos de botella. ....  | 27        |
| 2.12.2. Métodos de identificación de cuellos de botella. ....   | 28        |
| 2.12.3. Identificación del cuello de botella por estudio de tiempos. ....   | 28        |
| 2.12.4. Técnicas para hacer los estudios de tiempos. ....   | 28        |
| 2.13. Distribuciones de probabilidad. ....  | 29        |
| 2.14. Pruebas de bondad de ajuste.....  | 31        |
| 2.14.1. Prueba de Chi-Cuadrada. ....  | 31        |
| 2.14.2. Prueba $\chi^2$ Distribución Normal.....  | 32        |
| 2.14.3. Prueba de Kolmogorov-Smirnov. ....  | 32        |
| 2.14.4. Prueba de Anderson-Darling.....   | 33        |
| 2.15. Pruebas de hipótesis. ....  | 33        |
| 2.15.1. Pasos a Seguir en la construcción de una prueba de Hipótesis. ....  | 34        |
| 2.16. Validación de los modelos de simulación. ....   | 35        |
| 2.17. Estudios previos. ....  | 36        |
| 2.17.1. Aplicación de la metodología de simulación para sincronizar el flujo del<br>producto en una planta tipo a con componentes compartidos por medio de<br>la TOC..... | 37        |
| 2.17.2. Aplicación de simulación para incrementar la productividad de la empresa<br>“La Vieja Molienda de Santa Maty”. ....   | 39        |
| 2.17.3. Modelos de simulación para el estudio de empresas productivas. ....   | 42        |
| 2.17.4. Análisis comparativo de estudios previos. ....  | 44        |
| <b>3. METODOLOGÍA.....</b>  | <b>46</b> |
| 3.1. Etapas de la metodología.....  | 46        |
| <b>4. IMPLEMENTACIÓN.....</b>   | <b>50</b> |
| 4.1. Definición del sistema.....  | 50        |
| 4.2. Recolección de datos. ....   | 54        |
| 4.3. Tratamiento estadístico de los datos. ....   | 55        |
| 4.4. Construcción del modelo de simulación. ....  | 58        |
| 4.5. Validación del modelo de simulación. ....  | 64        |
| 4.6. Análisis de resultados del modelo. ....  | 65        |
| 4.7. Desarrollo y simulación de alternativas de mejora. ....  | 72        |
| 4.8. Caso de negocios de alternativas de mejora.....  | 76        |
| <b>5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>   | <b>84</b> |
| 5.1. Conclusiones.....  | 85        |
| 5.2. Recomendaciones.....   | 85        |
| 5.3. Trabajos futuros. ....   | 87        |
| <b>REFERENCIAS. ....</b>  | <b>88</b> |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1.1. Sistema productivo de Ensamble Final</i> .....                                | 2  |
| <i>Figura 2.1. Sistemas de Producción</i> .....  | 13 |
| <i>Figura 2.2. Sistemas de Producción lineal</i> .....                                       | 13 |
| <i>Figura 2.3. Sistemas de Producción intermitente</i> .....                                 | 14 |
| <i>Figura 2.4. Etapas para realizar estudios de simulación</i> .....                         | 20 |
| <i>Figura 2.5. Modelo de Simulación con SIMUL8</i> .....                                     | 43 |
| <i>Figura 3.1. Etapas de la metodología propuesta</i> .....                                  | 47 |
| <i>Figura 4.1. Distribución del sistema de Ensamble Final</i> .....                          | 51 |
| <i>Figura 4.2. Equipos críticos del sistema de Ensamble Final</i> .....                      | 52 |
| <i>Figura 4.3. Uso de atributos para simular mezcla de productos en Ensamble Final</i> ..... | 53 |
| <i>Figura 4.4. Diagrama de mezcla de productos en Ensamble Final</i> .....                   | 53 |
| <i>Figura 4.5. Sistema de Error Proofing de Ensamble Final</i> .....                         | 54 |
| <i>Figura 4.6. Reporte de tiempos ciclos de Error Proofing de Ensamble Final</i> .....       | 55 |
| <i>Figura 4.7. Reporte de MTBF y MTTR de equipos críticos de Ensamble Final</i> .....        | 55 |
| <i>Figura 4.8. Reporte de tiempos ciclo de Ensamble Final</i> .....                          | 56 |
| <i>Figura 4.9. Reporte de herramienta Stat:Fit de Promodel 7.0</i> .....                     | 57 |
| <i>Figura 4.10. Distribuciones de probabilidad utilizadas de Promodel 4.22</i> .....         | 57 |
| <i>Figura 4.11. Sección de entidades del modelo de simulación</i> .....                      | 58 |
| <i>Figura 4.12. Sección de llegadas del modelo de simulación</i> .....                       | 59 |
| <i>Figura 4.13. Sección de locaciones del modelo de simulación</i> .....                     | 59 |
| <i>Figura 4.14. DTS dentro de la sección de locaciones del modelo de simulación</i> .....    | 60 |
| <i>Figura 4.15. Sección de variables globales del modelo de simulación</i> .....             | 60 |
| <i>Figura 4.16. Sección de atributos del modelo de simulación</i> .....                      | 62 |
| <i>Figura 4.17. Layout del modelo de simulación</i> .....                                    | 62 |
| <i>Figura 4.18. Sección de proceso del modelo de simulación</i> .....                        | 63 |
| <i>Figura 4.19. Reporte del modelo de simulación en Promodel</i> .....                       | 64 |
| <i>Figura 4.20. Reporte de variables de modelo de simulación</i> .....                       | 65 |
| <i>Figura 4.21. Resultados de flujo de proceso en línea pretrim</i> .....                    | 66 |
| <i>Figura 4.22. Resultados de flujo de proceso en línea 100</i> .....                        | 67 |
| <i>Figura 4.23. Resultados de flujo de proceso en línea 200</i> .....                        | 67 |
| <i>Figura 4.24. Resultados de flujo de proceso en línea 300</i> .....                        | 68 |
| <i>Figura 4.25. Resultados de flujo de proceso en línea 400</i> .....                        | 68 |
| <i>Figura 4.26. Resultados de flujo de proceso en línea 500</i> .....                        | 69 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.27.</b> Resultados de flujo de proceso en línea 600.....                               | 69 |
| <b>Figura 4.28.</b> Resultados de flujo de proceso en línea 700.....                               | 70 |
| <b>Figura 4.29.</b> Resultados de flujo de proceso en línea 800.....                               | 70 |
| <b>Figura 4.30.</b> Resultados de flujo de proceso en línea 900.....                               | 71 |
| <b>Figura 4.31.</b> Mejoramiento de velocidad de transferencias.....                               | 72 |
| <b>Figura 4.32.</b> Resultados de modelo de simulación con optimización de transferencias.....     | 72 |
| <b>Figura 4.33.</b> Cuello de botella de modelo con optimización de transferencias.....            | 73 |
| <b>Figura 4.34.</b> Mejoras en brazo de tanque de gasolina.....                                    | 73 |
| <b>Figura 4.35.</b> Resultados del modelo con optimización de brazo de tanque de gasolina.....     | 74 |
| <b>Figura 4.36.</b> Cuello de botella posterior a optimización de brazo de tanque de gasolina..... | 74 |
| <b>Figura 4.37.</b> Resultados de modelo de simulación final.....                                  | 75 |

# ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 2.1.</b> Análisis comparativo de estudios previos.....   | 45 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Ventajas de la modificación de las velocidades de las transferencias.....                 | 78 |
| <b>Tabla 4.2.</b> Riesgos relacionados con la modificación de las velocidades de las transferencias.....    | 78 |
| <b>Tabla 4.3.</b> Problemas relacionados con la modificación de las velocidades de las transferencias.....  | 78 |
| <b>Tabla 4.4.</b> Ventajas de la modificación del brazo de tanque de gasolina.....                          | 80 |
| <b>Tabla 4.5.</b> Riesgos relacionados con la modificación del brazo de tanque de gasolina.....             | 80 |
| <b>Tabla 4.6.</b> Problemas relacionados con la modificación del brazo de tanque de gasolina.....           | 81 |
| <b>Tabla 4.7.</b> Beneficios de la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo.....              | 82 |
| <b>Tabla 4.8.</b> Riesgos relacionados con la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo.....   | 83 |
| <b>Tabla 4.9.</b> Problemas relacionados con la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo..... | 83 |

# ÍNDICE DE ECUACIONES

|  |           |
|--|-----------|
| <i>4.1. Ecuación de prueba de hipótesis para validar modelo inicial.....</i> | <i>65</i> |
|--|-----------|

# 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en aplicar una metodología para la realización de un diagnóstico de flujo de una planta automotriz del noroeste del país con la finalidad de identificar los principales cuellos de botella y plantear estrategias para eliminarlos.

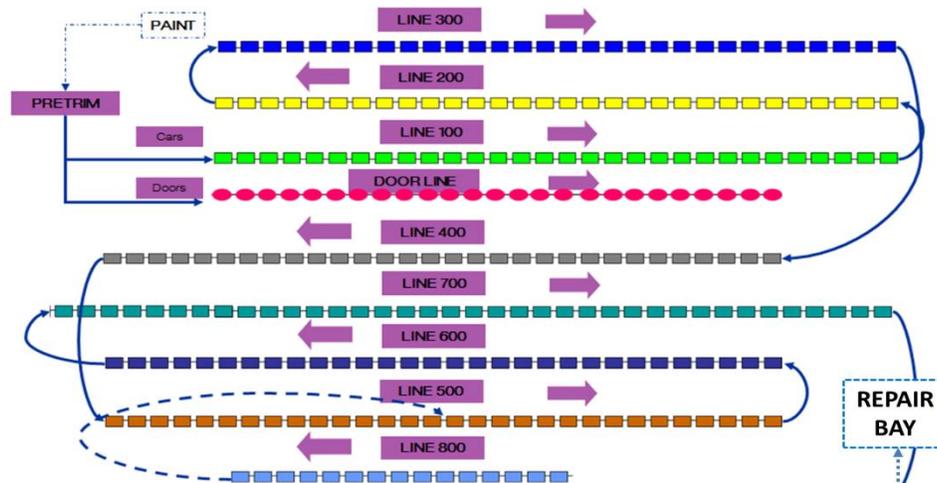
El presente capítulo muestra una explicación de los antecedentes de la industria automotriz donde se realiza la investigación, las razones y condiciones que dan lugar a la problemática que presenta la empresa bajo estudio y conceptos que se utilizarán a lo largo del desarrollo de la presente tesis las cuáles son un sustento para las herramientas que se pretenden aplicar, se establecen los objetivos tanto el general como los específicos, se plantea la hipótesis a la que se le dará respuesta con la conclusión de la investigación, el alcance y las limitaciones, así como la justificación de él porqué llevar a cabo la investigación.

## 1.1. Presentación

El presente proyecto se desarrolla en una institución productiva de la rama automotriz ubicada en el noroeste de México; particularmente se lleva a cabo en el área productiva que cuenta con más centros de trabajo y cuyos objetivos de flujos son los más estrictos dentro de esta organización productiva de clase mundial. Esta área se encuentra establecida desde el inicio de las operaciones de esta planta el 2 de Noviembre de 1986 (De la Garza, 2012). Se hace la aclaración que por cuestiones de confidencialidad y a petición de la organización se omitirá su nombre y el área específica donde se desarrollará el proyecto en el documento de tesis y los productos académicos derivados de ella.

La empresa se encuentra en pleno lanzamiento de un nuevo modelo denominado proyecto CD4, el cual ha tenido un gran impacto en los diferentes foros de promoción y divulgación del vehículo, tales como revistas especializadas, auto shows, comerciales y demás. La compañía lanzó un programa agresivo de sistema de apartado de unidades CD4 y según los últimos reportes de la compañía se tienen vendidas el 100% de las unidades que se planean producir de Agosto del 2012 a

Abril del 2013. El área sometida a análisis, se encuentra dividida en 10 líneas de producción interconectadas a través de Transportadores y acumuladores y sus características particulares se muestran a continuación:



**Figura 1.1.** Sistema productivo de Ensamble Final.

- **Pretrim:** esta línea representa el inicio de las operaciones del área estudiada, la característica principal es que cuenta con estaciones de paro con tiempo ciclo requerido de 30 segundos y transferencias de 15 segundos y el sistema de transportadores permite burbujas o huecos entre las unidades a diferencia de las demás líneas del sistema. Al final de esta línea se encuentra un transportador con capacidad para almacenar 15 unidades, el cual enlaza al Pretrim con la Línea 100.
- **Líneas 100, 200 y 300 (TRIM):** estas líneas presentan la particularidad que cuentan con un sistema de skillets (plataformas móviles o deslizables), los cuales conforman la línea articulada (cuando una estación para, la línea completa se detiene). La línea 100 alimenta a la línea 200 y existe un acumulador de 4 unidades entre ellas, la línea 200 alimenta a la línea 300 y existe un acumulador de 5 unidades entre ellas y la línea 300 alimenta a la línea 400 y existe un acumulador de 16 unidades entre ellas.
- **Líneas 400, 500, 600 y 700 (CHASSIS):** estas líneas funcionan de manera idéntica que las de TRIM, la línea 400 alimenta a la línea 500 y así sucesivamente y los acumuladores tienen 14, 8 y 11 unidades respectivamente.

El flujo del área estudiada termina cuando las unidades salen de la línea 700 hacia el área de reparaciones de la planta.

- **Línea 800:** es conocida también como línea de motores ya que en ella se realiza el montaje del motor y suspensión en un sistema de Boogies (sistemas de levante neumático, con la particularidad que son dispositivos móviles que se mueven a través de un ovalo de manera cíclica) para surtir estas partes en la mitad de la línea 500 (se conectan en la estación 519) y ayudar en la instalación de estas partes críticas. En cuanto a flujo, funciona igual que las líneas de TRIM y CHASSIS.
- **Línea 900:** es conocida también como línea de puertas ya que en esta línea se ensamblan los componentes relacionados a las mismas y funcionan con el mismo sistema de flujo que las líneas de TRIM y CHASSIS. Las puertas se remueven de las unidades en la última estación de PRETRIM y se mandan por transportadores hacia la línea de puertas, dicho acumulador tiene una capacidad de 40 juegos de puertas (se requieren 2 juegos por unidad). Las puertas viajan por transportadores hacia la línea 700 para ser instaladas de nuevo a la unidad en la estación 731 y en medio del transportador se encuentra un acumulador de 115 juegos de puertas más los 11 juegos que se encuentran en movimiento a lo largo del transportador.

## 1.2. Planteamiento del problema

El problema consiste en que según los indicadores de flujo de la compañía, el área sometida a análisis actualmente produce un volumen diario de 1,324 unidades (el objetivo es de 1,419 unidades), es decir que la planta ha logrado producir solo el 93.30% de las unidades programadas por las oficinas divisionales de la compañía ubicadas en Detroit, esto provoca serios problemas, como los siguientes:

- Decremento de los recursos de la planta (algunos presupuestos se basan en costo por unidad) y pago de tiempo extra los domingos productivos.
- No se entregan a tiempo el 6.7% las unidades a los clientes que incluso ya pagaron por ellas (los clientes pagan por adelantado por ser un nuevo modelo).

Un análisis de simulación de una firma de consultoría estadounidense (su nombre no se incluye por cuestiones de confidencialidad) señala que los principales problemas que tiene la planta para lograr dar el volumen requerido consiste en que los proveedores son incapaces de entregar las partes a tiempo en el lugar indicado para que la planta pueda disponer de ellas y cumplir con su programa de producción. El área más afectada es precisamente la que se simulará utilizando la metodología propuesta y el software ProModel para determinar la capacidad máxima del proceso y el volumen real obtenido después de considerar tiempo de paro de los equipos, paros por proveedores, retrasos de los técnicos base e inconsistencias de flujo provocadas por una mala sincronización entre las líneas. El área de la planta sometida a análisis no ha conseguido producir el volumen requerido por los gerentes de la compañía y se desconoce la contribución de cada factor, por lo que no se puede priorizar de manera efectiva y atacar las causas raíz de este bajo nivel de producción.

### **1.3. Objetivo general**

Proponer un plan de acciones de mejora con su respectivo análisis de caso de negocios con base en la identificación de los principales cuellos de botella dentro del área de esta planta automotriz.

### **1.4. Objetivos específicos**

- Determinar la capacidad máxima actual del área estudiada basada en los cuellos de botella y determinar el efecto de cada aspecto que causa paros de línea.
- Desarrollar propuestas de mejora de flujo para el área y cuantificar el impacto de cada propuesta de mejora en términos de flujo, realizando el pertinente estudio de costo-beneficio.
- Entregar los casos de negocios de las propuestas de mejora para las prioridades basadas en los principales cuellos de botella y los factores que resulten causantes del mayor porcentaje de paros en el sistema.

## **1.5. Hipótesis**

La implementación de las mejoras propuestas impulsará a la empresa a mejorar sus indicadores de flujo y cumplir con los objetivos corporativos.

## **1.6. Alcances y delimitaciones**

Este proyecto se realizará con la finalidad de determinar la capacidad máxima del área y la contribución de cada factor que provoca paros de línea con la finalidad de determinar las prioridades a atacar por parte de la compañía, sin embargo no se pretende incluir cuestiones de transporte o flujo por parte de los proveedores ni la logística interna de materiales de la compañía, únicamente se estudia el detalle de los tiempos ciclos de las estaciones de trabajo y los paros de línea por estación, realizando una clasificación de los mismos dependiendo de la causa raíz. Se considerarán los 3 turnos productivos y las 10 líneas de ensamble del área productiva estudiada. La principal diferencia de este análisis de flujo respecto a los estudios de simulación que se han llevado a cabo en Ford consiste en tomar en cuenta la mezcla de productos y sus diferentes opciones en cuanto a componentes.

## **1.7. Justificación**

La importancia de realizar este proyecto consiste en proporcionar información cuantitativa que refleje los principales cuellos de botella para que la compañía destine recursos a los problemas que contribuyen de manera más significativa al problema de flujo actual en el área estudiada (ya que al ser la más grande repercute de gran manera en la eficiencia global de la planta) y desarrollar una metodología exitosa para la evaluación de flujo en sistemas productivos no ficticio. En los siguientes capítulos se plantea el marco teórico que da sustento al proyecto, se describe la metodología que se utilizó en la realización del diagnóstico de flujo, se proporciona información referente a la implementación de la metodología, análisis de los resultados, recomendaciones, trabajos futuros y conclusiones.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

Para que cada una de las secciones del presente proyecto sea comprendida por completo, es importante explicar la teoría relacionada con simulación de flujo de proceso en sistemas productivos, definiciones y herramientas básicas, hasta la aplicación e interpretación de cada diagrama y gráfico que se utilizó en la realización del estudio. En resumen, el presente capítulo, se presenta una recopilación de toda la información pertinente al lector para la completa comprensión de los temas tratados a lo largo de la investigación.

### 2.1. La industria automotriz

Según De la Garza (2012) “la crisis de las grandes corporaciones del auto y, en particular, de las firmas estadounidenses, que se desnudó en la crisis financiera iniciada con la bancarrota de Lehman Brother en agosto de 2008, colocó un emplazamiento final a los diseños productivos, sistemas de manufactura y empleo, estrategias de comercio y organización industrial seguidas por las firmas bajo modelos industriales no sustentables (Freyssenet, 2009; Mc Duffie, 2010). De hecho, el primer autor postula que todo ello nos sitúa en el umbral de la "segunda revolución del automóvil" (Freyssenet, 2009); el movimiento que vendrá a substituir el motor de combustión interna como paradigma industrial dominante por nuevos sistemas energético-motrices.

En 2008, la producción mundial de vehículos automotores se desplomó en casi tres millones respecto al año previo. Pero lo más grave lo experimentó el mercado estadounidense, pues cedió más de 2 de esos 3 millones. Esto significó que Estados Unidos en tan sólo cuatro años (entre 2004 y 2008) bajaran de representar 18.4% de la producción mundial a 12.2%. De ahí que para este momento no sólo Japón produjo más vehículos que Estados Unidos (11.4 contra 8.7 millones), sino que China también (9.3 millones). No les tomaría a los chinos más que unas decenas de meses más para tomar el liderazgo como nuevo centro mundial de producción y ventas. En

efecto, al cierre de 2010, China produjo 18.2647 millones de vehículos y vendió 18.0619; 32.4 y 32.4% más que el año previo, respectivamente. Estados Unidos, por su parte, colocaron 11.6 millones de autos, un incremento de 11.94% respecto a 2009.

La crisis tomó a otros grandes iconos de la industria de bajada. Ninguno de ellos como Toyota, que a sus acumulados problemas financieros apegó en los últimos dos años la más larga cadena de desperfectos y fallas en seguridad en varios de sus carros, eventos que de inmediato hicieron disminuir la confianza del consumidor en la firma, otrora símbolo imbatible de calidad y confiabilidad. El retiro de productos, las demandas de consumidores y los llamados de reposición se hicieron patentes durante 2009, y aún se mantuvieron a lo largo de 2010. Por ello no extrañó que en las postrimerías de 2010, Consumer Reports revelara que en los últimos dos años, el puntaje de confianza en Toyota cayera 46 puntos a contrapelo del puntaje de Ford, que aumentó 35 puntos. ¿La consecuencia? Mientras en 2010 los mercados mundiales mostraron signos de recuperación y las firmas dominantes procedieron a relanzarse, Toyota fue la única de las grandes firmas que sufrió una caída en sus ventas en comparación con 2009”.

### **2.1.1. La industria automotriz en México**

“Hacia 1950, la industria automotriz internacional quedó estructurada de manera definitiva al transformar su papel dentro de la expansión internacional del capital e involucrar directamente a los países subdesarrollados. En México dio origen a una de las industrias más dinámicas.

La industria del automóvil en México surgió dotada de un alto grado de concentración del capital y su desenvolvimiento estuvo caracterizado por los patrones de expansión internacional de las grandes empresas automotrices. De ahí que desde el inicio de la producción automotriz en México, haya estado regida por la estrategia e intereses del capital extranjero, principalmente norteamericano.

La industria automotriz en México partió de la comercialización de vehículos de transporte promocionados por las grandes empresas automotrices extranjeras. Su

instalación en el país se inició sobre una base productiva casi inexistente, ésta se integraría en realidad varias décadas después.

A las actividades de distribución se fueron articulando paulatinamente líneas de ensamblado de los vehículos, posteriormente se inició la producción de algunas partes automotrices y de materias primas nacionales. De ahí que no fue sino hasta la década de los sesenta, y gracias a una serie de medidas impulsadas por el Estado, que esta industria adquirió otra dimensión y se transformó en fabricante automotriz. Las líneas generales de este proceso se pueden apreciar en la periodización que se propone a continuación:

- Entre 1908 y 1925 aparecieron los primeros automóviles en el país. La ausencia de producción de partes automotrices y de plantas de ensamblado hizo que las unidades distribuidas en el mercado nacional se importaran completamente terminadas.
- Entre 1926 y 1947 se instalaron las primeras líneas de montaje en el país, se inició así el ensamblado de automóviles con piezas de importación. El apoyo gubernamental se hace presente favoreciendo las importaciones y no estableciendo restricciones.
- Entre 1948 y 1959 se aprecia una proliferación de empresas ensambladoras, de marcas y modelos, con una muy limitada producción de autopartes. Las medidas de política económica que implementó el Estado, y su participación como productor en esta industria, se hicieron notables en este período, que muestra ya las características que orientarán la posterior integración automotriz bajo la dirección del capital extranjero.
- A partir de 1960 y hasta 1972, la industria ensambladora de automóviles se convirtió en una de las más importantes y dinámicas de la economía mexicana, empezó a fabricar automóviles y partes de éstos. Estas transformaciones fueron impulsadas definitivamente por el Decreto de 1962, aun cuando su contenido fundamental haya sido formulado en años anteriores. A partir de entonces el Estado participa en este proceso de manera directa y determinante en la

integración horizontal de la industria automotriz, y en los diferentes campos de su desenvolvimiento posterior.

- En 1972 se emitió un nuevo decreto, que invalidando el elaborado diez años antes, rigió el desenvolvimiento de la industria automotriz hasta el año de 1977. El Estado favoreció la expansión de la industria con políticas de control sobre las organizaciones de los trabajadores. En este período, el capital extranjero cimentó las pautas de la expansión en lo que hace a la producción y tecnología, a las ventas y a la estructura organizativa de esta industria y sus empresas.
- A mediados de 1977 podía apreciarse con claridad elementos que modificaban la estructura de la producción automotriz y se recomponían la división del trabajo en su interior, por lo que reordenaban aceleradamente las relaciones entre las grandes empresas automotrices, así como entre el sector terminal y de autopartes. El decreto para el fomento de la industria automotriz que se emitió en junio de ese año, marca con la liberación de precios para los automotores del inicio de una serie de modificaciones en la política tanto estatal como empresarial que tienden a estructurarla nuevamente. Estos aspectos permiten suponer un reordenamiento de la industria y de las grandes empresas que operan la producción automotriz en México.” (Camarena, 2014).

Según De la Garza (2012) “para un sector automotriz como el mexicano del que gravitan alrededor de un millón de los mejores empleos del país, y un cúmulo de plantas automotrices elevadamente dependientes del mercado estadounidense, los retos de las grandes firmas comportan consecuencias directas.

La industria automotriz, a diferencia de otras industrias, se encuentra organizada regionalmente Incluso mientras la globalización arreció hasta llegar a ser el fenómeno económico dominante a través de fronteras, las corporaciones automotrices enfatizaron estrategias regionales dentro de sistemas de producción integrados en ese nivel territorial.

Las estrategias regionales no son algo nuevo en la historia de las firmas transaccionales. Han sido una metodología corporativa para formar un espacio regional, dentro y a través de fronteras, objeto de enfocar líneas productivas y de

mercado que eventualmente ganen y prevalezcan en la arena competitiva.

La regionalización se hizo evidente en los años noventa en México. La producción de autos por aquel entonces creció extraordinariamente impulsada por el lugar que las firmas dieron al país como sitio confiable y barato para relocalizar operaciones. Impulsada por el Tratado de Libre Comercio, el cual desde luego terminó de crear las zonas francas para las exportaciones e importaciones de partes y componentes, así como unidades terminadas que requería el sector.

Entre 1938 y 1993, la producción de vehículos terminados en México se incrementó en 130%, de 629 mil a 1 453 000 unidades. Para 2000, las unidades producidas en México llegaron a 1 889 436 unidades. Para 2004, se desplomaron a 1.5 millones, pero a partir de ahí empezaron a remontar sostenidamente hasta alcanzar cifras históricas: para 2007 y aún para 2008, con 2 105 789 y 2 180 294 unidades, respectivamente. Pero he aquí que la crisis desplomó la producción en 28.3% para 2009, o 596 mil unidades para quedar la producción en 1 566 842 unidades. La recuperación no tardó y fue considerablemente fuerte. Al cierre de 2010, la producción alcanzó 2 260 776 unidades.

Al inicio de la crisis, durante el otoño de 2008, México continuaba dando cuenta de esta integración regional fabricando tanto como 24 modelos de automóviles, 80% para exportación principalmente al mercado de Estados Unidos. Las exportaciones General Motors, Ford y Chrysler respondían por 70%. El resto se repartió entre los otros cuatro corporativos automotrices instalados en el país: los japoneses Nissan, Toyota y Honda, y la alemana Volkswagen.

Sumadas las ventas de autos y componentes al mercado exterior, el sector automotriz rondó los 45 mil millones de dólares estadounidenses en captación de divisas, para una industria automotriz instalada compuesta de 20 plantas de ensamble, alrededor de dos mil fábricas de partes y componentes, y una red de más de mil 400 distribuidores. Sumadas las actividades manufactureras, comerciales y de servicios conectadas a la industria automotriz, la generación de empleos alcanzó un millón de empleos directos formales y el sector representó 13.5% del empleo industrial en México, 4.0% del Producto Interno Bruto total y 16% del *PIB*

manufacturero (CEPAL, 2010).

Para 2009, mientras el PIB nacional se desplomó en 7%, el sector automotriz bajó a representar 2.7% del valor agregado bruto nacional y 15% del valor manufacturero. El cierre de plantas y el despido de personal redujeron la plantilla laboral en 15 por ciento. El empleo específico de obreros y empleados en las fábricas automotrices perdió alrededor de 35 mil puestos de trabajo de 2008 a 2009. Así en este último año las fábricas automotrices reportaron un empleo de 159 989 trabajadores, contra 194 953 de un año antes. Este nivel de empleo, regreso el reloj a los primeros años de la década previa y si lo comparamos con 2007 —el año de mayor volumen de empleo de estas fábricas, con 209 876 puestos— la pérdida acumulada asciende a prácticamente 50 mil plazas.

Durante la crisis, Nissan aprovechó para desbancar a General Motors como el primer productor automotriz del país. No duró mucho en el puesto. A 2010, General Motors es de nuevo el primer productor, seguido muy de cerca por Nissan. Les continúan Volkswagen, Ford y Chrysler. Al final aparecen Honda y Toyota con producciones muy modestas en el mercado nacional alrededor de 50 mil vehículos cada una”.

### **2.1.2. Ford en México**

Según De la Garza (2012) “el único de los tres gigantes auto-productores de Norteamérica que puede presumir sostenerse en pie por sí mismo, no cesó sus planes e inversiones de expansión en el país por estos años. En parte porque su situación financiera fue menos crítica que la de General Motors y Chrysler, en parte porque los planes para fortalecerse en y desde México venían desde 2006, el hecho es que Ford mantuvo en medio de la crisis un flujo constante de inversiones. En estricto, desde la remodelación de la planta Ford Hermosillo en 2005 para lanzar el Fusión y una gama de variedades de modelos Lincoln mkz y Mercury Milán figurando el proyecto CD3. Ford dejó ver que la planta Hermosillo (HSAP por sus siglas para Ford) y México eran centrales en la operación de su estrategia global Way Forward.

En mayo de 2008 el corporativo reveló que destinaria 3 mil millones de dólares estadounidenses para México, a distribuirse en tres frentes: la reestructuración de la

planta de Cuautitlán, la integración de una nueva planta de motores diésel en el complejo de Ford Chihuahua y la apertura de una nueva planta en Guanajuato — desarrollada en conjunto con la empresa Getrag— para fabricar transmisiones. En el inicio del 2012 publicaciones especializadas revelaron que el corporativo tiene en proceso el sucesor del CD3 (será el Proyecto CD4) y que el mismo ya fue Fusion-Mondeo asignado a Hermosillo. En él se invertirán 1.5 mil millones de dólares para lanzar la siguiente generación de autos Ford dirigidos al segmento medio.

En la planta Hermosillo, en 2008 se invirtieron 600 millones de dólares adicionales en instalaciones y equipo para crear las versiones 2010 de los modelos híbridos de Fusion y Mercury, mismos que entraron en línea a partir de febrero del siguiente año. En septiembre de 2009, el corporativo pudo pregonar que el Ford Fusion número un millón había salido de las líneas de producción de HSAP, representando dos cosas por igual ligadas e importantes, Por un lado, el éxito del proyecto CD3 operado desde México en tan sólo cuatro años, Por el otro, la demanda obtenida y sostenida en el mercado norteamericano de los productos del CD3.

El proyecto y plataforma CD4 colocaron otra cantidad de recursos en HSAP, alrededor de 1 500 millones para lanzar la nueva generación Ford de autos medios tan pronto como en 2012, para el modelo 2013. Ocupó 2 mil empleos más, con lo que la nómina suma 5 mil empleos con los que se espera llegar a producir 500 mil unidades por año. Las ampliaciones de HSAP significarán extenderla a través de seis nuevas naves industriales en 43 000 m<sup>2</sup>. La plataforma CD4 se espera que sea una piedra angular dentro de la línea de vehículos globales Ford. La “convergencia” Fusion/Mondeo será la primera en emplear el chasis CD4, seguido por el Taurus, MKZ, el nuevo Lincoln C. Concept, y otros Ford más.

En suma, la asignación del CD4 a Hermosillo es no sólo un reconocimiento a los logros alcanzados desde México con el CD3, sino también una respuesta al hecho indisputado a nivel del corporativo en el sentido que HSAP es su fábrica número uno tanto en términos de calidad como de costos”.

## 2.2. Sistemas de producción

Según Gamarra (2012) “un sistema de producción es un conjunto de actividades o eventos relacionados que mediante su interacción transforman los insumos en productos con un valor” tal y como se muestra en la figura 2.1:



**Figura 2.1.** *Sistemas de Producción (Gamarra et al., 2012).*

### 2.2.1. Clasificación de los sistemas de producción

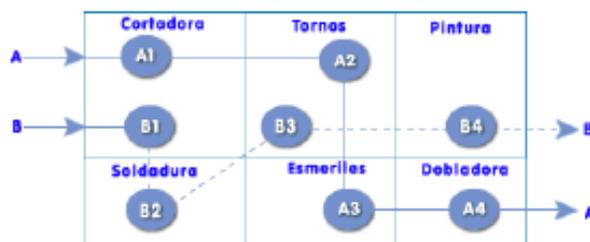
Según Gamarra (2012) “los sistemas de producción se pueden clasificar de diversas maneras; a continuación se presentan a detalle:

- **Sistema de Producción Lineal o por Producto.** Es un sistema diseñado para fabricar un determinado producto, con este se logran altos niveles de producción y su administración está enfocada en mantener siempre el flujo de las operaciones y el funcionamiento de todas las máquinas. En la figura 2.2. se detalla el proceso lineal:



**Figura 2.2.** *Sistemas de Producción lineal (Gamarra et al., 2012).*

- **Sistema de Producción intermitente.** Los sistemas de producción intermitentes organizan centros de trabajo donde se agrupan familias de máquinas que realizan operaciones iguales o similares, en ellos el producto fluye hacia los departamentos que lo necesiten, la producción no tiene flujo regular y no todos los productos utilizan todos los departamentos. En la figura 2.3. se detalla el proceso intermitente:



**Figura 2.3.** Sistemas de Producción intermitente (Gamarra et al., 2012).

- **Sistema de Producción por Proyecto.** Estos sistemas son utilizados para elaborar productos únicos (edificio, película, barco, puente, etc.); se llevan a cabo en un lugar específico y por lo general no en una planta sino en donde se le dará el uso final al producto, en este caso no hay flujo de producto sino de actividades a realizar.
- **Sistema de Producción Job Shop o Configuración de Taller.** La configuración de taller se usa cuando se producen variedad de productos y el sistema no es lineal, se utiliza para pedidos específicos o acondicionados por lotes pequeños.
- **Sistema de Producción en Línea Compasada con el Equipo.** En este tipo de sistema, los productos no tienen gran diferencia entre ellos y los modelos a realizar son pocos. La velocidad de producción es determinada por las máquinas. Son ejemplo de este, el envasado de bebidas, la extrusión de plásticos, entre otros”.

## 2.3. La industria manufacturera y la simulación

“Para una compañía industrial, el invertir en el desarrollo e implementación de un sistema de simulación es sumamente beneficioso, ya que los efectos que se generan, permiten manejar el espacio global de la fábrica dentro de un ambiente permisible a modificaciones y cambios, y sin incurrir en gastos cuantiosos de dinero y de tiempo.” (Álvarez y García, 2013).

“El mayor desafío para un ingeniero de simulación en términos de precisión es seleccionar el nivel de detalle que se desea incluir en un modelo. En la mayoría de los casos, los niveles de detalle o abstracción superposición y por lo tanto, tomar una decisión binaria resulta casi imposible” (Vasudevan, 2011).

Esta decisión sobre los niveles de abstracción también afecta a la elección de software. Vasudevan y col. (2009) analizan los métodos de selección de software en

detalle. El uso incorrecto o una mala selección de software y la abstracción pueden conducir a importantes retrasos en el cronograma del proyecto. “Algunas herramientas de simulación puede ser muy fácil de usar al modelar las estaciones de trabajo de líneas de montaje para estudiar el rendimiento, pero puede ser extremadamente difícil de usar al manipular células de trabajo robóticas debido al tipo de interacciones o sistemas de transporte tipo cruz de transferencia para estudiar los parámetros de aceleración” (Vasudevan et al., 2009).

## **2.4. Simulación**

Según Coss (1998) “con el advenimiento de la computadora, una de las más importantes herramientas para analizar el diseño y operación de sistemas o procesos complejos es la simulación. Aunque la construcción de modelos arranca desde el Renacimiento, el uso moderno de la palabra simulación data de 1940, cuando los científicos Von Neuman y Ulam que trabajaban en el proyecto Monte Carlo, durante la Segunda Guerra Mundial, resolvieron problemas de reacciones nucleares cuya solución experimental sería muy cara y el análisis matemático demasiado complicado. Con la utilización de la computadora en los experimentos de simulación, surgieron incontables aplicaciones y con ello, una cantidad mayor de problemas teóricos y prácticos.

Tomas H. Naylor definió la simulación 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.

En sentido más estricto, H. Maisel y G. Gnugnoli, definen simulación como “una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, físicos o químicos a través de largos períodos de tiempo.

Robert E. Shannon define simulación como el proceso de diseñar y diseñar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema”.

## **2.5. Simulación de eventos discretos**

“La simulación de eventos discretos se define como el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinada. El objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema” (García et. al., 2006).

“La aplicación de simulación de eventos discretos en las industrias de proceso se utiliza comúnmente para el análisis de fiabilidad y las mejoras de mantenimiento. Sin embargo, ha habido un incremento en las aplicaciones que van más allá de esta zona tradicional de aplicación para incluir evaluaciones para ampliaciones de plantas químicas, las opciones de inversión de capital, reducción de tiempo de ciclo y de seguridad, en presencia de los componentes susceptibles de fallo” (Sharda & Bury, 2011).

“El análisis basado en simulación de eventos discretos es ampliamente considerado como una buena práctica para la fiabilidad y el análisis del rendimiento del sistema de fabricación debido a su capacidad de modelar esa dinámica de sistemas complejos con relativa facilidad. Los modelos de simulación simulan la dinámica de funcionamiento de un sistema, y pueden aprovecharse para otros proyectos de mejora con poca o ninguna personalización” (Sharda & Bury, 2011).

La diferencia, y el poder de la simulación de eventos discretos es la capacidad de imitar la dinámica de un sistema real. Muchos de los modelos, incluidos los modelos de alta potencia de optimización, no pueden tomar en cuenta la dinámica de un sistema real. La capacidad de imitar la dinámica del sistema real es lo que proporciona a la simulación de eventos discretos su estructura, su función, y su forma única para analizar los resultados. La simulación es el proceso de diseñar un modelo

dinámico de un sistema dinámico real con la finalidad de entender el comportamiento del sistema o para la evaluación de distintas estrategias para la operación del sistema (Ingalls, 2013).

## 2.6. Conceptos de simulación

Con la finalidad de tener una mejor comprensión acerca de los términos utilizados en el desarrollo de esta tesis, en esta sección se incluyen las definiciones de los conceptos referentes a simulación. Garcia (2006) proporciona definiciones acertadas para los siguientes conceptos:

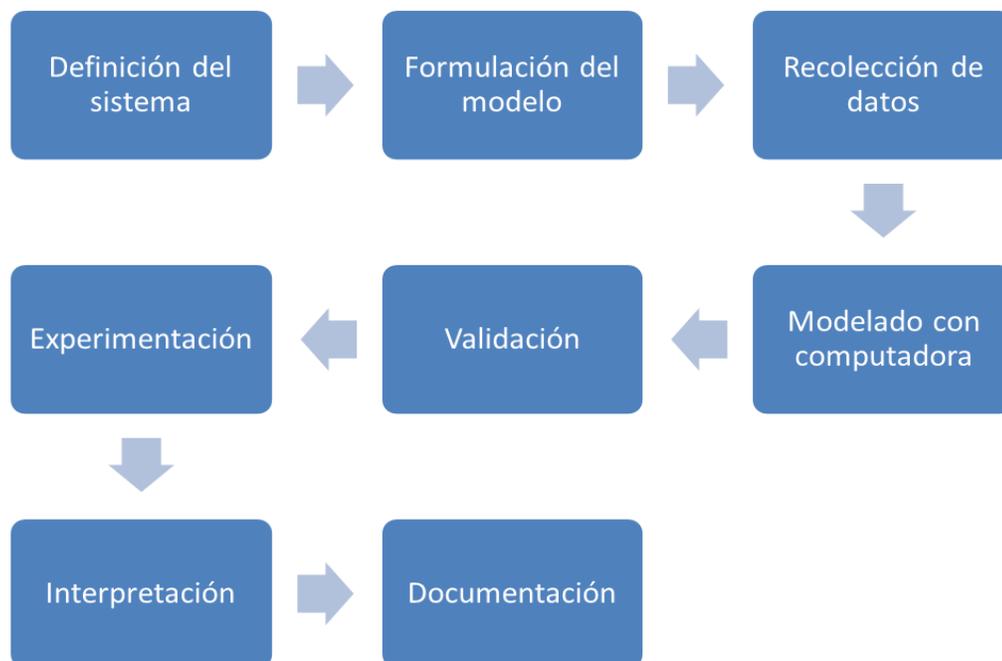
- **Sistema:** Se trata de un conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo; desde el punto de vista de la simulación, tales elementos deben tener una frontera clara. Entre ellos tenemos entidades, estado del sistema, eventos actuales y futuros, localizaciones, recursos, atributos, variables y el reloj de la simulación.
- **Entidad:** Es la representación de los flujos de entrada a un sistema; éste es el elemento responsable de que el estado del sistema cambie. Ejemplos de entidades pueden ser los clientes que llegan a la caja de un banco, las piezas que llegan a un proceso o el embarque de piezas que llega a un inventario.
- **Estado del sistema:** Es la condición que guarda el sistema bajo estudio en un momento determinado; es como una fotografía de lo que está pasando en el sistema en cierto instante. El estado del sistema se compone de variables o características de operación puntuales, y de variables o características de operación acumuladas, o promedio,
- **Eventos:** Es un cambio en el estado actual del sistema; por ejemplo, la entrada o salida de una entidad, la finalización de un proceso en un equipo, la interrupción o reactivación de una operación o la descompostura de una máquina. Podemos catalogar estos eventos en dos tipos: eventos actuales, que son aquellos que están sucediendo en el sistema en un momento dado, y eventos futuros, que son cambios que se presentarán en el sistema después del tiempo de simulación, de acuerdo con una programación específica.

- **Localizaciones:** Son todos aquellos lugares en los que la pieza puede detenerse para ser transformado o esperar a serlo. Dentro de estas localizaciones tenemos almacenes, bandas transportadores, máquinas, estaciones de inspección, etcétera.
- **Recursos:** Son aquellos dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación. Por ejemplo, un montacargas que transporta una pieza de un lugar a otro; una persona que realiza la inspección en una estación y toma turnos para descansar, etcétera.
- **Atributo:** Es una característica de una entidad. Por ejemplo, si la entidad es un motor, los atributos serían su color, peso, tamaño o cilindraje. Los atributos son muy útiles para diferenciar entidades sin necesidad de generar una entidad nueva, y pueden adjudicarse al momento de la creación de la entidad, o asignarse y/o cambiarse durante el proceso.
- **Variables:** Son condiciones cuyos valores se crean y modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas. Pueden ser continuas o discretas. Las variables son muy útiles para realizar conteos de piezas y ciclos de operación, así como para determinar características de operación del sistema.
- **Reloj de la simulación:** Es el contador de tiempo de la simulación, y su función consiste en responder preguntas tales como cuánto tiempo se ha utilizado el modelo en la simulación, y cuánto tiempo en total se requiere que dure esta última. En general, el reloj de simulación se relaciona con la tabla de eventos futuros, pues al cumplirse el tiempo programado para la realización de un evento futuro, éste se convierte en un evento actual. Podemos hablar de dos tipos de reloj de simulación: el reloj de simulación absoluto, que parte de cero y termina en un tiempo total de simulación definido, y el reloj de simulación relativo, que sólo considera el lapso de tiempo que transcurre entre dos eventos.
- **Modelos continuos:** Son aquellos en los que las relaciones entre las variables relevantes de la situación real se definen por medio de ecuaciones diferenciales, dado que éstas permiten conocer el comportamiento de las variables en un lapso de tiempo continuo.

- **Modelos discretos:** En ellos el comportamiento que nos interesa analizar puede representarse por medio de ecuaciones evaluadas en un punto determinado. Por ejemplo, si hacemos un muestreo del número de personas que llegaron a un banco en un lapso de tiempo específico, podemos simular esta variable con ecuaciones ligadas a distribuciones de probabilidad que reflejen dicho comportamiento.
- **Modelos dinámicos:** Son aquellos en los que el estado del sistema que estamos analizando cambia respecto al tiempo. Por ejemplo, el número de personas que hacen fila para entrar a una sala de cine varía con el tiempo.
- **Modelos estáticos:** Representan un resultado bajo los únicos valores que se pueden obtener son 1, 2, 3, 4, 5 o 6, de manera que el resultado de la simulación será uno de tales valores posibles; este tipo de simulación generalmente se conoce como simulación de Monte Carlo.
- **Modelos determinísticos y probabilísticos:** Se refieren a relaciones constantes entre los cambios de variables del modelo. Por ejemplo, si las cajas empleadas en un proceso contienen siempre 5 productos, cada vez que se añada una caja al inventario éste se incrementará en 5 unidades. Si se da una distribución de probabilidad en el proceso de manera que algunas cajas contienen 3 productos, otras 4 y así por el estilo, el inventario se modificará según el número de piezas de cada caja y, en consecuencia, será necesario un modelo probabilístico.

## 2.7. Etapas para la realización de estudios de simulación

Se ha escrito mucho acerca de los pasos necesarios para realizar un estudio de simulación. Sin embargo, Coss (1998) opina que existen 8 pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación. En la figura 2.4., se detallan los pasos antes mencionados:



**Figura 2.4.** Etapas para realizar estudios de simulación (Coss, 1998).

- **Definición del sistema.** Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.
- **Formulación del modelo.** Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa al modelo.
- **Recolección de datos.** Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo se puede obtener

de registros contables de órdenes de trabajo, de órdenes de compra, de opiniones de expertos y si no hay otro remedio por experimentación.

- **Modelado en computadora.** Con el modelo definido, el siguiente paso es decidir si se utiliza algún lenguaje como fortran, hasic, algol, etc., o se utiliza algún paquete como GPSS, simula, simscript, etc., para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.
- **Validación.** Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar un modelo son:
  - La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
  - La exactitud con que se predicen datos históricos.
  - La exactitud en la predicción del futuro.
  - La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
  - La aceptación y confiabilidad en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.
- **Experimentación.** La experimentación con el modelo se realiza después de que éste ha sido validado. La experimentación consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- **Interpretación.** En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a esto se toma una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semiestructurado, es decir, la computadora en si no toma la decisión, sino que la información que proporciona ayuda a tomar mejores decisiones y por consiguiente a sistemáticamente obtener mejores resultados.
- **Documentación.** Dos tipos de documentación son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación de tipo técnico, es decir, a la documentación que el departamento de Procesamiento de Datos debe tener del modelo. La segunda se refiere al manual del usuario, con el

cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado a través de una terminal de computadora.

## **2.8. Ventajas y desventajas de la simulación**

“Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado han hecho que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas” (Coss, 1998).

### **2.8.1. Ventajas de la simulación**

Según Coss (1998) “un estudio de simulación es muy recomendable porque presenta las siguientes ventajas:

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La técnica de simulación puede ser utilizada como un instrumento pedagógico para enseñar a estudiantes habilidades básicas en análisis estadístico, análisis teórico, etc.
- La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en el sistema y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.
- La técnica de simulación puede ser usada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- La técnica de simulación se puede utilizar también para entrenamiento de personal. En algunas ocasiones se puede tener una buena representación de un

sistema (como por ejemplo los juegos de negocios), y entonces a través de él es posible entrenar y dar experiencia a cierto tipo de personal.

- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede ser usada para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir en el comportamiento del sistema”.

### **2.8.2. Desventajas de la simulación**

A diferencia de las ventajas mencionadas, dependiendo de la complejidad del sistema, la técnica de simulación presenta el problema de requerir bastante tiempo para que un modelo de simulación sea desarrollado y perfeccionado y es posible que la alta administración de una organización no entienda esta técnica y esto crea dificultad en vender la idea (Coss, 1998).

## **2.9. Ejemplos de usos de simulación**

Según Coss (1998) “existe una gran cantidad de áreas donde la técnica de simulación puede ser aplicada. Algunos ejemplos podrían ser los siguientes:

- **Simulación de un sistema de colas.** Con la técnica de simulación es posible estudiar y analizar sistemas de colas cuya representación matemática sería demasiado complicada de analizar. Ejemplos de estos sistemas serían aquellos donde es posible la llegada al sistema en grupo, la salida de la cola del sistema, el rehusar entrar al sistema cuando la cola es excesivamente grande, etc.
- **Simulación de un sistema de inventarios.** A través de simulación se pueden analizar más fácilmente sistemas de inventarios donde todos sus parámetros (tiempo de entrega, demanda, costo de llevar inventario, etc.), son estocásticos.
- **Simulación de un proyecto de inversión.** Existen en la práctica una gran cantidad de proyectos de inversión donde la incertidumbre con respecto a los flujos de efectivo que el proyecto genera a las tasas de interés, a las tasas de inflación, etc., hacen difícil y a veces imposible manejar analíticamente este tipo de problemas. Para este tipo de situaciones el uso de simulación es ampliamente recomendado.

- **Simulación de sistemas económicos.** La técnica de simulación puede ser utilizada para evaluar el efecto de cierto tipo de decisiones (devaluación de la moneda, el impuesto al valor agregado, etc.), en las demás variables macroeconómicas como: producto nacional bruto, balanza comercial, inflación, oferta monetaria, circulante, etc.
- **Simulación de estados financieros.** La expansión y diversificación de una organización a través de la adquisición y establecimiento de nuevas empresas, repercuten significativamente en su posición y estructura financiera. Por consiguiente, el uso de simulación permite analizar cuál de las estrategias de crecimiento son las que llevarán a la organización al logro de sus objetivos y metas de corto, mediano y largo plazos”.

## **2.10. Análisis de paros de línea y optimización utilizando simulación**

“El uso de modelos de simulación de planificación y apoyo operacional es bien conocido y ha alcanzado un alto nivel de importancia en las últimas décadas. Diferentes configuraciones de sistema pueden ser simuladas y evaluado sobre la base de resultados de la simulación. Como consecuencia de ello, el interés en la optimización basada en la simulación ha ido creciendo en los últimos años” (Hong y Nelson, 2009). “Este interés es debido al hecho de que en el mundo real los problemas de fabricación se caracterizan por un alto nivel de complejidad y no se pueden resolver por métodos analíticos o de enumeración” (Weigert, Henlich y Klemmt, 2008).

“La Optimización basada en la simulación se utiliza en el proceso de planificación táctica de la fábrica y en la toma de decisiones operativas” (Grewal, Enns y Rogers, 2009; Kohn et al., 2009; Moeller et al., 2009; Weigert, Henlich y Klemmt, 2008) para mejorar la procesos operacionales y reducir los costos de inversión y los tiempos de proceso.

“Hay una amplia gama de posibles métodos de optimización que se pueden utilizar con respecto a la simulación, que van desde técnicas de investigación de operación

para meta heurísticas o métodos similares, a la heurística específicos de la aplicación” (Lemessi, Schulze & Rehbein, 2011).

## **2.11. Análisis de cuellos de botella**

Según Gamarra (2012) “las empresas se enfrentan a mercados cada vez más agresivos y competitivos: por lo cual, en el caso de las empresas manufactureras, el hecho de no poseer procesos productivos eficientes, no solo pone en riesgo su participación en el mercado, sino también su permanencia en el mismo. Ante esto surge la necesidad de enfocar esfuerzos a la búsqueda de soluciones efectivas para los problemas que se presentan, y opciones de fortalecimiento y mejoramiento en el uso de los recursos y factores de producción.

Uno de los inconvenientes que más se presenta en un proceso productivo, es cuando se presentan recursos comportándose como cuellos de botella que impiden el flujo continuo del producto en proceso, que ocasiona capacidad ociosa de algunos recursos y a su vez afecta el cumplimiento de la orden de producción para el tiempo en que se requiere.

Además de esto, hay circunstancias en las que con sólo cambiar de referencia o variar la demanda, el cuello de botella pasa de ser un recurso a otro, tomándose complejo de atender de inmediato, al no tener la claridad de cuál es el nuevo recurso cuello de botella, por qué y cómo cambió, lo que dificulta la programación de operaciones.

Por otra parte, desde la ingeniería de métodos, es importante la identificación de cuellos de botella para iniciar acciones de mejoramiento que conlleven a incrementar la eficiencia en dichas estaciones de trabajo: para ello, es necesario conocer los tiempos de procesamiento de las estaciones que conforman la línea de producción, así como también los datos de demanda de los productos que serán fabricados en el periodo.

El mejoramiento de los métodos de trabajo en los procesos, es una tarea básica en ingeniería de producción. Esta tarea permite, entre otros beneficios para el sistema productivo, reducir los tiempos de procesamiento y lograr un mejor aprovechamiento

de los recursos.

Un paso fundamental dentro de esta tarea, consiste en identificar con claridad aquellos cuellos de botella y recursos restrictivos de capacidad, ya que las acciones de mejoramiento deben enfocarse fundamentalmente a incrementar la productividad en estas estaciones de trabajo críticas (ya sean máquinas o centros de trabajo de cualquier tipo).

La identificación del cuello de botella con fines de mejora de métodos, es una actividad de tipo estratégica, y por lo tanto, se realiza para el mediano o largo plazo.

Cuando se aborda este proceso, simplemente se estima la demanda total y el tiempo que dedica cada Recurso u operación, en la elaboración del producto, y enseguida se identifica el que posee mayor carga de trabajo, siendo el candidato principal para iniciar el proceso de mejora de métodos.

Lo anterior es válido para un sistema de producción en donde solo se elabora una referencia. Cuando el sistema procesa varias referencias, se organizan órdenes de producción por lotes de producto. Cada Trabajo debe contener una cantidad  $Q$  de unidades de producto de la misma referencia.

Los Trabajos (órdenes de producción) deben ser programadas en los Recursos disponibles (máquinas, centros de procesamiento, etc.). En este caso, para la identificación del cuello de botella se debe estimar demanda total de cada referencia, y el tiempo de procesamiento de cada referencia en cada Recurso del sistema, identificándose inmediatamente aquél que posee la mayor carga de trabajo. En ese momento se podrá iniciar con el proceso de mejora de métodos. Se deduce entonces que tradicionalmente la identificación del cuello de botella, se basa en un análisis a partir de datos de tiempo determinísticos y suponiendo una demanda fija (casi siempre un valor promedio).

Los recursos (también conocidos como factores productivos) pueden ser personas o máquinas que actúan agregando valor sobre el artículo procesado durante un lapso tiempo definido. A este tiempo se le conoce como tiempo de procesamiento, el cual puede ser estocástico o determinístico, dependiendo de si, al mantener la condiciones de la transformación (recurso, artículo, factores ambientales, entre otros)

se presenta o no variación en él.

Dentro de un mismo proceso o sistema productivo donde el artículo fluye a través de las etapas o estaciones de producción, existen recursos que emplean tiempos de procesamiento mayores que otros. Estos, al variar ciertas condiciones como, el número de piezas procesadas, el número de horas trabajadas, entre otras, pueden supeditar o restringir la fluidez del proceso y/o limitar su capacidad de producción. Cuando esto sucede, se dice que el proceso presenta un cuello de botella o recurso restrictivo de capacidad que ocasiona que todo el sistema se mueva a su ritmo.

Un factor importante que incide en la aparición de un cuello de botella o recursos restrictivos, es la demanda, que es el número de unidades o artículos que son requeridos por los clientes, o que pueden ser vendidos a una población objetivo.

Sí la demanda es superior a la cantidad de unidades que puede procesar el recurso con mayor tiempo de procesamiento, en las horas disponibles, se crea una restricción en la capacidad dada por dicho recurso, lo que conlleva a no poder procesar las unidades requeridas en el tiempo establecido”.

## **2.12. Balanceo de líneas y cuellos de botella**

“Una línea de producción se considera en balance en el momento que todos las operaciones caminan al mismo ritmo. Se puede comparar al flujo de líquido por un tubo, todo el tubo debe ser de la misma capacidad para que el flujo sea continuo y sin traba. Para conseguir el balance cada fase del proceso debe tener la misma capacidad de producción, la manera de conseguir esto se debe calcular la cantidad de operarios y maquinas que necesita la operación para estar al ritmo de las demás” (Gamarra et al., 2012).

### **2.12.1. Identificación de cuellos de botella**

“Un cuello de botella se define como cualquier recurso cuya capacidad es inferior a la demanda colocada sobre esté. Es una limitación dentro del sistema que restringe la demanda atendida. También puede decirse que es el punto dentro del proceso de fabricación, en donde el flujo se reduce a una corriente estrecha. Para Chase, un

cuello de botella puede ser una máquina, una mano de obra escasa o altamente calificada, o una herramienta especializada.

La identificación correcta del cuello de botella del proceso es vital en el desarrollo de posibles mejoras ya que si se centran esfuerzos y recursos en mejorar un centro de trabajo el cual no es el crítico, se pierde todo lo realizado pues no se mejora la producción” (Gamarra et al., 2012).

### **2.12.2. Métodos de identificación de cuellos de botella**

En general existen dos métodos para la identificación del cuello de botella: uno está relacionado con el tiempo de operación y el otro con la carga de trabajo de cada estación: a continuación se describe cada metodología:

### **2.12.3. Identificación del cuello de botella por estudio de tiempos**

Según Gamarra (2012) “el estudio de tiempos es una técnica para determinar con la mayor exactitud posible, partiendo de un número limitado de observaciones, el tiempo necesario para llevar a cabo una tarea u operación determinada dentro de un proceso productivo”.

### **2.12.4. Técnicas para hacer los estudios de tiempos**

Según Gamarra (2012) “en la actualidad existen diferentes técnicas para averiguar el tiempo que tarda un proceso:

- Tiempos predeterminados: se refiere a estudio de tiempos realizados a partir de la estandarización de las actividades de acuerdo a unas tablas guía en la cual se asigna a diversos movimientos un tiempo específico, pero si ocurre un pequeño cambio en el proceso se vuelven obsoletos; es decir ya no sirven de referencia para la toma de decisiones.
- Tiempos estimados: son aquellos que se obtienen a través de la experiencia, el operario sabe cuánto más o menos se demora en realizar sus actividades.
- Tiempos por cronómetro: datos que resultan de la observación de algunos ciclos de trabajo (en horas, minutos o segundos) y permiten determinar en realidad cuánto tiempo le toma a un operario realizar su actividad.

- Muestreo del Trabajo: Se realiza un muestreo estadístico del tiempo de operación de cada estación de trabajo.

La técnica más utilizada es el cronometraje, con el cual es posible establecer la duración que toman las tareas que hacen parte del proceso. La finalidad del estudio de tiempos es establecer un tiempo tipo o estándar que establezca la duración de cada una de las operaciones que se realizan en la empresa.

Para Domínguez Machuca, Tiempo Tipo o Estándar es el patrón que mide el tiempo requerido para determinar una unidad de trabajo, usando método y equipo estándar en un trabajador que posea la habilidad requerida, desarrollando una velocidad normal que pueda mantener día tras día, sin mostrar síntomas de fatiga. El desarrollo de esta metodología requiere de las siguientes etapas:

Según Ortiz Néstor, Pasos a Seguir en un Estudio de Tiempos por Cronometro:

- Selección de un trabajador 'promedio', es decir, que no sea el más experto ni el más inexperto.
- Determinación del ciclo de trabajo (tarea a cronometrar).
- División del ciclo de trabajo en elementos, identificando claramente momentos de inicio de finalización.
- Determinar el número de ciclos (observaciones) que deben registrarse. Para establecer el tiempo estándar se deben observar varios ciclos de trabajo, de *tal* forma que se cuente con información suficiente *para* obtener una estimación más confiable de la duración de la tarea.
- Registrar los Datos.
- Valorar y calcular el Tiempo Normalizado por elemento.
- Calcular el tiempo normalizado promedio por elemento.
- Asignar suplementos y obtener el Tiempo Tipo”.

## 2.13. Distribuciones de probabilidad

Al realizar análisis de cuellos de botella, es posible ajustar los datos obtenidos para el análisis a alguna distribución de probabilidad que represente dichos datos de manera representativa.

Según Gamarra (2012) “cuando una variable aleatoria se representa en forma gráfica es posible identificar una distribución de probabilidad de esa variable que puede ser empírica o teórica. Las distribuciones empíricas se representan usando distribuciones de frecuencias de datos agrupados para lo cual será de mucha utilidad la tabla de frecuencias acumuladas del histograma. Las distribuciones teóricas ya sean discretas o continuas son un excelente medio para ajustar el comportamiento de una variable. Entorno a los recursos restrictivos y/o cuellos de botella hay variedad de posturas e interrogantes, muchos profesionales en el área de producción narran sus experiencias y proponen diferentes técnicas para tratarlos y mejorar la programación y el control de la producción en sus sistemas.

Podría decirse que uno de los precursores en el estudio de éstos, es el físico israelí Eliyahu Goldratt, quien a finales de la década de los 70 muestra al público su estudio en el área de la programación y el control de la producción, lanzando su sistema computarizado OPT (Optimized Production Technology) para tratar “eficientemente” las restricciones que aparecen en un proceso productivo y que son las que determinan el ritmo de toda la producción. Más adelante Goldratt propone a través de su libro *La Meta*, la Teoría de las Restricciones (TOC), que es la filosofía que busca alcanzar la meta de toda empresa (ganar dinero) tratando los cuellos de botellas o recursos restrictivos de capacidad.

El autor propone básicamente que se deben identificar las restricciones del sistema, evaluar como explotar su capacidad, poner las demás operaciones (que no son restricciones) al ritmo de éstas y mejorar la capacidad de las mismas. Además el autor afirma que al tratar una restricción y mejorarla aparece otra operación como cuello de botella o restricción, por lo cual se deben repetir la medidas mencionadas en el párrafo anterior. Podría decirse que la propuesta de Goldratt mencionada en el párrafo anterior, es usada sin tener en cuenta otras variables (como el tempo de procesamiento, la demanda, la mezcla de productos, entre otras) que pueden generar que el cuello de botella pase de una operación a otra inesperadamente, complicando la aplicación de la medidas propuestas. Es por eso que surge la concepción de que un cuello de botella puede ser cambiante o fluctuante. Ante esto,

Goldratt a través de la Teoría de las Restricciones (TOC) enseña que un cuello de botella cambiante sigue siendo una limitación del sistema que debe ser gestionada, pero sin olvidar que por ser fluctuante se agrava la situación, pues el ritmo de todo el sistema queda supeditado al cuello de botella que se presente en determinado momento. Por lo tanto, indica que es necesario fijar la locación del cuello de botella, para así tener control sobre las operaciones del sistema. En esta instancia el autor propone que las capacidades de las operaciones no estén equilibradas respecto a una en especial, es decir, que sea una operación la que tenga una capacidad muy inferior a las demás, de modo que al aparecer variantes en el proceso, esa operación siga siendo el cuello de botella, y así el cambio sea solo producto de una decisión operativa”.

## **2.14. Pruebas de bondad de ajuste**

La bondad de ajuste de un modelo estadístico describe cuán bien se ajusta un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad en general resumen la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio. Tales medidas se pueden emplear en el contraste de hipótesis. Las pruebas de bondad de ajuste tienen por objetivo determinar si los datos se ajustan a una determinada distribución, esta distribución puede estar completamente especificada (hipótesis simple) o perteneciente a una clase paramétrica (hipótesis compuesta). Las pruebas de Bondad de Ajuste más comúnmente conocidas, son: Anderson-Darling, Chi-Cuadrada y Kolmogorov-Smirnov (Grau, 1994).

### **2.14.1. Prueba de Chi-Cuadrada**

La prueba Chi-Cuadrada se emplea tanto para distribuciones continuas como para discretas, mientras que la de Kolmogorov-Smirnov como la de Anderson Darling se emplean sólo para distribuciones continuas (Grau, 1994).

### 2.14.2. Prueba $X^2$ Distribución Normal

Esta prueba se usa cuando se quiere probar la hipótesis de que unos datos muestrales provienen de una determinada distribución. La prueba chi cuadrado se basa en la comparación entre la frecuencia observada en un intervalo de clase y la frecuencia esperada en dicho intervalo, calculada de acuerdo con la hipótesis nula formulada. Es decir, se quiere determinar si las frecuencias observadas en la muestra están lo suficientemente cerca de las frecuencias esperadas bajo la hipótesis nula (Grau, 1994).

### 2.14.3. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Las Pruebas de kolmogorov-smirnov son pruebas no paramétricas para diferentes entre distribuciones acumulativa observada, las pruebas de una muestra se refieren de acuerdo entre una distribución acumulativa observada, o empírica, valores muestrales y de una función de distribución continua especificada; por lo tanto, es una prueba de bondad de ajuste, la prueba de dos muestras se refiere al acuerdo entre dos distribuciones acumulativas observadas; prueba de hipótesis de si las dos muestras independientes proceden de distribuciones continuas idénticas, y es sensible a diferencias de la población respecto a su ubicación, dispersión o sesgadura.

La Prueba de kolmogorov-smirnov es generalmente más eficiente que la prueba ji cuadrada para bondad de ajuste de muestras pequeñas y puede servir para muestras muy pequeñas en las que no se aplica la prueba de ji cuadrada. Deben recordarse, sin embargo, que a diferencia de la prueba de kolmogorov-smirnov, la prueba de ji cuadrada de la selección 9.6 si se puede usar en relación con distribuciones discretas.

La prueba de una muestra se basa en la diferencia máxima absoluta  $D$  entre los valores de la distribución acumulativa empírica de una muestra aleatoria de tamaño  $n$  y una distribución acumulativa teórica especificada, para determinar si esta diferencia

es mayor de lo que razonablemente podría esperar un nivel dado de significación (Grau, 1994).

#### **2.14.4. Prueba de Anderson-Darling**

La última estadística de adaptación que se puede usar con datos de muestra continuos es la Anderson-Darling, que se define como la estadística K-S, la A-D no requiere el establecimiento de compartimentos, pero a diferencia de la estadística K-S, que se enfoca en el medio de la distribución, la estadística A-D destaca las diferencias entre los extremos de la distribución adaptada y los datos de entrada. El test Anderson-Darling determina si los datos vienen de una distribución específica. La fórmula para el estadístico A determina si los datos (observar que los datos se deben ordenar) vienen de una distribución con función acumulativa  $FA2 = -N - S$  donde el estadístico de la prueba se puede entonces comparar contra las distribuciones del estadístico de prueba (dependiendo que F se utiliza) para determinar el P-valor (Grau, 1994).

### **2.15. Pruebas de hipótesis**

Una manera de hacer inferencia es haciendo una afirmación acerca del valor que el parámetro de la población bajo estudio puede tomar. Esta afirmación puede estar basada en alguna creencia o experiencia pasada que será contrastada con la evidencia que nosotros obtengamos a través de la información contenida en la muestra. Esto es a lo que llamamos prueba de hipótesis. Una prueba de hipótesis comprende cuatro componentes principales:

- Hipótesis Nula
- Hipótesis Alternativa
- Estadística de Prueba
- Región de Rechazo

La Hipótesis Nula, denotada como  $H_0$  siempre especifica un solo valor del parámetro de la población si la hipótesis es simple o un conjunto de valores si es compuesta (es lo que queremos desacreditar).

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_0 : \mu \leq \mu_0$$

$$H_0 : \mu \geq \mu_0$$

La Hipótesis Alternativa, denotada como H1 es la que responde nuestra pregunta, la que se establece en base a la evidencia que tenemos. Puede tener cuatro formas:

$$\begin{array}{ll} H_1 : \mu = \mu_1 & H_1 : \mu > \mu_0 \\ H_1 : \mu < \mu_0 & H_1 : \mu \neq \mu_0 \end{array}$$

Como las conclusiones a las que lleguemos se basan en una muestra, hay posibilidades de que nos equivoquemos. Dos decisiones correctas son posibles: rechazar H0 cuando es falsa y no rechazar H0 cuando es verdadera.

Dos decisiones incorrectas son posibles: rechazar H0 cuando es verdadera y no Rechazar H0 cuando es falsa (Cedeña et al., 1993).

### 2.15.1. Pasos a Seguir en la construcción de una prueba de Hipótesis

- Formulación de la hipótesis nula y alternativa: las dos hipótesis en que se dividen los posibles estados de la naturaleza y de las cuales vamos a escoger una como la que realmente es cierta, reciben el nombre de hipótesis nula y alternativa. La hipótesis nula (H0), es la que contiene el signo de igualdad. La hipótesis alternativa (H1), es la hipótesis que deberá ser aceptada si (H0) es rechazada, representa la hipótesis de la investigación. Planteamiento de las hipótesis para la media:

|                         |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $(H_0): \mu \leq \mu_0$ | $(H_0): \mu \geq \mu_0$ | $(H_0): \mu = \mu_0$    |
| $(H_1): \mu > \mu_0$    | $(H_1): \mu < \mu_0$    | $(H_1): \mu \neq \mu_0$ |

Elección del nivel de significación: Nivel de significación de la prueba o dícima es la probabilidad máxima con que deseáramos arriesgarnos a un error de tipo I.

En la práctica es muy común seleccionar un nivel de significación de 0,05 o de 0,01 aunque se pueden usar otros valores. Si se usa un 5% al diseñar una prueba de hipótesis, entonces hay alrededor de 5 oportunidades entre 100 de que rechacemos la hipótesis nula cuando esta debe ser aceptada, es decir tenemos el 95 % de confianza de haber tomado la decisión correcta. En tal caso decimos que la hipótesis ha sido rechazada a un nivel de significación del 0,05; lo que significa que podemos estar equivocados con una probabilidad de 0,05.

- Selección del estadígrafo de prueba (Según Parámetro a realizar la prueba).
- Determinación del valor crítico (C): La distribución de nuestros datos se dividen en dos partes la región de rechazo y la región de no rechazo estando separadas por un valor crítico (C), y su determinación dependerá del tamaño de la región de rechazo y esta a su vez de la probabilidad de cometer el error de tipo I.
- Formulación de la regla de decisión: La regla que se formula a parte del valor crítico calculado. Para el primer caso: Se rechaza ( $H_0$ ) para todo valor del estadígrafo de prueba que sea mayor que C y se acepta para todo valor del estadístico de prueba que sea menor o igual que C. Para el segundo caso: Se rechaza ( $H_0$ ) para todo valor del estadígrafo de prueba que sea menor que C y se acepta para todo valor del estadístico de prueba que sea mayor o igual que C. Para el tercer caso, bilateral o de dos colas: Se rechaza ( $H_0$ ) para todo valor del estadígrafo de prueba que sea menor que  $C_1$  o mayor que  $C_2$  y se acepta para todo valor del estadístico de prueba esté comprendido entre  $C_1$  y  $C_2$ .
- Toma de decisión: La decisión se toma utilizando el estadígrafo de prueba que nos facilitó la muestra y si el mismo cae en la región crítica se rechaza ( $H_0$ ) y por tanto se acepta ( $H_1$ ); si cae en la región de no rechazo (de aceptación) no existen elementos para rechazar ( $H_0$ ) (Zar, 1999).

## 2.16. Validación de los modelos de simulación

La Verificación y validación tienen que ver con la determinación de si un modelo y sus resultados son "correctas" para un uso o propósito específico. Formalmente, la verificación del modelo se define como "asegurar que el programa informático del

Modelo computarizado y su aplicación son correctas" (Oberkampff & Roy, 2010), y la validación del modelo se define como la "comprobación de que un modelo computarizado dentro de su ámbito de aplicación posee un rango satisfactorio de precisión ajustado a la aplicación del modelo destinado" (Sargent, 2013).

Es importante llevar a cabo la verificación y validación de un modelo de simulación enfocándonos al propósito del modelo. Si el propósito de un modelo de simulación es para responder a una variedad de preguntas, la validez del modelo se debe determinar con respecto a cada pregunta. Los desarrolladores y los usuarios de los modelos de simulación, los encargados de tomar decisiones utilizando la información obtenida de los resultados de estos modelos, y las personas afectadas por las decisiones basadas en esos modelos están justamente preocupados por si el modelo y sus resultados son "correctos" para cada pregunta que el modelo pretende responder (Sargent, 2011).

Numerosos conjuntos de condiciones experimentales se requieren generalmente para definir el dominio de aplicabilidad de un modelo destinado (un conjunto de condiciones experimentales contienen un conjunto de valores para el conjunto de variables que definen el dominio de aplicabilidad). Un modelo puede ser válido para un conjunto de condiciones experimentales y no válido en otro. Un modelo se considera válido para un conjunto de condiciones experimentales si la exactitud del modelo se encuentra dentro de su rango aceptable de precisión, que es la precisión requerida del modelo para su uso previsto. El rango de un modelo aceptable de precisión se debe especificar antes de iniciar el desarrollo del modelo o muy temprano en el proceso de desarrollo del modelo. Varias versiones de un modelo suelen ser desarrollados antes de obtener un modelo válido satisfactorio. La comprobación de que un modelo es válido, es decir, realizar la verificación y la validación de modelo, se considera generalmente que es un proceso y es normalmente parte de la totalidad del proceso de desarrollo del modelo (Banks et al., 2010).

## **2.17. Estudios previos**

En esta sección se abordan tres artículos relacionados con la aplicación de la simulación en industrias manufactureras para determinar los cuellos de botella en el flujo productivo de las organizaciones estudiadas y las áreas de oportunidad para buscar proyectos de optimización de procesos.

### **2.17.1. Aplicación de la metodología de simulación para sincronizar el flujo del producto en una planta tipo a con componentes compartidos por medio de la TOC**

Este artículo presenta la aplicación de la metodología de simulación propuesta por Law y Kelton para construir dos modelos de una planta tipo A con componentes compartidos. Según los resultados obtenidos, el modelo que opera bajo los conceptos de costos estándar obtiene un valor mayor en el número de piezas promedio que el modelo del enfoque TAC. El tiempo de permanencia en el sistema fue menor para el modelo del enfoque TAC. El número de unidades producidas, el dinero generado por las ventas y la utilidad neta conseguida, fueron similares en ambos modelos, pero el retorno sobre la inversión fue mayor con el modelo que emplea el sistema TAC.

#### **Metodología de simulación: modelo CE.**

Las etapas que se llevaron a cabo y que resumen la metodología de Law y Kelton (2000) para la construcción del modelo funcionando de acuerdo al enfoque de costos estándar son:

- **Etap 1: Formulación del problema.** En esta etapa se identificaron los objetivos del estudio: obtener un modelo de simulación de una planta A con componentes compartidos, generado en el programa computacional ProModel, que reflejará las problemáticas de un sistema real que opera sus recursos de acuerdo al sistema de costos estándar.
- **Etap 2: Recolección de datos y definición del sistema a simular.** En esta etapa se definieron las particularidades y las medidas de desempeño a evaluar del modelo de la planta tipo A que se decidió simular.
- **Etap 3: Verificación del modelo conceptual.** La verificación consistió en asegurarse que las suposiciones a emplear para construir el modelo fueran correctas y representativas de las plantas tipo A con componentes compartidos.

- **Etapas 4: Construcción y validación de los programas.** Para cumplir con la primera parte de esta etapa: construcción; se generó el modelo de simulación para reproducir la producción bajo estudio. En este modelo se controló la producción mediante el enfoque tradicional en el cual se buscó la máxima eficiencia de cada centro de trabajo. Para la creación del modelo se empleó el software de simulación profesional ProModel.
- **Etapas 5 y 6: Corridas piloto y diseño de experimentos.** El número de corridas piloto es arbitrario y para este estudio de simulación se realizaron doce corridas independientes. La ecuación 1, que se empleó para calcular el número óptimo de corridas, utiliza la varianza de las corridas piloto y un error estimado llamado Beta (b). La Beta, que es el máximo error absoluto que se puede permitir de la medida de desempeño (Law y Kelton, 2000), se fijó en este estudio en 6. El valor (1-a) es el nivel de confianza que se desea; para obtener un valor en la tabla t-student, en este estudio el nivel de confianza se precisó en 0.95.
- **Etapas 7: Análisis de resultados.** Tomando en cuenta el resultado obtenido en el diseño de experimentos, tanto el modelo original (Costos estándar) como el sincronizado (aplicando la metodología propuesta), se corrieron 21 veces. De esas corridas, se obtuvieron y compararon los resultados que se presentan en la sección VI, con el fin de identificar el mejor sistema de administración. Por medio del software ProModel fue posible, además de construir el modelo CE, probar las alternativas que condujeran a sincronizar el flujo de materiales y a desarrollar una metodología basada en los principios del sistema logístico TAC.

### **Conclusiones.**

El modelo operando bajo el sistema logístico TAC, que tiene incorporada la metodología propuesta por los autores, proporciona mejores resultados que los obtenidos por el modelo operando bajo los principios de costos estándar. Esto se manifiesta en los indicadores financieros de TOC: Inventario, Retorno sobre la inversión y Flujo de Efectivo, y también en otras medidas importantes: Número de piezas promedio en el sistema, Tiempo promedio de las piezas en el sistema y Porcentaje de utilización de cada recurso. El uso de la simulación permitió evaluar

varias alternativas en los modelos y reforzar la metodología diseñada para implantar el sistema TAC. Aunque el flujo de materiales en las plantas tipo A con componentes compartidos es complejo, es posible ejercer un control efectivo considerando los recursos que controlan el sistema (CB) y de esta manera establecer la liberación de materiales (Ortiz & Gomez, 2007),

### **2.17.2. Aplicación de simulación para incrementar la productividad de la empresa “La Vieja Molienda de Santa Maty”**

En el presente artículo mostramos la utilización de la simulación como una herramienta para el mejoramiento de la productividad en el Trapiche “La Vieja Molienda de Santa Maty”, dedicado a la fabricación de piloncillos en diferentes presentaciones, ubicado en Tezonapa, Veracruz, México. Dicha empresa presenta diversos problemas de producción debido a la deficiencia en los métodos de trabajo, utilización de máquinas y recursos. A través de la simulación, utilizando el software Plant Simulation®, se realizó un modelo representativo del sistema real del proceso de producción del piloncillo cuadrado de 500 gramos, y a partir de ese modelo se hizo un análisis de las máquinas y los recursos disponibles en la empresa para proponer alternativas que incrementen la productividad a través del mejoramiento en los métodos de trabajo. Con ello se modificó el modelo existente para evaluar los resultados y dictaminar si ayudan a incrementar la productividad y la rentabilidad de la empresa.

A lo largo de este artículo describimos la aplicación de la metodología de simulación propuesta por Law y Kelton (2000), que incluye: definición del problema, recolección y análisis estadístico de los datos del sistema, determinación de medidas de desempeño a evaluar, construcción del modelo de simulación (en nuestro caso haciendo uso de Plant Simulation) verificación y validación del modelo, diseño de experimentos para determinar el número óptimo de corridas, el análisis de resultados y análisis de las alternativas que se proponen. Finalmente presentamos nuestras conclusiones y recomendaciones.

**Plant Simulation:** es una aplicación de computadora desarrollada por Siemens PLM Software. Es una herramienta de simulación de eventos discretos que simula, analiza, visualiza, optimiza y ayuda a crear modelos digitales de diversos sistemas.

#### **Aplicación de la metodología de simulación.**

- **Formulación del problema:** Debido a que la empresa de elaboración del piconcillo tiene poco tiempo operando, presenta diversos problemas de producción a causa de la deficiencia en sus métodos de trabajo y en la utilización de máquinas y recursos, por lo que el objetivo del estudio de simulación fue la búsqueda de alternativas de mejora que le permitan incrementar su productividad y lograr un posicionamiento en el mercado de manera que sea competitiva en el ámbito industrial.
- **Recolección de datos:** La toma de datos empezó en el mes de mayo de 2010 y concluyó en junio de 2010 debido a la culminación del periodo de zafra. Posteriormente esta actividad se retomó por otros tres meses comenzando en el mes de diciembre del mismo año.
- **Validación de los datos:** Para el análisis estadístico de los tiempos de servicio reales en cada proceso, se utilizó el objeto de ajuste de datos llamado Stat:Fit que se encuentra en las herramientas estadísticas dentro del software Plant Simulation. Se aplicaron las pruebas de bondad y ajuste Chi Cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling a todos los datos recolectados, con el propósito de conocer si éstos se ajustaban a una distribución teórica específica con un nivel de significancia definido del 5 %.
- **Construcción del modelo de simulación:** se elaboró un layout de la empresa con ayuda del software Google SketchUp © con el propósito de identificar cada una de las áreas que conforman la empresa. Posteriormente se construyó un modelo de simulación en Plant Simulation® representando la situación actual del proceso de producción de la planta.
- **Verificación del modelo de simulación:** Para realizar la verificación del modelo en Plant Simulation, se utilizó la opción Debug, con esto es posible visualizar si existe un comportamiento inadecuado y así corregirlo a tiempo.

- **Validación del modelo de simulación:** Con el propósito de determinar si el modelo de simulación elaborado del proceso de elaboración de piloncillo es una representación adecuada del sistema real desarrollamos una prueba estadística.
- **Análisis de resultados del modelo de simulación actual:** se llevó a cabo el análisis e interpretación de resultados, de los cuales se observa que el tiempo total de producción por día es de 15.5 horas con una desviación estándar de 0.036 horas. Con esto es posible producir una cantidad de 1560 kilogramos de piloncillos por día, lo que equivale a 3120 panelas cuadradas con un peso de 500 gramos cada una.
- **Alternativas de mejora:** Se establecieron siete alternativas para analizar la mejora en el proceso de producción de la empresa, las cuales se evaluaron mediante la construcción de un nuevo modelo construido a partir del modelo actual, el cual incluye todas las alternativas evaluadas.
  - Alternativa 1: Estandarización de los parámetros de calidad en las etapas de clarificación, evaporación y concentración.
  - Alternativa 2: Implementación de un par de coladeras fijas en el área de pre limpieza.
  - Alternativa 3: Incorporación de una cortadora de caña en el proceso.
  - Alternativa 4: Introducción de una banda transportadora para el bagazo.
  - Alternativa 5: Asignación de un solo operario en el área de moldeo, secado, desmolde y empaque.
  - Alternativa 6: Incorporación de una segunda línea de producción
  - Alternativa 7: Reasignación de la hora de comida para los trabajadores considerando las alternativas que se proponen.

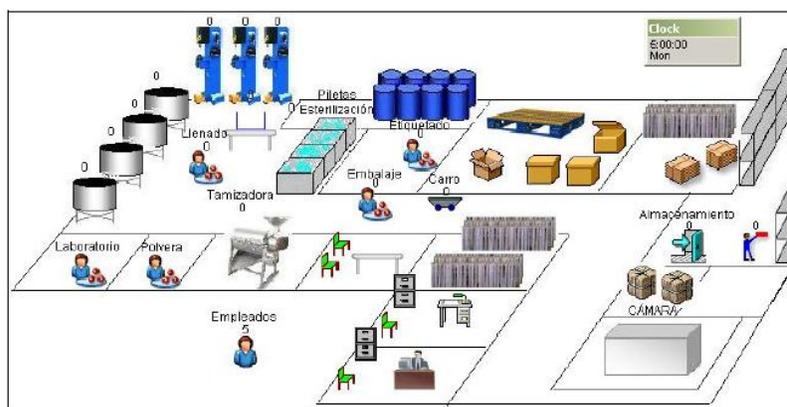
Al realizar los análisis y evaluar estas mejoras en el modelo de simulación fue posible determinar que sí hubo una enorme mejoría al incrementar la productividad a un 150% adicional a lo que se produce actualmente, es decir, se incrementó la cantidad de piloncillos de 3120 a 7800, con lo cual se corrobora que la aplicación de las alternativas propuestas tiene un beneficio altamente significativo para el trapiche.

Por lo que concierne al análisis económico de la empresa, éste resultó positivo en los cuatro métodos de evaluación de proyectos de inversión que se aplicaron, ya que con una inversión total de \$771,702 incluyendo todas las alternativas, se generará una ganancia para el primer año de \$1,769,280, una de \$928,872 para los próximos tres años y de \$1,309,572 para el quinto año, adicionales a la que ya se tiene con el modelo actual de \$703,134, lo cual representa un aumento considerable en las utilidades de la empresa. Con estos flujos de efectivo se obtuvo un VPN de \$3,846,305, una TIR del 192 %, y un período de recuperación de la inversión de 5.65 meses. Además, concluimos que con un 6.0, el índice de rentabilidad reafirmó la rentabilidad del proyecto (Lozada et al., 2011).

### **2.17.3. Modelos de simulación para el estudio de empresas productivas**

En este trabajo se estudia el comportamiento de dos sistemas productivos diferentes: una Fábrica de Pulpas de Frutas y una Planta Metalmecánica que utiliza un Sistema de Manufactura Flexible (FMS). El estudio se realiza por medio de una técnica de simulación, utilizando el software SIMUL8. En primer lugar, se desarrollan modelos básicos de simulación para cada caso, y a partir de éstos se plantean diferentes alternativas de trabajo dentro de los establecimientos productivos. Analizando los resultados obtenidos, se infiere que los modelos de simulación reproducen los sistemas reales de producción, y por consiguiente resulta una herramienta de gran utilidad para efectuar un estudio detallado tanto de la capacidad, como estimación de los tiempos de producción.

En la Figura 2.5., se muestra el modelo desarrollado en SIMUL8; seguidamente se presentan las hipótesis que se consideraron para su construcción, y luego se describe su funcionamiento.



**Figura 2.5.** Modelo de Simulación con SIMUL8 (Quiroga et al., 2009).

## Conclusiones.

Los beneficios globales que los modelos de simulación para FMS desarrollados proporcionan pueden resumirse de la siguiente manera:

- Permite estudiar y experimentar con FMS reales, en aplicaciones a casos complejos de la industria. Proporciona una evaluación del funcionamiento de FMS, para los cuales es muy complejo hallar soluciones óptimas a partir de modelos matemáticos.
- Posibilita evaluar parámetros de desempeño de FMS reales o ficticios, por ejemplo: utilización de las máquinas, tiempo ocioso de las mismas, tiempo total de fabricación makespan, tiempo de permanencia en el FMS de cada pieza.
- Permite establecer tiempos de setup en las máquinas, como así también costos por unidad procesada y por tiempo de procesamiento de cada máquina, y tiempos de movimientos de partes entre máquinas distintas de cero, y con esto evaluar el sistema frente a estas consideraciones.
- Posibilita realizar análisis de sensibilidad, para determinar en qué medida influye la variación de determinadas variables del sistema, en la función objetivo del mismo. Es decir, se pueden simular cambios y observar así los efectos que éstos producen sobre la conducta del FMS.
- Minimiza los errores en la toma de decisiones, al contar con una herramienta que permite realizar el análisis del funcionamiento y la evaluación del diseño del FMS, ya que implica realizar grandes inversiones de capital en lo que respecta a la instalación y el funcionamiento.

Asimismo, el caso de los modelos de simulación formulados para el análisis del funcionamiento de una Fábrica de Pulpas de Frutas ha permitido plantear diferentes alternativas de trabajo dentro del establecimiento productivo. Al analizar los resultados obtenidos, las conclusiones son las detalladas a continuación:

- El modelo de simulación reproduce el sistema real, y por consiguiente responde al funcionamiento del mismo.
- Teniendo en cuenta la variabilidad de la demanda, resulta una herramienta de gran utilidad para efectuar un estudio detallado tanto de la capacidad, como de la estimación de los tiempos de producción.
- Se verifica que maximizando la utilización del equipamiento de producción, para el caso de la fabricación de latas de 5 kilos de pulpas de frutas, resulta suficiente la mano de obra.
- Por otro lado, si se fabrican latas de 1 kg., el requerimiento de mano de obra resulta ser mayor, por lo tanto, se pueden evaluar las máximas cantidades o las más convenientes, en estos casos.
- Cada uno de los casos estudiados puede adaptarse para el estudio de otras situaciones particulares, modificando el tamaño de las latas elaboradas, los rendimientos por olla, los tiempos de elaboración, etc.
- La capacidad máxima de producción supera ampliamente los niveles actuales requeridos, por consiguiente el establecimiento está en condiciones de enfrentar importantes aumentos en su producción (Quiroga et al., 2009).

#### **2.17.4. Análisis comparativo de estudios previos**

En la tabla 2.1., se realiza un análisis comparativo de los estudios previos que se incluyeron como parte del marco de referencia:

| Parámetro                       | Estudio previo 1  | Estudio previo 2  | Estudio previo 3   |
|---------------------------------|---|---|--|
| Software de Simulación          | Promodel  | Tecnomatix Plant Simulation   | Simul8   |
| Lugar de Aplicación             | Maquiladora   | Empresa productora de piloncillo  | Fábrica de Pulpas de Frutas y una Planta Metalmeccánica  |
| Propuesta Metodológica          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Formulación del problema.</li> <li>2.- Recolección de datos y definición del sistema.</li> <li>3.- Verificación del modelo conceptual.</li> <li>4.- Construcción y validación de los programas.</li> <li>5.- Corridos piloto.</li> <li>6.- Diseño de experimentos.</li> <li>7.- Análisis de los resultados.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Formulación del problema.</li> <li>2.- Recolección de datos.</li> <li>3.- Validación de datos.</li> <li>4.- Construcción del modelo de simulación.</li> <li>5.- Verificación del modelo de simulación.</li> <li>6.- Validación del modelo de simulación.</li> <li>7.- Análisis de los resultados.</li> <li>8.- Alternativas de mejoras.</li> </ol> | No se especifica de manera clara la metodología.   |
| Conclusiones                    | El modelo operando bajo el sistema logístico TAC, proporciona mejores resultados que los obtenidos por el modelo operando bajo los principios de costos estándar.   | La productividad aumento 150%, VPN de \$3,846,305, TIR del 192%, recuperación de la inversión de 5.65 meses e índice de rentabilidad de 6.0.  | Permite estudiar y experimentar con FMS reales, en aplicaciones a casos complejos de la industria, Posibilita evaluar parámetros de desempeño de FMS reales o ficticios, permite establecer tiempos de setup en las máquinas, posibilita realizar análisis de sensibilidad, minimiza los errores en la toma de decisiones. |
| Principal aportación para tesis | Metodología de simulación utilizando Promodel.  | Excelente presentación de resultados y añade paso 8 a metodología.  | Análisis de setup de maquinas y aplicación en plantas reales.  |

**Tabla 2.1.** Análisis comparativo de estudios previos.

Para la elaboración del diagnóstico de flujo se utilizara el software ProModel (estudio previo 1) debido a que cumple con los requerimientos para realizar modelos complejos de sistemas productivos reales, se cuenta con conocimientos avanzados en la utilización de este paquete y se tiene disponible una versión completa del software (sin restricciones en cuanto al número de elementos) e incluye la herramienta Stat:Fit (utilizada para pruebas de bondad de ajuste).

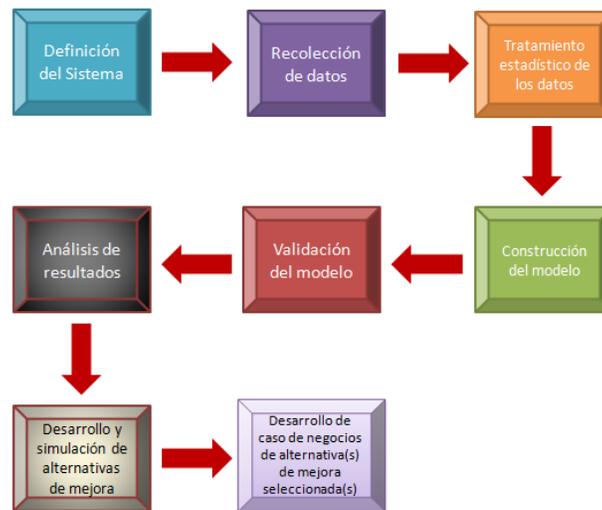
### **3. METODOLOGÍA**

La revisión literaria realizada en el capítulo 2 nos proporcionó una propuesta metodológica que surge de la síntesis de las metodologías utilizadas en los 3 estudios previos que fueron analizados, en la cual se plantean las siguientes etapas: definición del sistema, recolección de datos, tratamiento estadístico de los datos, construcción del modelo de simulación, validación del modelo, análisis de resultados del modelo, desarrollo de alternativas de mejoras, simulación y análisis de las alternativas de mejora y desarrollo de caso de negocios de alternativa propuesta. Adicional, se utilizara un esquema similar de presentación de resultados al que se utilizó en el caso de estudio 2, ya que es el que se adapta de mejor manera al reporte de resultados que la empresa estudiada nos solicitó. Se utilizara el software ProModel versión 4.22 para la elaboración del modelo de simulación, ya que se cuenta con dicha versión y no tiene ninguna limitación para simular sistemas complejos con un gran número de elementos.

La presente investigación es del tipo explicativa ya que estudia la relación causal del cuello de botella en la salida de unidades producidas en el sistema sometido a escrutinio y utiliza diseños experimentales, ya que se manipulan las diferentes variables del modelo de simulación para incrementar el valor de unidades producidas en el sistema.

#### **3.1. Etapas de la metodología**

En la figura 3.1, se describen las etapas de la metodología propuesta para realizar el diagnostico de flujo de la organización sometida a escrutinio utilizando simulación:



**Figura 3.1.** Etapas de la metodología propuesta.

- **Definición del sistema:** se realizará un mapa del proceso productivo del área de ensamble final, considerando las interacciones entre líneas, equipos críticos, acumuladores entre líneas y otros componentes a considerar en la formulación del modelo. Adicional, se describen las diferentes opciones en el producto por línea de vehículo, motor y otros componentes que influyen en los tiempos ciclos en las diferentes líneas de ensamble. A la par se obtienen los datos de capacidad de líneas y acumuladores y se incluyen en el modelo de simulación al igual que los diferentes horarios y turnos de la empresa. En esta sección se plantea capturar la información recabada en ProModel y se vacía en las secciones de entidades y locaciones y proceso. Por último se obtiene el dato de volumen requerido objetivo para el modelo de simulación propuesto.
- **Recolección de los datos:** en primer lugar, se deben clasificar las estaciones de trabajo dependiendo si cuentan con sistema de error proofing (únicamente las estaciones con herramienta eléctrica lo poseen) o si no cuentan con él. En el caso de que se tenga el sistema de error proofing se procederá a tomar 30 muestras de tiempo ciclo en cada estación de trabajo, después se calcula el tamaño de muestra adecuado (nivel de significancia de 0.05 y error permitido 0.1). En el segundo caso, se cronometran 30 muestras de los tiempos ciclos de cada estación de trabajo por cuestiones de disponibilidad de tiempo para la realización de este proyecto.

Posteriormente se requiere obtener el MTBF y MTTR de los equipos y se incluyen en la sección de locaciones en la columna de DTs.

- **Tratamiento estadístico de los datos:** con los datos obtenidos en la etapa anterior, se procede a modelar los datos de cada línea utilizando la herramienta Stat:Fit contenida en el paquete de ProModel 7.0. utilizando pruebas de bondad de ajuste (con un nivel de significancia del 95%) para obtener una distribución de probabilidad para cada línea de ensamble, las cuales se capturan en la sección de llegadas y proceso de nuestro modelo.
- **Construcción del modelo de simulación:** se procede a realizar el modelado del sistema productivo utilizando ProModel 4.22., considerando las diferentes reglas operativas, interacciones entre líneas y acumuladores y los datos recabados en etapas anteriores. En resumen, se procede a definir las variables que se desean monitorear a lo largo de la simulación, los atributos requeridos para simular las diferentes opciones del producto (línea de producto, componentes y otras diferencias relevantes para los tiempos ciclos) y se actualiza dicha información en la sección de procesos.
- **Validación del modelo de simulación:** se revisan los resultados preliminares del modelo utilizando los resultados promedio de 30 réplicas del modelo de simulación, comparándolos con los resultados reales de flujo del sistema sometido a escrutinio y se somete al modelo a modificaciones con la finalidad de comprobar que se comporta de manera similar al modelo real con la finalidad de unificar resultados y poder tomar el modelo como una referencia válida para la propuesta y validación de alternativas de mejora con el objetivo de mejorar el flujo de proceso.
- **Análisis de resultados del modelo:** se procede a analizar la situación actual del sistema utilizando el modelo de simulación con la finalidad de entender los principales cuellos de botella en el sistema y las áreas de oportunidad que conviene robustecer para tener mejoras significativas en los indicadores de flujo de unidades producidas en el sistema. ProModel proporciona un reporte de resultados sumamente completo, para el análisis de cuellos de botella se utiliza la sección de locaciones con la finalidad de identificar los puntos donde se pierde flujo (baja el

número de entradas de una locación en relación a la locación anterior en un número superior a la capacidad de la locación anterior). La razón de la pérdida de flujo puede deberse a cuestiones de tiempo ciclo, reglas operativas, mezcla de productos y otras variables por lo que el análisis debe enfocarse en determinar con exactitud cuál de las variables es la que provoca el cuello de botella en el sistema.

- **Desarrollo y simulación de alternativas de mejora:** se plantean alternativas de mejora para lograr un impacto positivo en los cuellos de botella identificados en etapas anteriores basados en alcanzar el objetivo de volumen de la compañía previamente establecido en la sección de definición del sistema. Para el desarrollo de alternativas de mejora se utilizan técnicas de lluvia de ideas, análisis de factibilidad técnica y factibilidad operativa. La generación de alternativas de mejora dependerá del elemento cuello de botella en el sistema, ya sea estación de trabajo (rebalanceos), equipo (mejorar el programa del robot, mejorar tiempos de setup, etc.) u otro elemento del sistema. Posteriormente se realizan los cambios pertinentes en el modelo de simulación con la finalidad de medir el impacto que tiene cada propuesta en los indicadores de flujo de unidades producidas en el área de ensamble final y se obtienen n cantidad de modelos de simulación dependiendo de las n propuestas de mejora que surgieron de la etapa anterior en la lluvia de ideas del equipo de trabajo y se realiza un análisis de los resultados de cada propuesta para apoyar a la empresa a realizar una correcta asignación de recursos para las propuestas de mejora y se traduce la mejora en los indicadores de flujo en indicadores monetarios. Al final se deberán condensar los resultados del modelo actual con los de los diferentes modelos donde se incluyen las alternativas de mejora y hacer un comparativo para poder tomar la mejor decisión.
- **Desarrollo de caso de negocios de alternativa(s) de mejora seleccionada(s):** En esta etapa se incluye el análisis de factibilidad técnica, económica y operativa de la propuesta de mejora seleccionada y se utiliza la metodología de casos de negocios para plantearle a la empresa la alternativa de mejora seleccionada en la etapa anterior.

## 4. IMPLEMENTACIÓN

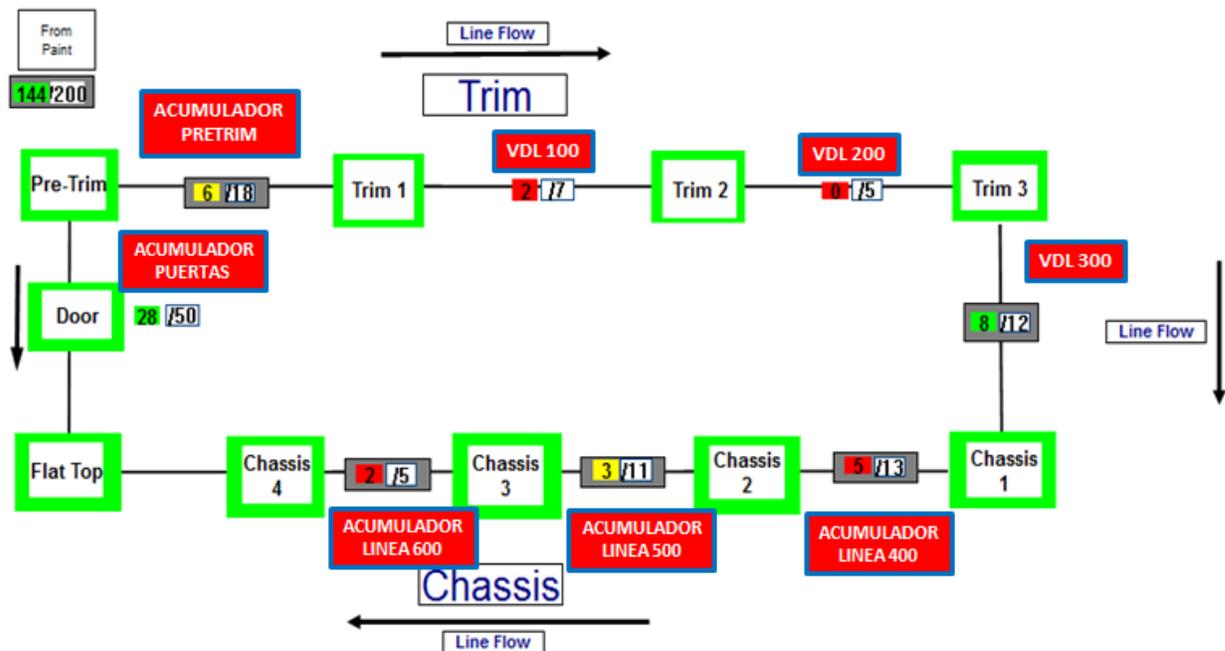
En este capítulo se aplicaran las 9 etapas de la metodología propuesta en el capítulo 3 de este documento con la finalidad de probar su validez en la realización de diagnósticos de flujo y formulación y validación de propuestas de mejora.

### 4.1. Definición del sistema

El área sometida a escrutinio es el área de Ensamble Final y se encuentra ubicada una planta automotriz en la ciudad de Hermosillo. Ensamble Final es el departamento de mayor tamaño y relevancia de esta planta automotriz y constituye el eslabón clave para los objetivos de flujo y entrega de la planta.

Debido a la naturaleza de este proyecto, se requiere analizar cada aspecto que pueda influir en el flujo de unidades a lo largo del sistema de ensamble final, dichos aspectos comprenden desde la composición del sistema, las líneas que lo conforman, acumuladores y sus capacidades, equipos críticos y sus indicadores de disponibilidad (MTBF y MTTR) y otros factores que influyan en los tiempos ciclos de las estaciones como puede ser la mezcla de productos y las diferentes opciones del vehículo.

Tal y como se muestra en la Figura 4.1 el área de Ensamble Final está compuesta por un total de 2 áreas (Trim y Chassis) conformadas por 10 bloques independientes y 8 acumuladores estratégicamente distribuidos. Las capacidades de los acumuladores se muestran en la imagen como denominador de las fracciones que aparecen entre cada línea representando los acumuladores.



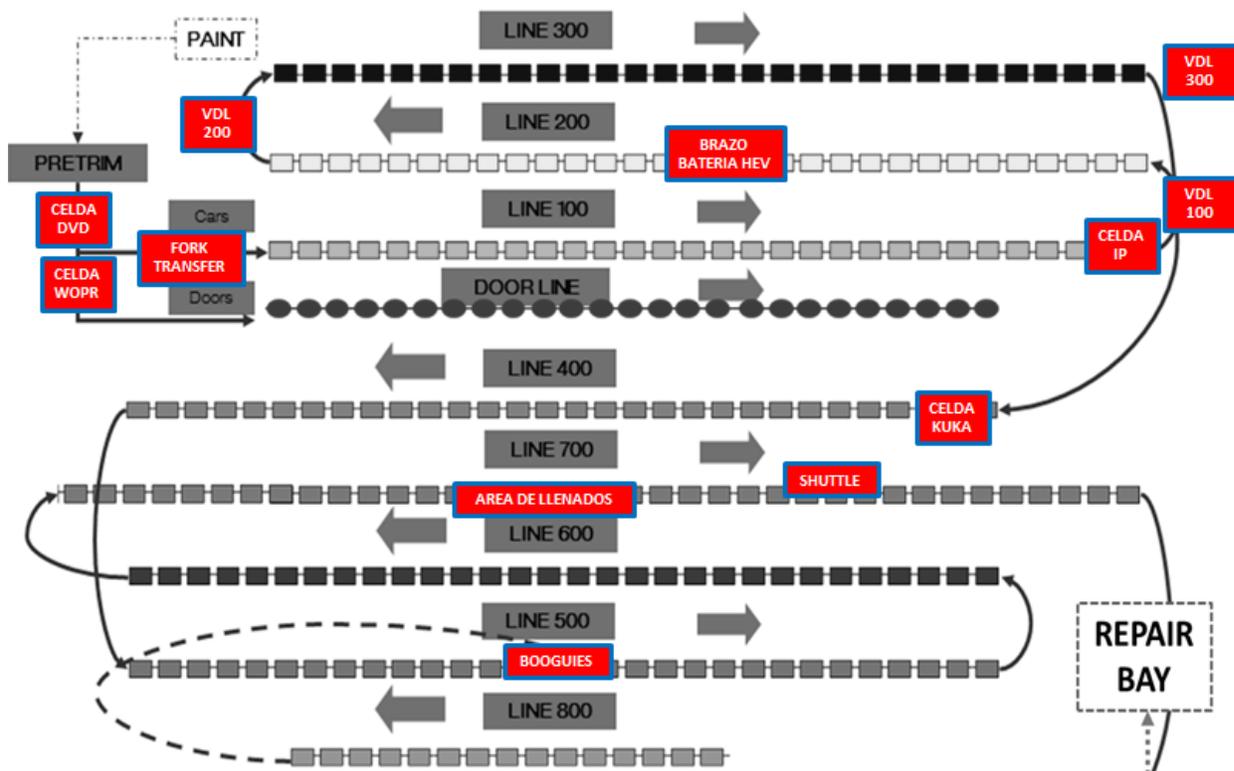
**Figura 4.1.** Distribución del sistema de Ensamble Final.

Las líneas que componen ensamble final son: Pretrim, Línea 100 (Trim 1), Línea 200 (Trim 2), Línea 300 (Trim 3), Línea 400 (Chassis 1), Línea 500 y 800 (Chassis 2), Línea 600 (Chassis 3), Línea 700 (Chassis 4), Flat Top y Línea de Puertas.

Resulta clave mencionar que en la línea de Pretrim se retiran las puertas de la carrocería y se envían a la línea de puertas mientras que la carrocería viaja hacia la línea 100 por la fork transfer, de tal manera que el flujo de la línea de puertas es paralelo al sistema en sí y se entrelaza al inicio del flat top utilizando el comando JOIN dentro del modelo de simulación.

De igual manera los componentes de los motores se ensamblan en la línea 800 y a su vez los motores se ensamblan a las unidades en la estación 513 LH mediante el comando JOIN dentro del modelo de simulación.

Dentro de cada línea existen equipos críticos los cuales se deben incluir en el modelo de simulación debido a que su MTBF y MTTR influyen directamente al resultado de flujo del área completa. En la figura 4.2 se muestran los equipos críticos para el indicador de entrega y su localización dentro del área de ensamble final.



**Figura 4.2.** Equipos críticos del sistema de Ensamble Final.

Por último, 2 factores de vital importancia para los indicadores de flujo y para el tiempo ciclo de las estaciones son la mezcla de productos y las opciones en cuanto a componentes y tipo de vehículo que se tienen en esta planta automotriz y que impactan al área de ensamble final.

Los datos relacionados a la mezcla de producto se toman en cuenta en el modelo de simulación específicamente al momento de rutiar las diferentes opciones del vehículo utilizando atributos y asignarle el tiempo ciclo correspondiente a la opción a cada unidad de cada tipo en cada una de las estaciones de Ensamble Final, sin embargo no se proporcionan estos datos por solicitud de la empresa donde se realizó el estudio.

En la figura 4.3 se muestra como se utilizan atributos (tipo\_vehiculo) para proporcionar la información correspondiente para que el modelo identifique si la unidad es Fusión (1) o MKZ (2) y como esto influye en los diferentes ruteos y tiempos ciclos de las estaciones:

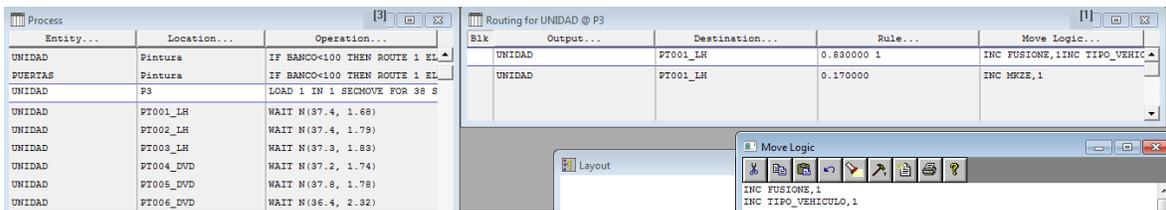


Figura 4.3. Uso de atributos para simular mezcla de productos en Ensamble Final.

En cuanto a las opciones, la figura 4.4 muestra como las opciones afectan la complejidad del sistema y la complejidad de modelar todas estas opciones dentro del modelo de simulación desarrollado para diagnosticar el flujo dentro del área de ensamble final. Debido a la gran variedad de opciones y la confidencialidad solicitada por la empresa, estas opciones se incluyen dentro del modelo sin embargo no se especifican de manera explícita.

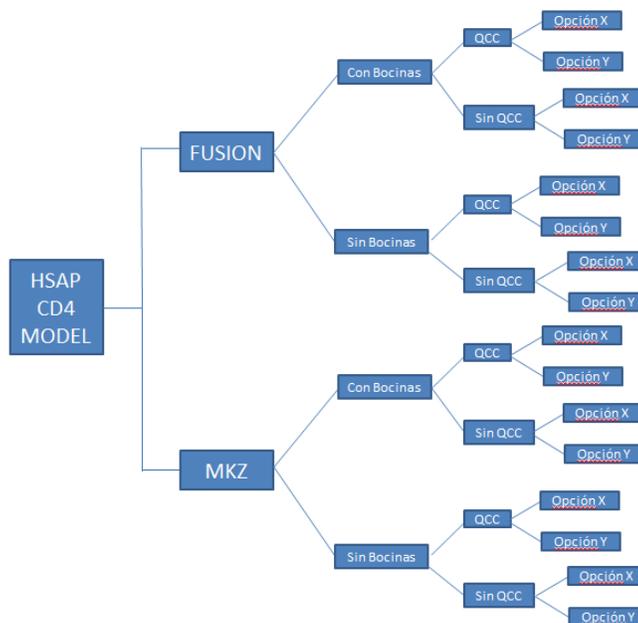


Figura 4.4. Diagrama de mezcla de productos en Ensamble Final.

El objetivo de flujo del sistema se calcula considerando que el objetivo es sacar una unidad cada 50.5 segundos, es decir 71 unidades por hora. En una semana, se tiene un tiempo productivo de 121.833 horas, por lo que se requieren 8650 unidades semanales para cumplir el objetivo.

## 4.2. Recolección de datos

Primeramente se optó por obtener los datos de tiempo ciclo de las estaciones que tuvieran disponible el sistema de error proofing (control de torque) ya que cada ajuste es registrado en el sistema de error proofing y se puede obtener fácilmente el tiempo entre cada ciclo.

En la figura 4.5 se muestra la pantalla general del sistema de error proofing en la cual se selecciona la estación de trabajo de la cual se requiera obtener el tiempo ciclo y el periodo de tiempo que se desea estudiar.

The screenshot displays the 'Error Proofing' software interface. The top navigation bar includes 'Home', 'Station Configuration', 'Reports', 'EP User Management', 'QLS INI Configuration', 'Log Utility', and 'Admin'. The left sidebar lists various report options, with 'Process Status by Station' selected. The main content area is titled 'Process Status by Station' and features a 'Ford' logo. It includes a detailed description of the report, which lists status information for a range of stations, including complete/incomplete status, required vs. failed counts, and the number of successful operations. A 'Note' at the bottom explains that a failed process indicates a job not completed due to multiple attempts. The configuration section on the right allows users to set a 'Start Date' (Jan 21, 2014, 03:26) and an 'End Date' (Jan 22, 2014, 03:26). It also includes dropdown menus for 'Department' (All), 'Team' (All), and 'Station' (All), with a list of station names such as 'A/C BACKUP - 950' and 'A/C REPAIR - 51'. The 'Report Type' section offers 'Detailed' and 'Summary of top Failures' options.

**Figura 4.5.** Sistema de Error Proofing de Ensamble Final.

Posteriormente en la figura 4.6 se muestra el reporte que se obtiene del sistema y mediante análisis de datos obtenemos el tiempo ciclo entre cada unidad producida en dicha estación de trabajo del intervalo de tiempo previamente establecido.

| Date/Time            | Station   | Team | Event Description               | Mode    | Station | W#                | Status   | Required | Success | Failed |
|----------------------|-----------|------|---------------------------------|---------|---------|-------------------|----------|----------|---------|--------|
| 1/21/2014 3:26:10 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4273    | 3LN6L2G9E8R22517  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:26:12 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4273    | 3LN6L2G9E8R22517  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:26:14 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4273    | 3LN6L2G9E8R22517  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:26:54 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4274    | 3FA6PD9XER248381  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:26:54 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4274    | 3FA6PD9XER248381  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:26:57 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4274    | 3FA6PD9XER248381  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:27:59 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4275    | 3FA6P0U6ER266266  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:27:59 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4275    | 3FA6P0U6ER266266  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:28:01 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4275    | 3FA6P0U6ER266266  | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:28:56 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4276    | 3FA6P0K90ER263958 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:28:57 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4276    | 3FA6P0K90ER263958 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:28:59 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4276    | 3FA6P0K90ER263958 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:29:38 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4277    | 3FA6P0H77ER263803 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:29:39 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4277    | 3FA6P0H77ER263803 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:29:39 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4277    | 3FA6P0H77ER263803 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:30:53 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4278    | 3LN6L2L1E819470   | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:30:53 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4278    | 3LN6L2L1E819470   | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:31:25 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4279    | 3FA6P0H79ER263799 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:31:25 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4279    | 3FA6P0H79ER263799 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:31:26 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4279    | 3FA6P0H79ER263799 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:32:19 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCANNE DETALLES MOT CD4..  | ENABLED | 4280    | 3FA6P0H75ER263802 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:32:20 AM | CEA800RW2 | 1    | (PL) SURTIDO DETALLES MOT CD4.. | ENABLED | 4280    | 3FA6P0H75ER263802 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |
| 1/21/2014 3:32:20 AM | CEA800RW2 | 1    | (SC)ISCAN DETALLES TRANS CD4..  | ENABLED | 4280    | 3FA6P0H75ER263802 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      |

Figura 4.6. Reporte de tiempos ciclos de Error Proofing de Ensamble Final.

En total se obtuvieron los tiempos ciclos de 30 unidades en 356 estaciones de trabajo utilizando este sistema y 44 estaciones utilizando cronometraje clásico debido a que estas estaciones no estaban conectadas al sistema de error proofing.

Posteriormente se recopiló la información de los equipos críticos previamente señalados, específicamente los indicadores que repercuten en flujo (MTBF y MTTR). En la figura 4.7 se proporciona un ejemplo del reporte obtenido utilizando el sistema MAXIMO de la compañía y señalando los valores de MTBF y MTTR de la Fork Transfer:

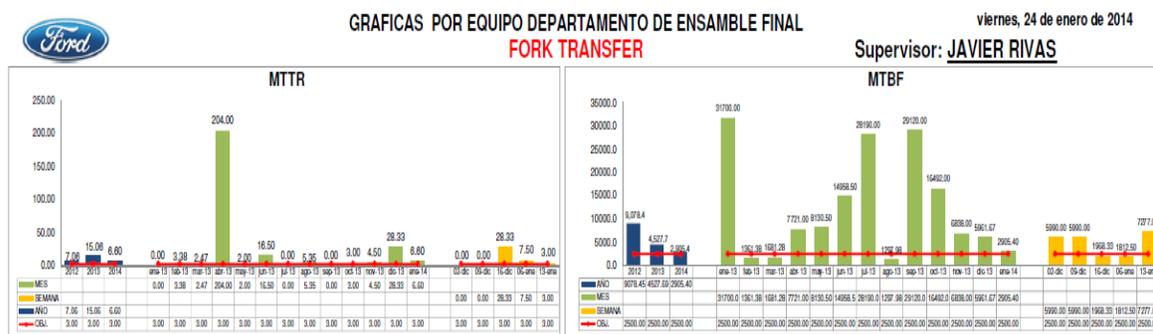


Figura 4.7. Reporte de MTBF y MTTR de equipos críticos de Ensamble Final.

### 4.3. Tratamiento estadístico de los datos

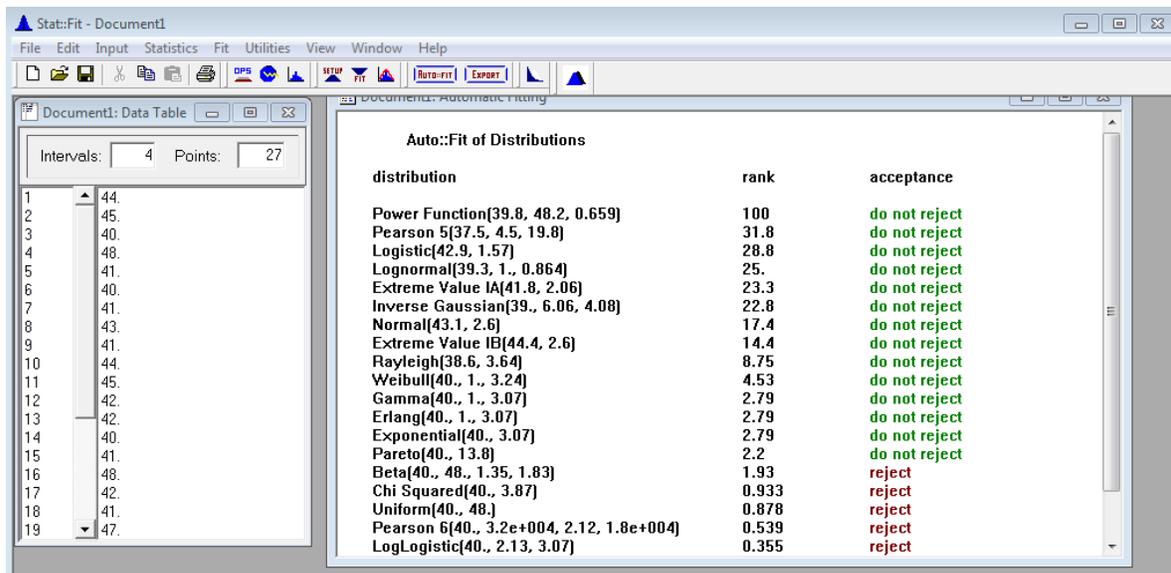
Los datos obtenidos en la etapa de recolección se utilizan en esta sección para obtener distribuciones de probabilidad que representen el comportamiento general de cada centro de trabajo, equipo, cadena transportadora y otros elementos del sistema de manera fidedigna y precisa.

Los datos obtenidos en el sistema de Error Proofing respecto a los tiempos ciclos de las estaciones de trabajo están expresados en segundos (enteros) por lo que los datos obtenidos en el cronometraje fueron expresados en las mismas unidades de tiempo y con la misma precisión tal y como se muestra en la figura 4.8:

| Datestamp        | Station | Team | Element description   | Mode    | Rotatio | YIN               | Status   | Required | Success | Failed |      |
|------------------|---------|------|-----------------------|---------|---------|-------------------|----------|----------|---------|--------|------|
| 14/01/2014 00:10 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6564    | 3FA6P0G73ER250077 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 44.0 |
| 14/01/2014 00:11 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6565    | 3FA6P0LUXER259886 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 45.0 |
| 14/01/2014 00:12 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6566    | 3FA6P0HD8ER261371 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 40.0 |
| 14/01/2014 00:13 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6567    | 3FA6P0H94ER257751 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 48.0 |
| 14/01/2014 00:17 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6568    | 3FA6P0T9XER249029 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:18 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6569    | 3FA6P0H70ER253260 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 40.0 |
| 14/01/2014 00:21 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6570    | 3FA6P0K96ER258439 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:22 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6571    | 3FA6P0G70ER252983 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 43.0 |
| 14/01/2014 00:23 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6572    | 3FA6P0K95ER252034 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:24 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6573    | 3FA6P0K93ER262741 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 44.0 |
| 14/01/2014 00:24 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6574    | 3FA6P0G79ER249791 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 45.0 |
| 14/01/2014 00:25 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6575    | 3FA6P0LU8ER253956 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 42.0 |
| 14/01/2014 00:26 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6576    | 3LN6L2G95ER823236 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 42.0 |
| 14/01/2014 00:27 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6577    | 3FA6P0H71ER252893 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 40.0 |
| 14/01/2014 00:28 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6578    | 3FA6P0T95ER249309 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:29 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6579    | 3FA6P0G76ER249778 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 48.0 |
| 14/01/2014 00:29 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6580    | 3LN6L2G99ER819643 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 42.0 |
| 14/01/2014 00:30 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6581    | 3FA6P0HD6ER261370 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:31 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6582    | 3FA6P0G70ER249789 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 47.0 |
| 14/01/2014 00:32 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6583    | 3FA6P0LU0ER256284 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 46.0 |
| 14/01/2014 00:33 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6584    | 3LN6L2G9XER819991 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 47.0 |
| 14/01/2014 00:34 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6585    | 3FA6P0H77ER249464 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 41.0 |
| 14/01/2014 00:35 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6586    | 3FA6P0K95ER251840 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 45.0 |
| 14/01/2014 00:35 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6587    | 3FA6P0LU7ER253155 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 45.0 |
| 14/01/2014 00:37 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6588    | 3LN6L2G96ER819356 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 44.0 |
| 14/01/2014 00:38 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6589    | 3FA6P0D91ER253128 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 40.0 |
| 14/01/2014 00:39 | TD937LF | 1    | PROCESO NO REQUERIDO. | ENABLED | 6590    | 3FA6P0LU4ER255557 | COMPLETE | 1        | 1       | 0      | 40.0 |

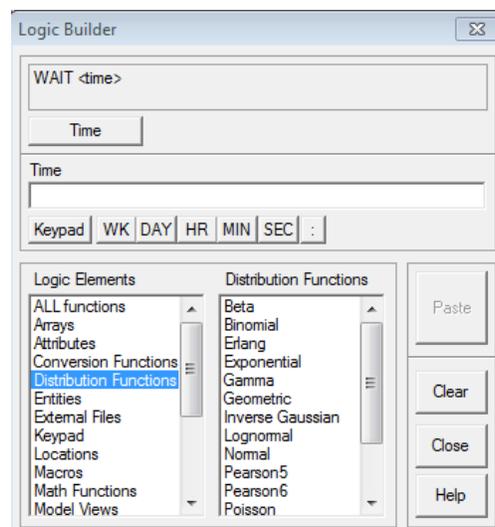
**Figura 4.8.** Reporte de tiempos ciclo de Ensamble Final.

Para el tratamiento estadístico de los datos y el procedimiento de ajuste de datos a distribuciones de probabilidad se utilizó la herramienta Stat:Fit contenida en el paquete del software Promodel 7.0. Los datos se transfirieron a esta herramienta y mediante diferentes pruebas estadísticas de bondad de ajuste (chi cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling) se obtuvieron diferentes opciones de distribuciones de probabilidad y el porcentaje de correlación entre los datos ingresados al sistema y cada una de estas distribuciones, tal y como se muestra en la figura 4.9:



**Figura 4.9.** Reporte de herramienta Stat:Fit de Promodel 7.0.

El siguiente paso consiste en relacionar las distribuciones de probabilidad obtenidas en Stat:Fit y las distribuciones que el software Promodel 4.22 acepta como válidas al momento de asignar tiempos de espera a las diferentes locaciones del modelo en la sección de proceso. Las distribuciones de probabilidad utilizadas en promodel 4.22 son: beta, binomial, erlang, exponencial, gama, geométrica, gauss Inversa, lognormal, normal, pearson5, pearson6, poisson, triangular, uniforme y weibull tal y como se muestra en la figura 4.10:



**Figura 4.10.** Distribuciones de probabilidad utilizadas de Promodel 4.22.

## 4.4. Construcción del modelo de simulación

En esta sección se utiliza la información recabada en las 3 etapas anteriores para construir el modelo de simulación representativo del área de ensamble final de la planta de estampado y ensamble de Ford Motor Company ubicada en Hermosillo, Sonora.

Primeramente definimos las entidades en tránsito que utilizaremos en el modelo de simulación, las cuales se muestran en la figura 4.11:

| Icon | Name    | Speed (fpm) | Stats...    | Notes... |
|------|---------|-------------|-------------|----------|
|      | UNIDAD  | 0           |             |          |
|      | MOTORES | 0           | Time Series |          |
|      | PUERTAS | 0           | Time Series |          |
|      | BODY    | 0           | Time Series |          |

**Figura 4.11.** Sección de entidades del modelo de simulación.

- Unidad: corresponde al ensamble de la carrocería del vehículo productivo y sus correspondientes 4 puertas. Corresponde a la entidad utilizada desde el Pretrim antes de la estación de remoción de puertas y a partir de la estación 731 donde se vuelven a ensamblar las puertas al vehículo.
- Body: corresponde a la carrocería del vehículo sin sus 4 puertas. Esta entidad se utiliza desde la estación de remoción de puertas hasta la estación 731 donde se vuelven a ensamblar las puertas al vehículo.
- Motores: corresponde al ensamble de los diferentes componentes del motor los cuales se conjugan en la línea 800 y se ensamblan a Body en la estación 513 mediante el comando JOIN.
- Puertas: corresponde a las 4 puertas del vehículo, esta entidad se desliga de la entidad unidad mediante el comando UNLOAD (previamente fueron agrupadas con el comando LOAD al inicio de Pretrim) en la estación de remoción de puertas y viajan por la línea 900 hasta la estación 731 donde se vuelven a ensamblar las puertas al vehículo.

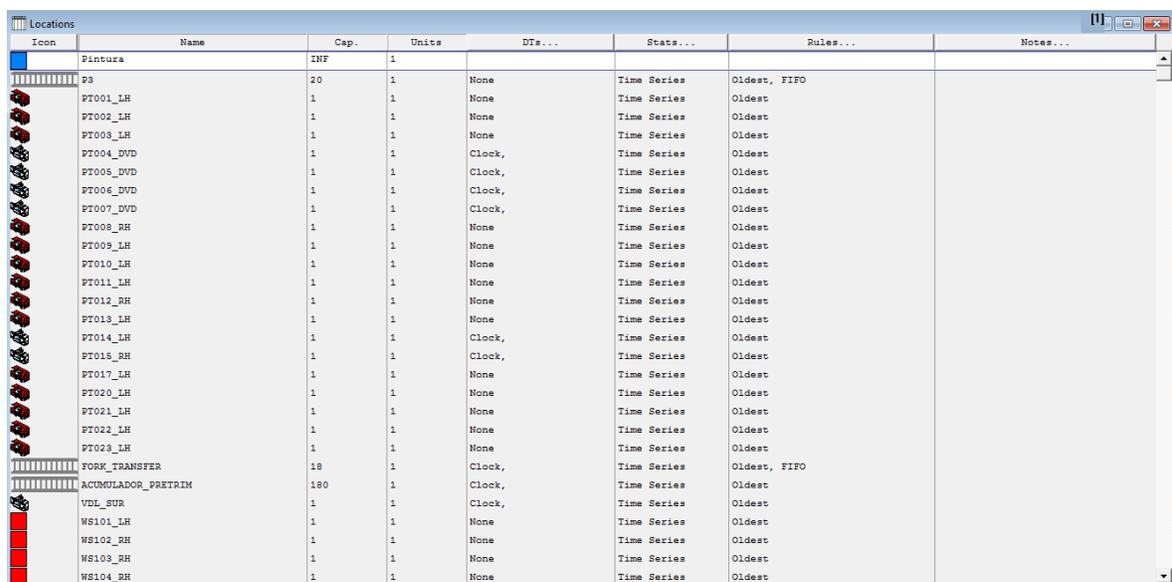
Después de definir las 4 entidades del modelo, se prosigue definiendo las llegadas al sistema de dichas entidades con su ubicación exacta de llegada, frecuencia (obtenida mediante cronometraje en la etapa de recolección de datos y establecida como un tiempo fijo debido a que el abastecimiento por parte del área de pintura se sale del alcance de este proyecto) y cantidad de arribos por evento, tal y como se muestra en la figura 4.12:



| Entity... | Location...      | Qty each... | First Time | Occurrences | Frequency | Logic          | Disable |
|-----------|------------------|-------------|------------|-------------|-----------|----------------|---------|
| UNIDAD    | Pintura          | 1           | 0          | INF         | 35 sec    | INC BANCO,1    | No      |
| MOTORES   | CONVEYOR_MOTORES | 1           | 0          | INF         | 40 sec    | INC BOOGUIES,1 | No      |
| PUERTAS   | Pintura          | 1           | 0          | INF         | 35 sec    | INC BANCO,1    | No      |

**Figura 4.12.** Sección de llegadas del modelo de simulación.

Posteriormente se trabajó la sección de locaciones dentro del modelo de simulación, incluyendo cada estación de trabajo, equipo, cadena transportadora y otros elementos presentes en sistema de ensamble final, tal y como se muestra en la figura 4.13:



| Icon | Name               | Cap. | Units | DTs... | Stats...    | Rules...     | Notes... |
|------|--------------------|------|-------|--------|-------------|--------------|----------|
|      | Pintura            | INF  | 1     |        |             |              |          |
|      | PS                 | 20   | 1     | None   | Time Series | Oldest, FIFO |          |
|      | PT001_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT002_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT003_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT004_DVD          | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT005_DVD          | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT006_DVD          | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT007_DVD          | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT008_RH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT009_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT010_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT011_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT012_RH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT013_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT014_LH           | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT015_RH           | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT017_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT020_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT021_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT022_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | PT023_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | FORK_TRANSFER      | 18   | 1     | Clock, | Time Series | Oldest, FIFO |          |
|      | ACUMULADOR_PRETRIM | 180  | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | VDL_SUR            | 1    | 1     | Clock, | Time Series | Oldest       |          |
|      | WS101_LH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | WS102_RH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | WS103_RH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |
|      | WS104_RH           | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |          |

**Figura 4.13.** Sección de locaciones del modelo de simulación.

En resumen se utilizaron más de 400 locaciones para la construcción del modelo de simulación, las cuales fueron en su mayoría estaciones de trabajo (aproximadamente 90% de las locaciones totales) y el resto se trataron de equipos críticos del sistema de ensamble final, acumuladores y cadena transportadoras.

Dentro de la etapa de locaciones resulta sumamente importante representar los datos de MTBF y MTTR de los equipos críticos en la sección de DTS tal y como se muestra en la figura 4.14:

| Icon | Name      | Cap. | Units | DTS... | Stats...    | Rules...     |
|------|-----------|------|-------|--------|-------------|--------------|
|      | Pintura   | INF  | 1     | None   | Time Series | Oldest       |
|      | P3        | 20   | 1     | None   | Time Series | Oldest, FIFO |
|      | PT001_LH  | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |
|      | PT002_LH  | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |
|      | PT003_LH  | 1    | 1     | None   | Time Series | Oldest       |
|      | PT004_DVD | 1    | 1     |        |             |              |

| Frequency | First Time | Priority | Scheduled... | Logic...   | Disable |
|-----------|------------|----------|--------------|------------|---------|
| 7276 MIN  |            | 99       |              | WAIT 4 MIN |         |

**Figura 4.14.** DTS dentro de la sección de locaciones del modelo de simulación.

La siguiente etapa consistió en definir las variables globales requeridas para la construcción del modelo, indicadores clave de desempeño, variables de depuración del sistema (sirven para descargar locaciones saturadas debido a la excesiva cantidad de entradas que se tienen de las diferentes entidades definidas en el sistema) y otras funciones propias de los modelos de simulación. Las variables del modelo se muestran en la figura 4.15:

| Icon | ID       | Type... | Initial value | Stats...       | Notes... |
|------|----------|---------|---------------|----------------|----------|
|      | FUSIONE  |         | 0             |                |          |
| Yes  | MKZE     | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |
| Yes  | FUSIONS  | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |
| Yes  | MKZS     | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |
| No   | BOOGUIES | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |
| No   | BANCO    | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |
| No   | DOORS    | Integer | 0             | Time Series, 1 |          |

**Figura 4.15.** Sección de variables globales del modelo de simulación.

- **FUSIONE:** esta variable se utiliza para determinar el número de unidades del vehículo Fusion que ingresaron al sistema de ensamble final dentro de nuestro modelo.

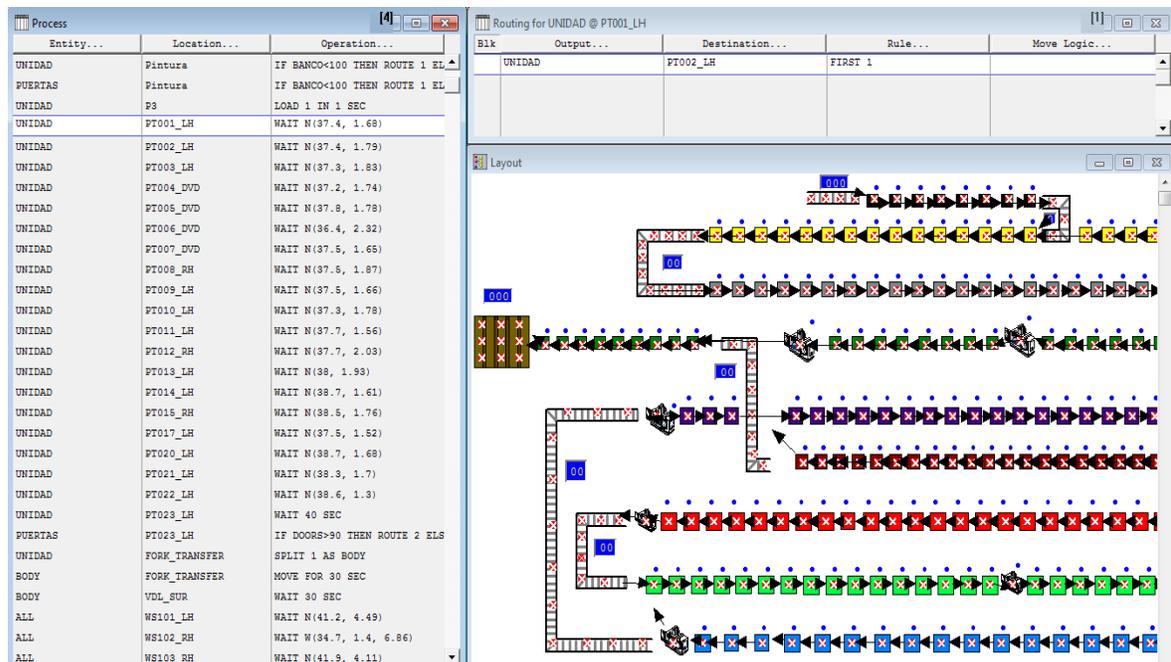
- MKZE: esta variable se utiliza para determinar el número de unidades del vehículo MKZ que ingresaron al sistema de ensamble final dentro de nuestro modelo.
- FUSIONS: esta variable se utiliza para determinar el número de unidades del vehículo Fusion que fueron producidas en el sistema de ensamble final dentro de nuestro modelo.
- MKZS: esta variable se utiliza para determinar el número de unidades del vehículo MKZ que fueron producidas en el sistema de ensamble final dentro de nuestro modelo.
- BOOGUIES: esta variable corresponde a la cantidad de motores que se encuentran en el cadena transportadora de motores del modelo y nos sirve para depurar el número de elementos contenidos en esta locación de manera que nunca sobrepase 10 motores como contenido y nos ayude para que el modelo tenga un procesamiento menos cargado.
- BANCO: esta variable corresponde a la cantidad de unidades que se encuentran en el cadena transportadora inicial del modelo y nos sirve para depurar el número de elementos contenidos en esta locación de manera que nunca sobrepase 100 unidades como contenido y nos ayude para que el modelo tenga un procesamiento menos cargado.
- DOORS: esta variable corresponde a la cantidad de puertas que se encuentran en el cadena transportadora de puertas del modelo y nos sirve para depurar el número de elementos contenidos en esta locación de manera que nunca sobrepase 90 puertas como contenido y nos ayude para que el modelo tenga un procesamiento menos cargado.

Cabe mencionar que los límites de contenidos de las diferentes entidades en las diferentes locaciones del modelo que utilizamos en las variables de depuración del modelo son reglas operativas del sistema de ensamble final establecidas por la compañía en base a estatutos fijados por las oficinas generales de la compañía.

La siguiente etapa corresponde a la definición de atributos del modelo de simulación, los cuales nos ayudan a rutiar las diferentes entidades a las locaciones



Por último en la figura 4.18 se muestra una sección de la etapa de proceso del modelo de simulación:



**Figura 4.18.** Sección de proceso del modelo de simulación.

Los siguientes 3 pasos resulta claves para finalizar la construcción del modelo de simulación:

- Corrección de errores en el modelo de simulación: a diferencia de las simulaciones donde se utiliza lenguaje de programación, Promodel nos despliega mensajes de error señalizando donde se encuentran para corregirlos y poder proseguir a correr el modelo y empezar a ver los resultados.
- Validación de comandos claves: resulta importante validar que los comandos LOAD, UNLOAD, JOIN y otros estén funcionando adecuadamente y nos arrojen los resultados esperados, para esto es necesario hacer evidente la anomalía mediante la utilización de las diferentes entidades previamente definidas en el modelo.
- Definición de parámetros de corrida: es necesario determinar el tiempo que pretendamos que el sistema corra el modelo, número de réplicas, periodo de calentamiento (sirve para llenar el sistema y el modelo comienza a recabar datos después de dicho periodo) y otros parámetros clave.

### 4.5. Validación del modelo de simulación

En esta etapa se corrió el modelo de simulación construido en la etapa anterior utilizando la opción de Promodel para realizar 30 réplicas del modelo y obtener los resultados promedio de estas réplicas, así como algunos parámetros estadísticos como la desviación estándar, la media y los intervalos utilizando niveles de confianza del 90, 95 y 99% tal y como se muestra en la figura 4.19:

| LOCATIONS     |                 |          |               |                           |                  |                  |                  |                      |
|---------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| Location Name | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % util               |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.70                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 1)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.68                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 2)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.63                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 3)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.72                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 4)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.65                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 5)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.60                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 6)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.70                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 7)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.67                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 8)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.63                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 9)         |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.68                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 10)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.69                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 11)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.71                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 12)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.78                    | 48.31            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 13)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.71                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 14)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.70                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 15)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.69                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 16)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.72                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 17)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.67                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 18)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.65                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 19)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.75                    | 48.31            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 20)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.67                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 21)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.80                    | 48.31            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 22)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.70                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 23)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.69                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 24)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.73                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 25)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.79                    | 48.31            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 26)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.65                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 27)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.65                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 28)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.71                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 29)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.70                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Rep 30)        |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.69                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (Average)       |
| Pintura       | 5.78            | 0        | 0             | 0.04                      | 0.00             | 0                | 0                | 0.00 (Std. Dev.)     |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.68                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (90% C.I. Low)  |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.71                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (90% C.I. High) |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.68                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (95% C.I. Low)  |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.71                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (95% C.I. High) |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.67                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (99% C.I. Low)  |
| Pintura       | 121.83          | 999999   | 25113         | 843.72                    | 48.30            | 50               | 49               | 0.00 (99% C.I. High) |

Figura 4.19. Reporte del modelo de simulación en Promodel.

Para validar el modelo de simulación procederemos a realizar una prueba de hipótesis comparando el valor de salida promedio del modelo (FUSIONS + MKZS) con el desempeño actual del sistema previamente calculado de 7,502 unidades semanales. Los resultados de las variables FUSIONS y MKZS se muestran a continuación en la figura 4.20:

|         |         |        |   |         |         |         |                 |
|---------|---------|--------|---|---------|---------|---------|-----------------|
| FUSIONS | 6708.23 | 65.37  | 0 | 6708.23 | 6708.23 | 3355.24 | (Average)       |
| FUSIONS | 33.80   | 0.32   | 0 | 33.80   | 33.80   | 17.85   | (Std. Dev.)     |
| FUSIONS | 6697.75 | 65.27  | 0 | 6697.75 | 6697.75 | 3349.7  | (90% C.I. Low)  |
| FUSIONS | 6718.72 | 65.48  | 0 | 6718.72 | 6718.72 | 3360.78 | (90% C.I. High) |
| FUSIONS | 6695.61 | 65.25  | 0 | 6695.61 | 6695.61 | 3348.57 | (95% C.I. Low)  |
| FUSIONS | 6720.85 | 65.50  | 0 | 6720.85 | 6720.85 | 3361.9  | (95% C.I. High) |
| FUSIONS | 6691.22 | 65.21  | 0 | 6691.22 | 6691.22 | 3346.25 | (99% C.I. Low)  |
| FUSIONS | 6725.24 | 65.54  | 0 | 6725.24 | 6725.24 | 3364.22 | (99% C.I. High) |
| MKZS    | 1367.03 | 320.85 | 0 | 1367.03 | 1367.03 | 687.18  | (Average)       |
| MKZS    | 33.51   | 7.67   | 0 | 33.51   | 33.51   | 18.23   | (Std. Dev.)     |
| MKZS    | 1356.64 | 318.47 | 0 | 1356.64 | 1356.64 | 681.52  | (90% C.I. Low)  |
| MKZS    | 1377.43 | 323.23 | 0 | 1377.43 | 1377.43 | 692.83  | (90% C.I. High) |
| MKZS    | 1354.52 | 317.99 | 0 | 1354.52 | 1354.52 | 680.37  | (95% C.I. Low)  |
| MKZS    | 1379.55 | 323.72 | 0 | 1379.55 | 1379.55 | 693.99  | (95% C.I. High) |
| MKZS    | 1350.17 | 316.99 | 0 | 1350.17 | 1350.17 | 678.00  | (99% C.I. Low)  |
| MKZS    | 1383.9  | 324.71 | 0 | 1383.9  | 1383.9  | 696.35  | (99% C.I. High) |

**Figura 4.20.** Reporte de variables de modelo de simulación.

La suma de las variables que se utilizaron para contar el número de unidades producidas da 8,075.26 unidades x 93% de eficiencia =7,510.00. Posteriormente procedemos a probar que la media de unidades producidas obtenida en el modelo se asemeja a la media del desempeño actual del sistema real mediante una prueba de hipótesis de medias de dos poblaciones:

$$H_0: \text{Media Poblacional} = 7,510.00 \quad X = 7,502.00$$

$$H_1: \text{Media Poblacional} \neq 7,510.00 \quad M = 7,510.00$$

$$Z = ((7,502.00 - 7,510.00) * \text{raíz}(30)) / 36.08 = -1.2145 \quad (4.1)$$

Ya que el valor de -1.2145 se encuentra entre -1.96 y 1.96 (valor de Z obtenido con nivel de confianza de 95%), no existe suficiente evidencia estadística para rechazar  $H_0$ , es decir  $p\{7489.09 \leq M \leq 7514.91\} = 95\%$  y podemos deducir con un 95% de confianza que la media poblacional y la media del desempeño actual del sistema coinciden.

## 4.6. Análisis de resultados del modelo

La idea fundamental de esta sección es localizar los cuellos de botella del sistema con la finalidad de evaluar cuanto se requiere mejorarlos para lograr que el sistema incremente su flujo de 7,510.00 a 8,041.00 unidades producidas (tener una capacidad de 8,648 unidades para conseguir 8,041 produciendo con una eficiencia del 93%).

A Continuación se muestra la tabla de resultados promedio de cada línea del modelo de simulación con la finalidad de detectar los puntos donde se pierde flujo en el sistema (cuellos de botella), ya sea internamente en cada línea o por cuestiones de sincronización de flujo entre líneas:

| Location Name      | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|--------------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| Pintura            | 121.83          | 999999   | 25114         | 1715.77           | 98.24            | 100              | 97.4             | 0.01   | (Average) |
| P3                 | 121.83          | 20       | 8080.2        | 1085.61           | 20               | 20               | 20               | 100.00 | (Average) |
| PT001 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.40             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| PT002 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.40             | 0.99             | 1                | 1                | 99.99  | (Average) |
| PT003 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.39             | 0.99             | 1                | 1                | 99.98  | (Average) |
| PT004 DVD          | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.36             | 0.99             | 1                | 1                | 99.93  | (Average) |
| PT005 DVD          | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.34             | 0.99             | 1                | 1                | 99.87  | (Average) |
| PT006 DVD          | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.30             | 0.99             | 1                | 1                | 99.81  | (Average) |
| PT007 DVD          | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| PT008 RH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| PT009 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| PT010 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| PT011 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.29             | 0.99             | 1                | 1                | 99.79  | (Average) |
| PT012 RH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.31             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| PT013 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.33             | 0.99             | 1                | 1                | 99.87  | (Average) |
| PT014 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.32             | 0.99             | 1                | 1                | 99.85  | (Average) |
| PT015 RH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.28             | 0.99             | 1                | 1                | 99.78  | (Average) |
| PT017 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.75  | (Average) |
| PT020 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.30             | 0.99             | 1                | 1                | 99.81  | (Average) |
| PT021 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.27             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| PT022 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.26             | 0.99             | 1                | 1                | 99.74  | (Average) |
| PT023 LH           | 121.83          | 1        | 8061.2        | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.67  | (Average) |
| FORK TRANSFER      | 121.83          | 18       | 8078.2        | 933.72            | 17.19            | 18               | 18               | 95.54  | (Average) |
| ACUMULADOR PRETRIM | 121.83          | 180      | 8150.3        | 4467.01           | 83.00            | 91               | 77.86            | 46.12  | (Average) |

**Figura 4.21.** Resultados de flujo de proceso en línea pretrim.

Como podemos observar en la figura 4.21, el flujo promedio de cada locación de pretrim es de 8061.2 entradas totales y se mantuvo ese flujo a lo largo de toda la línea muestra de que no existen cuellos de botella internos en esta línea.

| Location Name | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average           | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|---------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
|               |                 |          |               | Seconds Per Entry |                  |                  |                  |        |           |
| WS101 LH      | 121.83          | 1        | 8061.2        | 53.24             | 0.97             | 1                | 1                | 97.87  | (Average) |
| WS102 RH      | 121.83          | 1        | 8061.2        | 52.60             | 0.96             | 1                | 1                | 96.68  | (Average) |
| WS103 RH      | 121.83          | 1        | 8061.2        | 53.26             | 0.97             | 1                | 1                | 97.90  | (Average) |
| WS104 RH      | 121.83          | 1        | 8061.2        | 52.59             | 0.96             | 1                | 0.93             | 96.66  | (Average) |
| WS105 LH      | 121.83          | 1        | 8061.27       | 53.26             | 0.97             | 1                | 1                | 97.89  | (Average) |
| WS106 LH      | 121.83          | 1        | 8061.27       | 52.36             | 0.96             | 1                | 0.96             | 96.25  | (Average) |
| WS107 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 52.86             | 0.97             | 1                | 1                | 97.16  | (Average) |
| WS108 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 53.12             | 0.97             | 1                | 1                | 97.63  | (Average) |
| WS109 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 53.41             | 0.98             | 1                | 1                | 98.17  | (Average) |
| WS110 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 52.94             | 0.97             | 1                | 1                | 97.30  | (Average) |
| WS111 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 53.24             | 0.97             | 1                | 1                | 97.87  | (Average) |
| WS112 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 53.45             | 0.98             | 1                | 1                | 98.26  | (Average) |
| WS114 LH      | 121.83          | 1        | 8061.3        | 53.32             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.01  | (Average) |
| WS115 LH      | 121.83          | 1        | 8061.33       | 52.88             | 0.97             | 1                | 0.96             | 97.20  | (Average) |
| WS116 LH      | 121.83          | 1        | 8061.37       | 53.47             | 0.98             | 1                | 1                | 98.28  | (Average) |
| WS118 LH      | 121.83          | 1        | 8061.37       | 53.32             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.02  | (Average) |
| WS119 RH      | 121.83          | 1        | 8061.4        | 53.23             | 0.97             | 1                | 1                | 97.84  | (Average) |
| WS120 LH      | 121.83          | 1        | 8061.4        | 53.00             | 0.97             | 1                | 0.9              | 97.43  | (Average) |
| WS121 LH      | 121.83          | 1        | 8061.5        | 50.21             | 0.92             | 1                | 0.43             | 92.29  | (Average) |
| WS122 LH      | 121.83          | 1        | 8062.07       | 53.39             | 0.98             | 1                | 1                | 98.14  | (Average) |
| WS123 LH      | 121.83          | 1        | 8062.07       | 53.23             | 0.97             | 1                | 0.96             | 97.85  | (Average) |
| WS124 LH      | 121.83          | 1        | 8062.1        | 53.17             | 0.97             | 1                | 1                | 97.74  | (Average) |
| WS125 LH      | 121.83          | 1        | 8062.1        | 53.24             | 0.97             | 1                | 0.96             | 97.87  | (Average) |
| WS126 LH      | 121.83          | 1        | 8062.13       | 53.01             | 0.97             | 1                | 0.93             | 97.45  | (Average) |
| WS127 RH      | 121.83          | 1        | 8062.2        | 49.53             | 0.91             | 1                | 0.46             | 91.06  | (Average) |
| WS130 LH      | 121.83          | 1        | 8062.73       | 53.23             | 0.97             | 1                | 0.96             | 97.86  | (Average) |
| WS131 LH      | 121.83          | 1        | 8062.77       | 53.03             | 0.97             | 1                | 0.93             | 97.50  | (Average) |
| CELDA IP      | 121.83          | 1        | 8062.83       | 52.91             | 0.97             | 1                | 0.9              | 97.27  | (Average) |
| VDL 100       | 121.83          | 7        | 8068.93       | 359.88            | 6.62             | 7                | 6.66             | 94.58  | (Average) |

**Figura 4.22.** Resultados de flujo de proceso en línea 100.

Como podemos observar en la figura 4.22, el flujo promedio de cada locación de la línea 100 se ve interrumpido en la estación 122 LH de manera que la estación 121 LH es un cuello de botella que contribuye con 0.5 unidades de pérdida dentro del modelo. De igual manera la estación 127 RH es responsable de la pérdida de 0.5 unidades de volumen dentro de la línea 100.

| Location Name | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util          |
|---------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| VDL 100       | 121.83          | 7        | 8068.93       | 359.88            | 6.62             | 7                | 6.66             | 94.58 (Average) |
| WS203 LH      | 121.83          | 1        | 8063.27       | 53.60             | 0.98             | 1                | 1                | 98.54 (Average) |
| WS204 LH      | 121.83          | 1        | 8063.27       | 53.56             | 0.98             | 1                | 1                | 98.48 (Average) |
| WS205 LH      | 121.83          | 1        | 8063.27       | 53.51             | 0.98             | 1                | 1                | 98.39 (Average) |
| WS206 LH      | 121.83          | 1        | 8063.27       | 53.41             | 0.98             | 1                | 1                | 98.20 (Average) |
| WS207 RH      | 121.83          | 1        | 8063.27       | 53.41             | 0.98             | 1                | 0.93             | 98.20 (Average) |
| WS208 LH      | 121.83          | 1        | 8063.33       | 52.36             | 0.96             | 1                | 0.76             | 96.27 (Average) |
| WS209 LH      | 121.83          | 1        | 8063.57       | 53.52             | 0.98             | 1                | 1                | 98.41 (Average) |
| WS210 LH      | 121.83          | 1        | 8063.57       | 53.55             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.46 (Average) |
| WS211 LH      | 121.83          | 1        | 8063.6        | 53.52             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.40 (Average) |
| WS212 LH      | 121.83          | 1        | 8063.63       | 53.51             | 0.98             | 1                | 0.93             | 98.38 (Average) |
| WS214 LH      | 121.83          | 1        | 8063.7        | 53.50             | 0.98             | 1                | 1                | 98.36 (Average) |
| WS215 LH      | 121.83          | 1        | 8063.7        | 53.48             | 0.98             | 1                | 1                | 98.34 (Average) |
| WS217 RH      | 121.83          | 1        | 8063.7        | 53.41             | 0.98             | 1                | 1                | 98.20 (Average) |
| WS219 LH      | 121.83          | 1        | 8063.7        | 53.49             | 0.98             | 1                | 1                | 98.34 (Average) |
| WS220 LH      | 121.83          | 1        | 8063.7        | 53.47             | 0.98             | 1                | 0.93             | 98.31 (Average) |
| WS221 LH      | 121.83          | 1        | 8063.77       | 53.43             | 0.98             | 1                | 1                | 98.24 (Average) |
| CELDA HEV     | 121.83          | 1        | 8063.77       | 53.37             | 0.98             | 1                | 1                | 98.12 (Average) |
| WS223 LH      | 121.83          | 1        | 8063.77       | 53.51             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.38 (Average) |
| WS224 LH      | 121.83          | 1        | 8063.8        | 53.48             | 0.98             | 1                | 1                | 98.34 (Average) |
| WS225 RH      | 121.83          | 1        | 8063.8        | 53.54             | 0.98             | 1                | 1                | 98.44 (Average) |
| WS226 LH      | 121.83          | 1        | 8063.8        | 53.60             | 0.98             | 1                | 1                | 98.55 (Average) |
| WS227 LH      | 121.83          | 1        | 8063.8        | 53.51             | 0.98             | 1                | 1                | 98.39 (Average) |
| WS228 LH      | 121.83          | 1        | 8063.8        | 53.46             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.30 (Average) |
| WS229 RH      | 121.83          | 1        | 8063.83       | 53.48             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.34 (Average) |
| WS231 LH      | 121.83          | 1        | 8063.87       | 53.53             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.42 (Average) |
| WS232 LH      | 121.83          | 1        | 8063.9        | 53.51             | 0.98             | 1                | 1                | 98.39 (Average) |
| WS233 LH      | 121.83          | 1        | 8063.9        | 52.88             | 0.97             | 1                | 0.83             | 97.22 (Average) |

**Figura 4.23.** Resultados de flujo de proceso en línea 200.

Como podemos observar en la figura 4.23, el flujo promedio de cada locación de la línea 200 se ve constante con ligeras pérdidas en algunas locaciones con una pérdida de 0.5 unidades a través de toda la línea.

| Location Name | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util          |
|---------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| VDL 200       | 121.83          | 5        | 8068.07       | 246.93            | 4.54             | 5                | 1.96             | 90.85 (Average) |
| WS302 RH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 53.60             | 0.98             | 1                | 1                | 98.60 (Average) |
| WS303 LH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 53.52             | 0.98             | 1                | 1                | 98.45 (Average) |
| WS304 LH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 51.08             | 0.93             | 1                | 1                | 93.97 (Average) |
| WS305 LH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 53.65             | 0.98             | 1                | 1                | 98.69 (Average) |
| WS306 RH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 53.63             | 0.98             | 1                | 1                | 98.65 (Average) |
| WS307 LH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 53.54             | 0.98             | 1                | 1                | 98.48 (Average) |
| WS309 LH      | 121.83          | 1        | 8067.1        | 51.57             | 0.94             | 1                | 0.96             | 94.86 (Average) |
| WS310 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.59             | 0.98             | 1                | 1                | 98.59 (Average) |
| WS311 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.61             | 0.98             | 1                | 1                | 98.62 (Average) |
| WS312 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 51.66             | 0.95             | 1                | 1                | 95.03 (Average) |
| WS313 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 52.57             | 0.96             | 1                | 1                | 96.71 (Average) |
| WS314 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.73             | 0.98             | 1                | 1                | 98.84 (Average) |
| WS315 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.70             | 0.98             | 1                | 1                | 98.78 (Average) |
| WS316 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.67             | 0.98             | 1                | 1                | 98.73 (Average) |
| WS317 LH      | 121.83          | 1        | 8067.13       | 53.70             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.77 (Average) |
| WS318 LH      | 121.83          | 1        | 8067.17       | 53.70             | 0.98             | 1                | 1                | 98.78 (Average) |
| WS320 LH      | 121.83          | 1        | 8067.17       | 53.71             | 0.98             | 1                | 1                | 98.80 (Average) |
| WS321 LH      | 121.83          | 1        | 8067.17       | 53.72             | 0.98             | 1                | 1                | 98.81 (Average) |
| WS322 LH      | 121.83          | 1        | 8067.17       | 53.72             | 0.98             | 1                | 1                | 98.81 (Average) |
| VDL NORTE     | 121.83          | 1        | 8067.17       | 53.67             | 0.98             | 1                | 1                | 98.73 (Average) |

**Figura 4.24.** Resultados de flujo de proceso en línea 300.

Como podemos observar en la figura 4.24, el flujo promedio de cada locación de la línea 300 se ve constante y sin pérdidas por lo que se descarta tener cuellos de botella internos en esta línea. Observemos también que se pierden 3.2 unidades por problemas de sincronización de flujo con la línea 200.

| Location Name | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|---------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| VDL 300       | 121.83          | 12       | 8078.17       | 593.66            | 10.93            | 12               | 9.26             | 91.12  | (Average) |
| CELDA KUKA    | 121.83          | 1        | 8069.9        | 51.28             | 0.94             | 1                | 1                | 94.36  | (Average) |
| WS405 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 51.59             | 0.94             | 1                | 1                | 94.93  | (Average) |
| WS407 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 51.92             | 0.95             | 1                | 1                | 95.53  | (Average) |
| WS408 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.73             | 0.98             | 1                | 1                | 98.87  | (Average) |
| WS411 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 52.27             | 0.96             | 1                | 1                | 96.18  | (Average) |
| WS412 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.84             | 0.99             | 1                | 1                | 99.07  | (Average) |
| WS413 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.88             | 0.99             | 1                | 1                | 99.15  | (Average) |
| WS414 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 52.64             | 0.96             | 1                | 1                | 96.87  | (Average) |
| WS415 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.85             | 0.99             | 1                | 1                | 99.09  | (Average) |
| WS416 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.04             | 0.97             | 1                | 1                | 97.61  | (Average) |
| WS417 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.95             | 0.99             | 1                | 1                | 99.27  | (Average) |
| WS418 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.44             | 0.98             | 1                | 1                | 98.34  | (Average) |
| WS419 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.00             | 0.99             | 1                | 1                | 99.37  | (Average) |
| WS420 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.00             | 0.99             | 1                | 1                | 99.36  | (Average) |
| WS421 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.55             | 0.98             | 1                | 1                | 98.54  | (Average) |
| WS422 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.03             | 0.99             | 1                | 1                | 99.41  | (Average) |
| WS423 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.01             | 0.99             | 1                | 1                | 99.38  | (Average) |
| WS424 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.01             | 0.99             | 1                | 1                | 99.38  | (Average) |
| WS425 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 53.77             | 0.98             | 1                | 1                | 98.94  | (Average) |
| WS426 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.05             | 0.99             | 1                | 1                | 99.45  | (Average) |
| WS427 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.05             | 0.99             | 1                | 1                | 99.46  | (Average) |
| WS428 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.05             | 0.99             | 1                | 1                | 99.47  | (Average) |
| WS429 RH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 54.05             | 0.99             | 1                | 1                | 99.45  | (Average) |
| WS430 LH      | 121.83          | 1        | 8069.9        | 52.86             | 0.97             | 1                | 0.93             | 97.27  | (Average) |

**Figura 4.25.** Resultados de flujo de proceso en línea 400.

Como podemos observar en la figura 4.25, el flujo promedio de cada locación de la línea 400 es constante y sin perdidas. Observemos también que se pierden 2.7 unidades por problemas de sincronización de flujo con la línea 300.

| Location Name       | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|---------------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| ACUMULADOR LINEA400 | 121.83          | 13       | 8081.97       | 644.49            | 11.87            | 13               | 10.53            | 91.35  | (Average) |
| WS501 LH            | 121.83          | 1        | 8072.43       | 52.27             | 0.96             | 1                | 1                | 96.22  | (Average) |
| WS503 LH            | 121.83          | 1        | 8072.43       | 52.77             | 0.97             | 1                | 1                | 97.14  | (Average) |
| WS504 LH            | 121.83          | 1        | 8072.43       | 53.06             | 0.97             | 1                | 1                | 97.66  | (Average) |
| WS505 LH            | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.20             | 0.99             | 1                | 1                | 99.76  | (Average) |
| WS506 LH            | 121.83          | 1        | 8072.43       | 53.26             | 0.98             | 1                | 0.96             | 98.04  | (Average) |
| WS507 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.41             | 0.98             | 1                | 1                | 98.32  | (Average) |
| WS508 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.76             | 0.98             | 1                | 1                | 98.96  | (Average) |
| WS513 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.26             | 0.99             | 1                | 1                | 99.88  | (Average) |
| WS514 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.75             | 0.98             | 1                | 1                | 98.93  | (Average) |
| WS515 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.09             | 0.99             | 1                | 1                | 99.56  | (Average) |
| WS516 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.85  | (Average) |
| WS517 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.32             | 0.99             | 1                | 1                | 99.99  | (Average) |
| WS518 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.21             | 0.99             | 1                | 1                | 99.78  | (Average) |
| WS519 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.33             | 0.99             | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS523 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS524 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.86  | (Average) |
| WS526 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.21             | 0.99             | 1                | 1                | 99.79  | (Average) |
| WS527 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.98             | 0.99             | 1                | 1                | 99.36  | (Average) |
| WS528 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS529 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.17             | 0.99             | 1                | 1                | 99.71  | (Average) |
| WS530 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.88             | 0.99             | 1                | 1                | 99.17  | (Average) |
| WS531 LH            | 121.83          | 1        | 8072.47       | 53.52             | 0.98             | 1                | 1                | 98.51  | (Average) |

**Figura 4.26.** Resultados de flujo de proceso en línea 500.

Como podemos observar en la figura 4.26, el flujo promedio de cada locación de la línea 500 es constante y sin perdidas por lo que se descarta tener cuellos de botella

internos en esta línea. Observemos también que se pierden 2.5 unidades por problemas de sincronización de flujo con la línea 400.

| Location Name       | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util           |
|---------------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ACUMULADOR LINEA500 | 121.83          | 11       | 8082.47       | 588.24                    | 10.84            | 11               | 10.8             | 98.55 (Average)  |
| WS600 LH            | 121.83          | 1        | 8072.67       | 54.32                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.99 (Average)  |
| WS601 LH            | 121.83          | 1        | 8072.67       | 54.33                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS604 LH            | 121.83          | 1        | 8072.67       | 54.33                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS605 LH            | 121.83          | 1        | 8072.67       | 53.30                     | 0.98             | 1                | 0.93             | 98.11 (Average)  |
| WS606 LH            | 121.83          | 1        | 8072.73       | 54.33                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS607 LH            | 121.83          | 1        | 8072.73       | 54.33                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS610 LH            | 121.83          | 1        | 8072.73       | 54.33                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS611 LH            | 121.83          | 1        | 8072.73       | 32.75                     | 0.60             | 1                | 0.6              | 60.28 (Average)  |
| WS612 LH            | 121.83          | 1        | 8073.13       | 49.93                     | 0.91             | 1                | 0.96             | 91.91 (Average)  |
| WS613 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 53.97                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.35 (Average)  |
| WS614 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98 (Average)  |
| WS615 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS616 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS618 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS619 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS620 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS621 LH            | 121.83          | 1        | 8073.17       | 33.20                     | 0.61             | 1                | 0.8              | 61.11 (Average)  |
| WS623 LH            | 121.83          | 1        | 8073.37       | 48.92                     | 0.90             | 1                | 1                | 90.05 (Average)  |
| WS624 LH            | 121.83          | 1        | 8073.37       | 53.48                     | 0.98             | 1                | 1                | 98.45 (Average)  |
| WS625 LH            | 121.83          | 1        | 8073.37       | 50.13                     | 0.92             | 1                | 0.93             | 92.28 (Average)  |
| WS626 RH            | 121.83          | 1        | 8073.43       | 52.52                     | 0.96             | 1                | 0.96             | 96.69 (Average)  |
| WS627 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.54                     | 0.98             | 1                | 1                | 98.57 (Average)  |
| WS628 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.02                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.45 (Average)  |

**Figura 4.27.** Resultados de flujo de proceso en línea 600.

Como podemos observar en la figura 4.27, el flujo promedio de cada locación de la línea 600 se ve constante con ligeras pérdidas en algunas locaciones con una pérdida de 0.8 unidades a través de toda la línea.

| Location Name       | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util           |
|---------------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ACUMULADOR LINEA600 | 121.83          | 5        | 8077.47       | 271.27                    | 4.99             | 5                | 5                | 99.92 (Average)  |
| WS701 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.99 (Average)  |
| WS702 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS703 RH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98 (Average)  |
| WS704 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.30                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.96 (Average)  |
| WS705 RH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS707 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98 (Average)  |
| WS708 RH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.28                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.93 (Average)  |
| WS709 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| LLENADOS            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.30                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.96 (Average)  |
| WS714 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.21                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.80 (Average)  |
| WS715 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98 (Average)  |
| WS718 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.27                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.90 (Average)  |
| WS719 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 0.99             | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS720 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.32                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 (Average) |
| WS721 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.99 (Average)  |
| WS722 RH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.97 (Average)  |
| WS728 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.31                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98 (Average)  |
| SHUTTLE             | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.21                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.80 (Average)  |
| WS730 LH            | 121.83          | 1        | 8073.47       | 48.00                     | 0.88             | 1                | 0.83             | 88.37 (Average)  |
| WS731 LH            | 121.83          | 1        | 8073.63       | 47.81                     | 0.88             | 1                | 0.9              | 88.02 (Average)  |
| WS732 LH            | 121.83          | 1        | 8073.73       | 48.13                     | 0.88             | 1                | 0.9              | 88.60 (Average)  |
| WS733 LH            | 121.83          | 1        | 8073.83       | 47.99                     | 0.88             | 1                | 0.9              | 88.35 (Average)  |
| WS735 LH            | 121.83          | 1        | 8073.93       | 48.05                     | 0.88             | 1                | 0.83             | 88.47 (Average)  |
| WS736 LH            | 121.83          | 1        | 8074.1        | 47.98                     | 0.88             | 1                | 0.9              | 88.34 (Average)  |
| WS737 LH            | 121.83          | 1        | 8074.2        | 9.23                      | 0.17             | 1                | 0.1              | 17.01 (Average)  |
| WS739 LH            | 121.83          | 1        | 8075.1        | 47.69                     | 0.87             | 1                | 0.83             | 87.82 (Average)  |
| WS742 RH            | 121.83          | 1        | 8075.27       | 10.88                     | 0.20             | 1                | 0.33             | 20.04 (Average)  |
| EOL                 | 121.83          | 1        | 8075.27       | 46.99                     | 0.86             | 1                | 0.9              | 86.53 (Average)  |

**Figura 4.28.** Resultados de flujo de proceso en línea 700.

Como podemos observar en la figura 4.28, el flujo promedio de cada locación de la línea 700 se ve constante hasta que llegamos a la estación 737 LH donde se pierde 1 unidad de flujo, por lo que dicha estación es un cuello de botella del modelo.

| Location Name     | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|-------------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| WS800 RH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS801 RH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS803 RH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.15             | 0.99             | 1                | 1                | 99.67  | (Average) |
| WS804 RH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS805 LH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS806 LH          | 121.83          | 1        | 8072.43       | 54.27             | 0.99             | 1                | 0.96             | 99.90  | (Average) |
| WS807 LH          | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS808 LH          | 121.83          | 1        | 8072.47       | 54.33             | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| CONVEYOR BOOGUIES | 121.83          | 3        | 8074.47       | 162.56            | 2.99             | 3                | 3                | 99.76  | (Average) |
| CONVEYOR MOTORES  | 121.83          | 999999   | 11026.1       | 309.74            | 7.78             | 66               | 9.9              | 0.00   | (Average) |

**Figura 4.29.** Resultados de flujo de proceso en línea 800.

Como podemos observar en la figura 4.29, el flujo promedio de cada locación de la línea 800 es constante y sin pérdidas por lo que se descarta tener cuellos de botella internos en esta línea.

| Location Name    | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|------------------|-----------------|----------|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| WS901 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| WS904 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| WS905 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| WS906 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| WS907 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.83  | (Average) |
| WS908 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.23             | 0.99             | 1                | 1                | 99.84  | (Average) |
| WS909 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.24             | 0.99             | 1                | 1                | 99.84  | (Average) |
| WS910 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.24             | 0.99             | 1                | 1                | 99.85  | (Average) |
| WS911 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.24             | 0.99             | 1                | 1                | 99.85  | (Average) |
| WS913 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.86  | (Average) |
| WS914 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.86  | (Average) |
| WS915 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.86  | (Average) |
| WS916 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.25             | 0.99             | 1                | 1                | 99.88  | (Average) |
| WS917 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.26             | 0.99             | 1                | 1                | 99.88  | (Average) |
| WS919 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 54.26             | 0.99             | 1                | 1                | 99.89  | (Average) |
| WS920 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 52.98             | 0.97             | 1                | 1                | 97.52  | (Average) |
| WS921 LH         | 121.83          | 1        | 8073.43       | 52.19             | 0.96             | 1                | 0.96             | 96.08  | (Average) |
| WS923 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.64             | 0.98             | 1                | 1                | 98.75  | (Average) |
| WS924 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.88             | 0.99             | 1                | 1                | 99.18  | (Average) |
| WS925 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.92             | 0.99             | 1                | 1                | 99.27  | (Average) |
| WS926 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.95             | 0.99             | 1                | 1                | 99.32  | (Average) |
| WS928 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.97             | 0.99             | 1                | 1                | 99.35  | (Average) |
| WS929 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 53.98             | 0.99             | 1                | 1                | 99.38  | (Average) |
| WS930 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.03             | 0.99             | 1                | 1                | 99.46  | (Average) |
| WS931 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.04             | 0.99             | 1                | 1                | 99.48  | (Average) |
| WS932 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.05             | 0.99             | 1                | 1                | 99.50  | (Average) |
| WS935 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.04             | 0.99             | 1                | 1                | 99.49  | (Average) |
| WS937 LH         | 121.83          | 1        | 8073.47       | 54.07             | 0.99             | 1                | 1                | 99.54  | (Average) |
| CONVEYOR PUERTAS | 121.83          | 50       | 8122.47       | 2698.70           | 49.97            | 50               | 50               | 99.96  | (Average) |

**Figura 4.30.** Resultados de flujo de proceso en línea 900.

Como podemos observar en la figura 4.30, el flujo promedio de cada locación de la línea 900 es constante y sin pérdidas por lo que se descarta tener cuellos de botella internos en esta línea.

En resumen, se tienen pérdidas de 11.7 unidades totales derivados de cuellos de botella internos. El corregir las situaciones que nos llevan a tener esta pérdida de

unidades no es suficiente para lograr los objetivos de flujo de la compañía por lo que se evaluó la opción de modificar la velocidad de las transferencias del sistema y corregir los cuellos de botella a que surjan después de los cambios antes mencionados.

#### 4.7. Desarrollo y simulación de alternativas de mejora

En la etapa de desarrollo y simulación de alternativas de mejora se elaboraron primeramente las propuestas relacionadas con modificar la velocidad de las transferencias y las líneas de ensamble. Basados en las diferentes capacidades de las transferencias y las restricciones técnicas, operativas y reglamentos corporativos se determinó modificar las velocidades de las transferencias enlistadas en la figura 4.31:

| Transferencia        | Velocidad Actual | Velocidad Final |
|----------------------|------------------|-----------------|
| Pretrim a línea 100  | 43 segundos      | 30 segundos     |
| VDL Norte            | 47 segundos      | 46.5 segundos   |
| VDL 300              | 30 segundos      | 46.5 segundos   |
| Acumulador línea 400 | 48 segundos      | 47.5 segundos   |
| Acumulador línea 500 | 49.5 segundos    | 48.5 segundos   |
| Acumulador línea 600 | 51 segundos      | 49 segundos     |
| Conveyor puertas     | 30 segundos      | 49 segundos     |

**Figura 4.31.** Mejoramiento de velocidad de transferencias.

Posteriormente se realizaron las modificaciones en el modelo de simulación y se obtuvieron los siguientes resultados de flujo:

| Variable Name | Total Changes | Average Seconds Per Change | Minimum Value | Maximum Value | Current Value | Average Value |                 |
|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| FUSIONS       | 6917.07       | 63.40                      | 0             | 6917.07       | 6917.07       | 3482.54       | (Average)       |
| FUSIONS       | 35.56         | 0.32                       | 0             | 35.56         | 35.56         | 21.86         | (Std. Dev.)     |
| FUSIONS       | 6906.03       | 63.30                      | 0             | 6906.03       | 6906.03       | 3475.75       | (90% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6928.1        | 63.50                      | 0             | 6928.1        | 6928.1        | 3489.32       | (90% C.I. High) |
| FUSIONS       | 6903.79       | 63.28                      | 0             | 6903.79       | 6903.79       | 3474.37       | (95% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6930.35       | 63.52                      | 0             | 6930.35       | 6930.35       | 3490.7        | (95% C.I. High) |
| FUSIONS       | 6899.17       | 63.24                      | 0             | 6899.17       | 6899.17       | 3471.54       | (99% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6934.96       | 63.56                      | 0             | 6934.96       | 6934.96       | 3493.53       | (99% C.I. High) |
| MKZS          | 1414.6        | 310.00                     | 0             | 1414.6        | 1414.6        | 711.13        | (Average)       |
| MKZS          | 35.13         | 7.74                       | 0             | 35.13         | 35.13         | 21.64         | (Std. Dev.)     |
| MKZS          | 1403.7        | 307.59                     | 0             | 1403.7        | 1403.7        | 704.41        | (90% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1425.5        | 312.40                     | 0             | 1425.5        | 1425.5        | 717.84        | (90% C.I. High) |
| MKZS          | 1401.48       | 307.11                     | 0             | 1401.48       | 1401.48       | 703.05        | (95% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1427.72       | 312.89                     | 0             | 1427.72       | 1427.72       | 719.21        | (95% C.I. High) |
| MKZS          | 1396.92       | 306.10                     | 0             | 1396.92       | 1396.92       | 700.24        | (99% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1432.28       | 313.89                     | 0             | 1432.28       | 1432.28       | 722.01        | (99% C.I. High) |

**Figura 4.32.** Resultados de modelo de simulación con optimización de transferencias.

Se obtuvieron 8,331.67 unidades producidas, sin embargo no se logró el objetivo de 8,684 unidades, por lo que se realizó de nueva cuenta la etapa 4.6 de análisis de resultados del modelo y se localizó 1 cuello de botella:

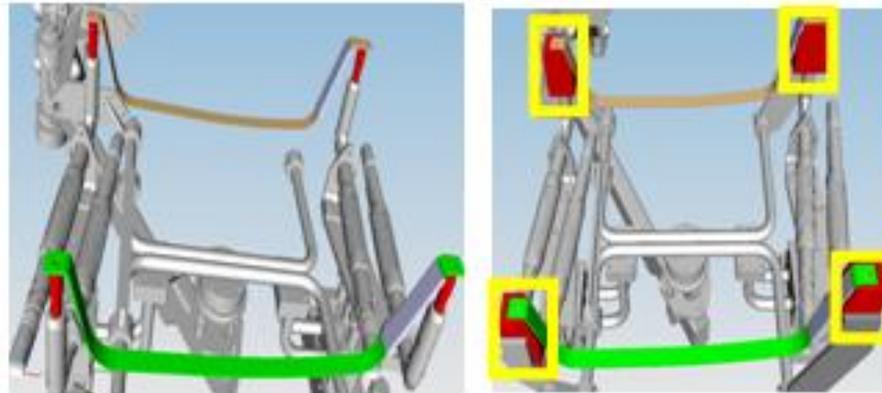
- 428-430 LH: se detectó que el brazo de instalación de tanque de gasolina tiene varios problemas para alinear los cinchos del tanque de gasolina y esto genera que el tiempo ciclo se incrementa en esta estación tal y como se muestra en la figura 4.33:

| Location Name       | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|---------------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| WS425 RM            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 52.69                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.95  | (Average) |
| WS426 RM            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 52.72                     | 1                | 1                | 1                | 100.00 | (Average) |
| WS427 RM            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 52.71                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.99  | (Average) |
| WS428 LH            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 52.71                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.98  | (Average) |
| WS429 RH            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 52.68                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.93  | (Average) |
| WS430 LH            | 121.83          | 1        | 8319.17       | 51.25                     | 0.97             | 1                | 0.93             | 97.21  | (Average) |
| ACUM/LADOR LINEA400 | 121.83          | 13       | 8331.23       | 589.25                    | 11.19            | 13               | 4                | 86.10  | (Average) |
| WS501 LH            | 121.83          | 1        | 8328.23       | 50.69                     | 0.96             | 1                | 0.96             | 96.26  | (Average) |
| WS503 LH            | 121.83          | 1        | 8328.27       | 51.46                     | 0.97             | 1                | 1                | 97.72  | (Average) |
| WS504 LH            | 121.83          | 1        | 8328.27       | 51.90                     | 0.98             | 1                | 1                | 98.56  | (Average) |
| WS505 LH            | 121.83          | 1        | 8328.27       | 52.62                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.93  | (Average) |

**Figura 4.33.** Cuello de botella de modelo con optimización de transferencias.

Para mejorar el rendimiento del brazo de tanque de gasolina se juntó al equipo de trabajo conformado por el área de control dimensional y mantenimiento para analizar las áreas de oportunidad del brazo que posiciona el tanque de gasolina en las unidades. Se detectó área de oportunidad en los soportes donde se colocan los cinchos del tanque de gasolina y se decidió colocarle guías de color rojo en cada

esquina para evitar la variación referente a la posición de los cinchos en el brazo. Los cambios se muestran en la figura 4.34:



**Figura 4.34.** Mejoras en brazo de tanque de gasolina.

Una vez que la mejora fue implementada en el sistema real, se procedió a cronometrar de nueva cuenta y se obtuvieron los datos del tiempo ciclo de las estaciones 428-430 LH, se realizaron los cambios en el modelo de simulación y se obtuvieron los siguientes resultados de flujo:

| Variable Name | Total Changes | Average Seconds Per Change | Minimum Value | Maximum Value | Current Value | Average Value |                 |
|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| FUSIONS       | 6920.1        | 63.37                      | 0             | 6920.1        | 6920.1        | 3480.57       | (Average)       |
| FUSIONS       | 29.73         | 0.27                       | 0             | 29.73         | 29.73         | 18.18         | (Std. Dev.)     |
| FUSIONS       | 6910.88       | 63.29                      | 0             | 6910.88       | 6910.88       | 3474.92       | (90% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6929.32       | 63.46                      | 0             | 6929.32       | 6929.32       | 3486.21       | (90% C.I. High) |
| FUSIONS       | 6909          | 63.27                      | 0             | 6909          | 6909          | 3473.77       | (95% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6931.2        | 63.47                      | 0             | 6931.2        | 6931.2        | 3487.36       | (95% C.I. High) |
| FUSIONS       | 6905.14       | 63.23                      | 0             | 6905.14       | 6905.14       | 3471.41       | (99% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 6935.06       | 63.51                      | 0             | 6935.06       | 6935.06       | 3489.72       | (99% C.I. High) |
| MKZS          | 1413.47       | 310.26                     | 0             | 1413.47       | 1413.47       | 712.94        | (Average)       |
| MKZS          | 29.29         | 6.39                       | 0             | 29.29         | 29.29         | 17.20         | (Std. Dev.)     |
| MKZS          | 1404.38       | 308.28                     | 0             | 1404.38       | 1404.38       | 707.60        | (90% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1422.56       | 312.24                     | 0             | 1422.56       | 1422.56       | 718.28        | (90% C.I. High) |
| MKZS          | 1402.53       | 307.87                     | 0             | 1402.53       | 1402.53       | 706.52        | (95% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1424.41       | 312.65                     | 0             | 1424.41       | 1424.41       | 719.36        | (95% C.I. High) |
| MKZS          | 1398.72       | 307.04                     | 0             | 1398.72       | 1398.72       | 704.28        | (99% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1428.21       | 313.48                     | 0             | 1428.21       | 1428.21       | 721.60        | (99% C.I. High) |

**Figura 4.35.** Resultados del modelo con optimización de brazo de tanque de gasolina.

Se obtuvieron 8,333.57 unidades producidas, sin embargo no se logró el objetivo de 8,684 unidades, por lo que se realizó de nueva cuenta la etapa 4.6 de análisis de

resultados del modelo y se localizaron 2 cuellos de botella (919 y 920 LH) tal y como se muestra en la figura 4.36:

| Location Name    | Scheduled Hours | Capacity | Total Entries | Average Seconds Per Entry | Average Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Util |           |
|------------------|-----------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| WS916 LH         | 121.83          | 1        | 8280.87       | 52.84                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.78  | (Average) |
| WS917 LH         | 121.83          | 1        | 8280.87       | 52.85                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.79  | (Average) |
| WS919 LH         | 121.83          | 1        | 8280.87       | 52.85                     | 0.99             | 1                | 1                | 99.80  | (Average) |
| WS920 LH         | 121.83          | 1        | 8280.87       | 50.08                     | 0.94             | 1                | 0.96             | 94.56  | (Average) |
| WS921 LH         | 121.83          | 1        | 8280.9        | 43.65                     | 0.82             | 1                | 0.7              | 82.43  | (Average) |
| WS923 LH         | 121.83          | 1        | 8281.2        | 44.16                     | 0.83             | 1                | 0.7              | 83.38  | (Average) |
| WS924 LH         | 121.83          | 1        | 8281.5        | 44.31                     | 0.83             | 1                | 0.93             | 83.68  | (Average) |
| WS925 LH         | 121.83          | 1        | 8281.57       | 44.19                     | 0.83             | 1                | 0.93             | 83.44  | (Average) |
| WS926 LH         | 121.83          | 1        | 8281.63       | 44.14                     | 0.83             | 1                | 0.83             | 83.35  | (Average) |
| WS928 LH         | 121.83          | 1        | 8281.8        | 43.96                     | 0.83             | 1                | 0.73             | 83.01  | (Average) |
| WS929 LH         | 121.83          | 1        | 8282.07       | 43.72                     | 0.82             | 1                | 0.86             | 82.56  | (Average) |
| WS930 LH         | 121.83          | 1        | 8282.2        | 44.43                     | 0.83             | 1                | 0.73             | 83.91  | (Average) |
| WS931 LH         | 121.83          | 1        | 8282.47       | 44.25                     | 0.83             | 1                | 0.96             | 83.57  | (Average) |
| WS932 LH         | 121.83          | 1        | 8282.5        | 44.17                     | 0.83             | 1                | 0.83             | 83.42  | (Average) |
| WS935 LH         | 121.83          | 1        | 8282.67       | 43.19                     | 0.81             | 1                | 0.83             | 81.56  | (Average) |
| WS937 LH         | 121.83          | 1        | 8282.83       | 43.22                     | 0.81             | 1                | 0.73             | 81.63  | (Average) |
| CONVEYOR PUERTAS | 121.83          | 50       | 8332.1        | 215.30                    | 4.09             | 50               | 1.03             | 8.18   | (Average) |

Figura 4.36. Cuello de botella posterior a optimización de brazo de tanque de gasolina.

Para mejorar el rendimiento de las estaciones 919 y 920 LH se decidió automatizar el equipo de ciclado de cristales con la finalidad de ahorrar 11 segundos de tiempo ciclo en la estación 919 LH y pasarle labor de la estación 920 LH descargando esta ultima 5 segundos para poder dar el flujo requerido. Posteriormente se realizaron los cambios en el modelo obteniendo los siguientes resultados de flujo:

| Variable Name | Total Changes | Average Seconds Per Change | Minimum Value | Maximum Value | Current Value | Average Value |                 |
|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| FUSIONS       | 7234.57       | 60.62                      | 0             | 7234.57       | 7234.57       | 3623.5        | (Average)       |
| FUSIONS       | 30.62         | 0.25                       | 0             | 30.62         | 30.62         | 17.76         | (Std. Dev.)     |
| FUSIONS       | 7225.07       | 60.54                      | 0             | 7225.07       | 7225.07       | 3617.99       | (90% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 7244.07       | 60.70                      | 0             | 7244.07       | 7244.07       | 3629.01       | (90% C.I. High) |
| FUSIONS       | 7223.13       | 60.52                      | 0             | 7223.13       | 7223.13       | 3616.86       | (95% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 7246          | 60.71                      | 0             | 7246          | 7246          | 3630.13       | (95% C.I. High) |
| FUSIONS       | 7219.15       | 60.49                      | 0             | 7219.15       | 7219.15       | 3614.56       | (99% C.I. Low)  |
| FUSIONS       | 7249.98       | 60.74                      | 0             | 7249.98       | 7249.98       | 3632.44       | (99% C.I. High) |
| MKZS          | 1476.53       | 296.98                     | 0             | 1476.53       | 1476.53       | 737.22        | (Average)       |
| MKZS          | 29.28         | 5.91                       | 0             | 29.28         | 29.28         | 17.00         | (Std. Dev.)     |
| MKZS          | 1467.45       | 295.14                     | 0             | 1467.45       | 1467.45       | 731.95        | (90% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1485.62       | 298.81                     | 0             | 1485.62       | 1485.62       | 742.49        | (90% C.I. High) |
| MKZS          | 1465.6        | 294.77                     | 0             | 1465.6        | 1465.6        | 730.87        | (95% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1487.47       | 299.19                     | 0             | 1487.47       | 1487.47       | 743.57        | (95% C.I. High) |
| MKZS          | 1461.8        | 294.00                     | 0             | 1461.8        | 1461.8        | 728.67        | (99% C.I. Low)  |
| MKZS          | 1491.27       | 299.95                     | 0             | 1491.27       | 1491.27       | 745.78        | (99% C.I. High) |

Figura 4.37. Resultados de modelo de simulación final.

Se obtuvieron 8,711.10 unidades producidas, logrando cumplir el objetivo de 8,684 unidades requeridas por la compañía.

## 4.8. Caso de negocios de alternativas de mejora

En la etapa de desarrollo y simulación de alternativas de mejora se llegó a la conclusión de que se requiere implementar 2 de las acciones propuestas para poder mejorar el rendimiento del sistema y cumplir con el objetivo de flujo de producir 8,041 unidades semanales operando al 93% de eficiencia. En esta sección, se desarrollan un caso de negocios que integra las 3 alternativas de mejora y se seleccionan las que cumplan con las condiciones de factibilidad en general. Para la elaboración del caso de negocios se utilizó una plantilla corporativa de la empresa automotriz donde se llevó a cabo el estudio, la cual se presenta a continuación:

### **Resumen Ejecutivo**

Actualmente una planta automotriz ubicada al noroeste de México se encuentra en problemas económicos y corre el riesgo de cerrar sus operaciones debido a que la planta está siendo incapaz de cumplir los objetivos de unidades producidas estipulados por las oficinas centrales de la corporación a la que pertenece debido a problemas de sincronización de líneas, problemas con un equipo (brazo que instala el tanque de la gasolina) cuyo desempeño máximo no logra cumplir su tiempo ciclo y problemas de carga de trabajo en 2 estaciones (919 y 920) de una misma línea productiva que la convierten en cuello de botella.

Se han identificado las siguientes soluciones posibles:

- Modificar las velocidades de las transferencias de las líneas productivas que conforman el sistema para eliminar los problemas de flujo.
- Modificar el brazo del tanque de la gasolina instalándole soportes para reducir la variación en la posición del tanque de gasolina y así mejorar su tiempo ciclo.
- Automatizar el equipo de ciclado de cristales en la estación 919 LH y pasarle labor de la estación 920 LH descargando esta última 5 segundos para poder dar el flujo requerido.

Después de un análisis detallado se determinó que se requieren implementar las soluciones propuestas 1 y 3 para poder cumplir con los objetivos de flujo de la compañía e incrementar la producción en 636 unidades (7.88%). El costo total del

proyecto es de \$ 347,000.00, mismo que se recuperaría en menos de 1 día productivo ya que se refleje el impacto en las unidades producidas en el sistema de ensamble final.

### **Problema**

Actualmente una planta automotriz ubicada al noroeste de México únicamente puede producir el 93.3% de su objetivo de 8,041 unidades semanales y los presupuestos de gastos de esta planta se suministran dependiendo del número de unidades que produzcan, es decir, actualmente la compañía está dejando de percibir millones de pesos cada semana por sus ineficiencias de flujo.

### **Análisis del problema**

Se realizó un análisis del sistema de ensamble final utilizando simulación y se determinó que el sistema es incapaz de cumplir con sus objetivos de flujo debido a problemas de sincronización de líneas, problemas con un equipo (brazo que instala el tanque de la gasolina) y problemas de carga de trabajo en estaciones 919 y 920 del área de ensamble final.

### **Soluciones alternativas**

Después de varios meses de investigación, hemos concluido que existen las siguientes soluciones alternativas:

- Modificar las velocidades de las transferencias de las líneas productivas que conforman el sistema.
- Modificar el brazo del tanque de la gasolina instalándole soportes para reducir la variación en la posición del tanque de gasolina.
- Automatizar el equipo de ciclado de cristales en la estación 919 LH y pasarle labor de la estación 920 LH.

### **Opción1: Modificar las velocidades de las transferencias de las líneas productivas que conforman el sistema.**

#### **Descripción**

La primera opción considerada es modificar las velocidades de las transferencias de las líneas productivas que conforman el sistema como muestra la figura 4.31. Esto requiere los siguientes pasos logísticos:

- Junta de arranque con gerencia para presentar el proyecto y conseguir la autorización.
- Conseguir un ingeniero de automatización 100% dedicado a la modificación.
- Conseguir un ingeniero industrial que valide los cambios en las velocidades de las transferencias.
- Modificar los parámetros de hertz de los controladores de las velocidades para acelerar las transferencias.
- Validar los cambios de hertz expresados en tiempo ciclo (segundos) de cada transferencia.
- Proteger de nuevo los programas de las transferencias para que no se modifiquen los parámetros de hertz.

### **Ventajas**

La modificación de las velocidades de las transferencias tienen las siguientes ventajas:

- Ayuda a amortiguar posibles paros en las líneas ya que ahora se puede entregar una unidad a la siguiente línea en menor tiempo.
- Nos permite incrementar el número de unidades producidas semanalmente de 8,075 a 8,331.

Se obtendrán los siguientes beneficios tangibles:

| Categoría de la ventaja | Descripción   |
|-------------------------|---|
| Clientes                | Se cumplirán los tiempos de entrega.  |
| Personal                | Aumento en la motivación y satisfacción en el trabajo.  |
| Económicos              | Se incrementa el presupuesto general de la planta por cada unidad producida y disminuye el costo de operación por unidad. |

**Tabla 4.1.** Ventajas de la modificación de las velocidades de las transferencias.

### **Factibilidad**

El proyecto es factible debido a que únicamente se prevé modificar los programas de las transferencias ya existentes, esto se realiza de manera frecuente en la

organización para adaptar el sistema a las diferentes condiciones (internas o externas) que puedan perjudicar el desempeño del sistema.

### **Riesgos**

| Descripción del riesgo  | Probabilidad de ocurrencia | Impacto | Acciones preventivas  |
|---|----------------------------|---------|---|
| El modificar las velocidades puede descompensar el sistema y crear nuevos cuellos de botella. | Alto                       | Alto    | Se realizó un análisis de simulación y se determinó que el impacto en el sistema es positivo y los nuevos cuellos de botella se pueden eliminar fácilmente. |

**Tabla 4.2.** Riesgos relacionados con la modificación de las velocidades de las transferencias.

### **Problemas**

| Descripción del problema                              | Prioridad | Acción requerida para resolver el problema  |
|---|-----------|---|
| Se requiere implementar el proyecto lo antes posible. | Alta      | Presentar y solicitar aprobación a gerencia e implementar el proyecto con línea productiva en funcionamiento. |
| No hay presupuesto asignado para este proyecto.       | Alta      | Se encontró la manera de realizar el proyecto con personal de la planta y sin incurrir en otros gastos.       |

**Tabla 4.3.** Problemas relacionados con la modificación de las velocidades de las transferencias.

### **Supuestos**

Se asume que:

- Las transferencias cuentan con la capacidad de incrementar su tiempo ciclo.
- El personal de mantenimiento cuenta con la experiencia y el conocimiento para llevar a cabo el proyecto.
- El sistema real se comportara como el modelo de simulación.

### **Opción 2: Modificar el brazo del tanque de la gasolina instalándole soportes para reducir la variación en la posición del tanque de gasolina.**

#### **Descripción**

La segunda opción considerada es modificar el brazo que instala el tanque de la gasolina instalándole soportes para reducir la variación que tiene la posición del componente al momento de quererlo ensamblar en las unidades y facilitar la operación para el técnico base y que este pueda instalar el tanque en menos tiempo,

las mejoras se muestran en la figura 4.34. Para implementar esta mejora se requieren los siguientes pasos logísticos:

- Junta de arranque con gerencia para presentar el proyecto y conseguir la autorización y fondos para el proyecto.
- Conseguir un proveedor para que maquile los soportes que aparecen en la imagen en color rojo.
- Conseguir un ingeniero de automatización para que coordine la implementación de los soportes cuando el proveedor los entregue.
- Instalar los soportes el día más próximo en el cual la línea se encuentre parada para evitar contratiempos mayores.
- Validar los cambios con 30 tanques de gasolina para asegurar que sean de las dimensiones adecuadas.
- Contar con soporte y un plan de reacción para el arranque por si el técnico tiene algún problema con los soportes al utilizar el brazo previamente modificado.

### **Ventajas**

La modificación del brazo del tanque de gasolina tiene las siguientes ventajas:

- Reduce la variación en la posición del tanque de gasolina.
- Ayuda a posicionar el tanque de mejor manera en las unidades.
- Reduce el tiempo ciclo de la estación de trabajo.

Se obtendrán los siguientes beneficios tangibles:

| Categoría de la ventaja | Descripción  |
|-------------------------|--|
| Clientes                | Se cumplirán los tiempos de entrega.   |
| Personal                | El brazo es más fácil de manipular y se elimina tensión y estrés para el operario ya que podrá cumplir su tiempo ciclo fácilmente. |
| Económicos              | Se incrementa el presupuesto general de la planta por cada unidad producida y disminuye el costo de operación por unidad.          |

**Tabla 4.4.** Ventajas de la modificación del brazo de tanque de gasolina.

### **Factibilidad**

El proyecto es factible debido a que ya se cuenta con un proveedor capaz de producir los soportes y las medidas de dichos soportes fueron validadas con prototipos que fueron instalados en el brazo del tanque de gasolina durante la operación de 100 tanques de gasolina con resultados satisfactorios en flujo.

### **Riesgos**

| Descripción del riesgo  | Probabilidad de ocurrencia | Impacto | Acciones preventivas   |
|---|----------------------------|---------|--|
| Cualquier defecto en los soportes puede generar un paro de línea mayor.                   | Alto                       | Alto    | Se realizaron prototipos, se probaron y funcionaron al 100% por lo que se validaron los soportes manufacturados por proveedor con estos prototipos y se realizaron mediciones para comprobar que las dimensiones sean las correctas. |
| En caso de que los soportes se dañen, se presentaría el problema de flujo de nueva cuenta | Alto                       | Alto    | El presupuesto presentado incluye partes de reemplazo para 1 año y los soportes fueron diseñados para poder reemplazarse en 3 minutos con línea corriendo.   |

**Tabla 4.5.** Riesgos relacionados con la modificación del brazo de tanque de gasolina.

### **Problemas**

| Descripción del problema                              | Prioridad | Acción requerida para resolver el problema  |
|---|-----------|---|
| Se requiere implementar el proyecto lo antes posible. | Alta      | Presentar y solicitar aprobación a gerencia, mandar manufacturar los soportes e instalarlos el primer día disponible en que la línea no esté en funcionamiento. |
| No hay presupuesto asignado para este proyecto.       | Alta      | Conseguir aprobación extraordinaria por parte de gerencia.  |

**Tabla 4.6.** Problemas relacionados con la modificación del brazo de tanque de gasolina.

### **Supuestos**

Se asume que:

- Proveedor cuenta con capacidad para producir los soportes.
- Los soportes finales tendrán el mismo impacto que los prototipos.

- El personal de mantenimiento cuenta con la experiencia y el conocimiento para llevar a cabo el proyecto.
- El sistema real se comportara como el modelo de simulación.

### **Opción 3: Automatizar el equipo de ciclado de cristales en la estación 919 LH y pasarle labor de la estación 920 LH.**

#### **Descripción**

La tercera opción considerada es automatizar el equipo de ciclado de cristales de puertas ubicado en la estación 919 LH obteniendo una ganancia de 11 segundos de tiempo ciclo y rebalancear 3 tapones de cancelación equivalentes a 5 segundos de tiempo ciclo de la estación 920 LH a la estación 919 LH para dejar ambas estaciones con una carga de trabajo de entre 85 y 90% para poder dar el tiempo ciclo sin inconvenientes.

Para implementar esta mejora se requieren los siguientes pasos logísticos:

- Junta de arranque con gerencia para presentar el proyecto y conseguir la autorización y fondos para el proyecto.
- Conseguir un proveedor para que realice el proceso de automatización en el ciclador de cristales de puertas.
- Realizar el proceso de automatización en el equipo de respaldo lo antes posible.
- Instalar el equipo de respaldo y probarlo en 100 unidades.
- Realizar el proceso de automatización en el equipo de base.
- Instalar el equipo base y probarlo en 100 unidades.
- Contar con soporte y un plan de reacción para el arranque por si el técnico tiene algún problema con los cicladores.
- Realizar el entrenamiento correspondiente para el rebalanceo de los tapones de cancelación durante 1 semana.
- Lanzar el rebalanceo de manera oficial.

#### **Ventajas**

La modificación de los cicladores de cristales y el rebalanceo tienen las siguientes ventajas:

- Se ganan 11 segundos de tiempo ciclo en estación 919 LH.
- Disminuye la carga de trabajo de la estación 920 LH en 5 segundos.
- Ambas estaciones quedan con una carga de trabajo entre el 85 y 90%.
- Ambas estaciones pueden cumplir con su tiempo ciclo.

Se obtendrán los siguientes beneficios tangibles:

| Categoría de la ventaja | Descripción   |
|-------------------------|---|
| Clientes                | Se cumplirán los tiempos de entrega.  |
| Personal                | Los cicladores automatizados son más fáciles de operar y los operarios podrán cumplir con su tiempo ciclo sin tener que sobre esforzarse. |
| Económicos              | Se incrementa el presupuesto general de la planta por cada unidad producida y disminuye el costo de operación por unidad.                 |

**Tabla 4.7.** Beneficios de la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo.

### **Factibilidad**

El proyecto es factible debido a que ya se cuenta con un proveedor capaz de automatizar los equipos y ya se cuenta con aprobación de sindicato para realizar el rebalanceo en las estaciones previamente mencionadas.

### **Riesgos**

| Descripción del riesgo   | Probabilidad de ocurrencia | Impacto | Acciones preventivas  |
|--|----------------------------|---------|---|
| Cualquier defecto en la automatización de los cicladores puede generar un paro de línea mayor. | Alto                       | Alto    | Se contara con soporte de mantenimiento y proveedor para corregir cualquier problema y primeramente se probaran los cambios en el equipo de respaldo, pudiendo utilizar el equipo base en caso de que este falle. |
| En caso de que los cicladores se dañen, se presentaría el problema de flujo de nueva cuenta    | Alto                       | Alto    | El presupuesto presentado incluye partes de reemplazo para 1 año y los cicladores cuentan con su tarjeta de mantenimiento preventivo.   |

**Tabla 4.8.** Riesgos relacionados con la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo.

**Problemas**

| Descripción del problema                              | Prioridad | Acción requerida para resolver el problema   |
|---|-----------|--|
| Se requiere implementar el proyecto lo antes posible. | Alta      | Presentar y solicitar aprobación a gerencia, mandar automatizar los cicladores e instalarlos el primer día disponible en que la línea no esté en funcionamiento. |
| No hay presupuesto asignado para este proyecto.       | Alta      | Conseguir aprobación extraordinaria por parte de gerencia.   |

**Tabla 4.9.** Problemas relacionados con la automatización de cicladores de cristales y rebalanceo.

**Supuestos**

Se asume que:

- Proveedor cuenta con capacidad para automatizar los cicladores.
- El personal de mantenimiento cuenta con la experiencia y el conocimiento para llevar a cabo el proyecto.
- El sistema real se comportara como el modelo de simulación.

**Selección de alternativas de mejora**

Para lograr los objetivos de mejora, se requieren implementar las opciones 1 y 3 obteniendo así un volumen de 8,708 unidades producidas cumpliendo el objetivo de 8,684 unidades.

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1. Conclusiones

Se realizó el diagnóstico de flujo de proceso del área de ensamble final localizando los cuellos de botella del sistema que no le permitían a la compañía alcanzar sus objetivos de flujo. Durante la realización del diagnóstico la herramienta de simulación resultó ser muy útil para este tipo de análisis de flujo de proceso ya que utilizando correctamente las herramientas complementarias que la estadística nos ofrece podemos obtener resultados con una alta correlación al comportamiento del sistema real y realizar inferencias basadas en el modelo con un alto porcentaje de confiabilidad prácticamente con un costo nulo.

Los principales cuellos de botella fueron las velocidades de las transferencias, el brazo del tanque de la gasolina y las estaciones 920 y 921 de línea de puertas, para las cuales se desarrollaron propuestas de mejora que permitieran darle una mayor capacidad a estas estaciones y mejorar el flujo de proceso. Los resultados de la implementación de estas propuestas de mejora se muestran en la tabla 5.1:

| Propuesta de Mejora   | Capacidad Inicial           | Capacidad Final  |
|---|-----------------------------|--|
| Modificación de velocidades de transferencias.  | 8,075 unidades semanales    | 8,331.67 unidades semanales  |
| Mejoras en estaciones 919 y 920 (automatización de cicladores de cristales y rebalanceo). | 8,331.67 unidades semanales | 8,708 unidades semanales (24 unidades por encima del objetivo de la empresa) |

**Tabla 5.1.** Impacto de implementación de las propuestas de mejora 1 y 3.

Se trabajó en el desarrollo de las propuestas de mejora y fueron documentadas utilizando un esquema de casos de negocios y se comprobó que el uso de la metodología de casos de negocios proporciona formalidad y logra una mayor

penetración al momento de querer sugerir proyectos de mejora a las organizaciones donde se realizan este tipo de proyectos de investigación y nos ayudan a descartar opciones que no son atractivas desde los puntos de vista de la factibilidad técnica, operativa o económica.

Posteriormente se realizó la implementación de las propuestas de mejora 1 y 3 (previamente mencionadas en la tabla 5.1) la planta automotriz sometida a escrutinio logro cumplir sus objetivos de flujo incrementando su producción en 7.88% y aumentar su presupuesto ya que este se basa en las unidades producidas.

A lo largo de la elaboración de este trabajo de investigación se cumplieron los objetivos específicos ya que se:

- Determinar la capacidad máxima actual del área estudiada basada en los cuellos de botella y determinar el efecto de cada aspecto que causa paros de línea: la capacidad actual del sistema es de 8,075 unidades de tal manera que produciendo al 93% se obtienen únicamente 7,510 unidades.
- Desarrollar propuestas de mejora de flujo para el área y cuantificar el impacto de cada propuesta de mejora en términos de flujo, realizando el pertinente estudio de costo-beneficio: se realizaron 3 casos de negocios a la empresa con los principales cuellos de botella del sistema y se le presentaron modelos de simulación para pronosticar el impacto de cada mejora.
- Entregar los casos de negocios de las propuestas de mejora para las prioridades basadas en los principales cuellos de botella y los factores que resulten causantes del mayor porcentaje de paros en el sistema: se tuvo una junta de cierre con los gerentes de planta Ford donde se le presentaron 3 casos de negocio y se decidió la implementación de 2 de ellos y se optimizo el flujo de proceso 7.88%.

Se confirmó la hipótesis del proyecto ya que la implementación de las mejoras propuestas impulsaron a la empresa a mejorar sus indicadores de flujo y cumplir con los objetivos corporativos. Se cumplió con el objetivo general del proyecto ya que se localizaron los principales cuellos de botella dentro del área de esta planta automotriz

y se propuso un plan de acciones de mejora con su respectivo análisis de caso de negocios.

Por último cabe resaltar que la investigación realizada superó las expectativas iniciales ya que se consideraba únicamente proponer las alternativas de mejora y plasmarlas en un documento con formato de caso de negocios y se llegó hasta la etapa de implementación y validación de las mejoras implementadas realizando un comparativo entre los resultados reales y los resultados pronosticados por el modelo de simulación obteniendo una alta correlación entre los mismos y probando esta correlación con pruebas de hipótesis.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda utilizar la metodología propuesta en problemas de flujo de proceso donde se pretenda localizar los cuellos de botella mediante el uso de modelos de simulación y herramientas estadísticas y proponer alternativas de mejora, utilizando el enfoque de casos de negocios para tener una mayor oportunidad de que dichas mejoras sean implementadas en las organizaciones sometidas a estudio.

## **5.3. Trabajos futuros**

Para la elaboración de trabajos futuros, se recomienda probar la metodología en empresas de un ramo diferente, diferentes configuraciones productivas (diferente distribución de planta, plantas con alto grado de automatización, empresas con sistemas de trabajo tipo taller, por lotes, etc.) y explorar la gran variedad de herramientas estadísticas disponibles para analizar los datos recabados a lo largo de la investigación. De igual manera se recomienda el uso de otros softwares de simulación o de tratamiento estadístico de los datos para enriquecer el análisis de flujo de proceso y cuellos de botella en sistemas productivos reales.

## REFERENCIAS

Álvarez Salgado, Miriam Elena y García Padilla, Ricardo Mauricio, 2013. *Estudio de la simulación de procesos de producción en ingenios azucareros*. Tesis de Ingeniería en sistemas computacionales de UTN.

Banks, J., J. S. Carson II, B. L. Nelson, and D. Nicol, 2010. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Camarena Luhrs, Margarita, 2014. *La industria automotriz en México*. México D. F.: cuadernos de investigación social de la Universidad Autónoma de México (UNAM).

Cedeña Hernández, Yaitma, Lerma Gómez, Irma, Pupo Proenza, Yamile, Velázquez Mariño, Michel, 1993. *Alternativa metodológica para el tratamiento de problemas de pruebas de hipótesis*. La Habana, Cuba: Información pedagógica del ICCP.

Coss Bu, Raúl, 1998. *Simulación un enfoque práctico*. México D.F.: Editorial Limusa.

De la Garza Toledo, Enrique, 2012. *La situación del trabajo en México, 2012, el trabajo en la crisis*. México D.F.: Plaza y Valdés editores.

Freyssenet, Michel, 2009. *The Second Automobile Revolution*, Palgrave, London, New York.

Gamarra Martínez, Karen Andrea y Jiménez Martínez, Jhon Edison, 2012. *Análisis de dos metodologías para identificar el cuello de botella en procesos productivos*. Santander, España: Universidad Industrial de Santander.

Garcia Dunna, Eduardo, Garcia Reyes, Heriberto y Cárdenas Barrón, Leopoldo Eduardo, 2006. *Simulación y análisis de sistemas con Promodel*. México D.F.: Editorial Pearson

Grau Avalos, Ricardo, 1994. *Estadística aplicada utilizando paquetes de software*. Villa Clara, Cuba: Centro de Documentación e Investigación, Facultad de Matemática, Física y Computación de la Universidad Central de Las Villas.

Grewal, C., S. and Rogers, P., 2009. *Performance Effects of Setup Time Reduction without Decision Variable Re-Optimization: A Simulation-Optimization Study*. Published in *Proceedings of the 2009 Simulation Conference*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Hong, L. J., and B. L. Nelson., 2009. *A Brief Introduction to Optimization via Simulation*. Published in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Ingalls, Ricki G., 2013. *Introduction to simulation*. Published in *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Kohn, R., Noack, D., Mosinski, M., Zhou, Z. and Rose, O., 2009. *Evaluation of Modeling, Simulation and Optimization Approaches for Work Flow Management in*

Semiconductor Manufacturing. Published in Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Lemessi, M., Schulze, T. and Rehbein, S., 2011. Simulation-based optimization of paint shops. Published in Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Lozada Trujillo, Tania, Martínez Martínez, Adriana, Moras Sánchez, Constantino Gerardo, Flores Ávila, Luis Carlos y Sánchez Olivos, Juan Pablo, 2011. Aplicación de simulación para incrementar la productividad de la empresa "La Vieja Molienda de Santa Maty". Revista de la Ingeniería Industrial ISSN 1940-2163.

MacDuffi, John Paul, 2010. Can GM Stage a Comeback. Knowledge Wharton, interview in <http://knowledge-wharton>.

Moeller, A., Prox, M., Schmidt, M. and Lambrecht, H., 2009. Simulation and Optimization of Material Flow Systems. Published in Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Oberkampff, W. L. and J. Roy. 2010. Verification and Validation in Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press.

Ortiz Flores, Fernando, & Gomez Bernardi, Balamero, 2007. Aplicación de la Metodología de Simulación para Sincronizar el Flujo del Producto en una Planta Tipo A con Componentes Compartidos por Medio de la TOC.

Quiroga, Oscar Daniel, Rosseti, Germán, Arcusin, Leticia Milena y Costa, David, 2009. Modelos de simulación para el estudio de empresas productivas. Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial, ISSN 2175-8018.

Sargent, R. G. 2013. Verification and Validation of Simulation Models. Published in Proceedings 2013 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc.

Sargent, R. G. 2011. Verification and Validation of Simulation Models. Published In Proceedings 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc.

Sharda, B. and Bury, S. J., 2008. A discrete event simulation model for reliability modeling of a chemical plant. Published in Proceedings of 2008 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Sharda, B. and Bury, S. J., 2010. Bottleneck analysis of a chemical plant using discrete event simulation. Published in Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Sharda, B. and Bury, S. J., 2011. Best practices for effective application of discrete event simulation in the process industries. Published in Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Vasudevan, K., R. Lote, E. Williams and O. Ulgen., 2009. High Speed Bottle Manufacturing Lines: Case Studies and Simulation Software Selection Techniques. Published in Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Vasudevan, K. and Devikar, A., 2011. Selecting simulation abstraction levels in simulation models of complex manufacturing systems. Published in Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Weigert, G., Henlich, T. and Klemmt, A., 2008. Methoden zur Modellierung und Optimierung von Montageprozessen. Published in Advances in Simulation for Production and Logistics Applications.

Zar, Jerrold H., 1999. Biostatistical Analysis. Editorial Pearson.