



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“REDUCCIÓN DEL INVENTARIO EN PROCESO EN EMPRESAS
MANUFACTURERAS MEDIANTE UN ENFOQUE DE TEORÍA DE
RESTRICCIONES Y SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS”**

PRESENTA:

ING. MIRNA ELIZABETH GARCÍA GARZA

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALFREDO JIMÉNEZ GARCÍA

CODIRECTOR:

M.C. VICENTE FIGUEROA FERNÁNDEZ



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya

CELAYA, GTO, MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019



"2019. Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.

Celaya Gto., **09 SEPTIEMBRE 2019**

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.
Presente.

De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:

**"REDUCCIÓN DEL INVENTARIO EN PROCESO EN EMPRESAS
MANUFACTURERAS MEDIANTE UN ENFOQUE DE TEORÍA DE
RESTRICCIONES Y SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS"**

Presentado por el (a) pasante C. ING. MIRNA ELIZABETH GARCÍA GARZA (M1703066) alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto. Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.

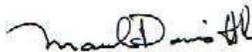

DR. JOSE ALFREDO JIMENEZ GARCIA
Presidente

AFECTAMENTE


SECRETARIA DE
EDUCACION PUBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CELAYA
COORDINACIÓN DE MAESTRÍA
DE INGENIERIA INDUSTRIAL


M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
Secretario


M.C. EDUARDO FLORES MARTINEZ
Vocal


M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA
Vocal Suplente

Ccp. Escolares
Archivo.
VFF*MTE*drvvp



AGRADECIMIENTOS

A MIS ASESORES

Quisiera agradecer a mi asesor el Dr. José Alfredo Jiménez García y codirector el M.C. Vicente Figueroa Fernández, por haber confiado en mí, por compartir su conocimiento y propiciar mi superación académica.

A MIS PROFESORES

Agradezco a todos los profesores pertenecientes al programa de posgrado del departamento de ingeniería industrial por su dedicación, sabiduría y paciencia a lo largo de estos dos años.

A MIS REVISORES

Me gustaría dar las gracias a mis revisores el M.C. Moisés Tapia Esquivias y el Dr. Salvador Hernández González por sus constructivos comentarios y recomendaciones a lo largo de este tiempo, por sus valiosas opiniones sobre mi desempeño y por animarme cada semestre a concluir este trabajo de tesis.

A LA INSTITUCIÓN

Al Tecnológico Nacional de México, por proporcionarme una beca de movilidad del programa 1,000 Jóvenes en la Ciencia para promover mis estudios de posgrado. Al Tecnológico Nacional de México en Celaya, por la formación académica que me otorgó, así como permitirme ingresar a las instalaciones, por el apoyo y servicios que me proporcionó. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado la beca de maestría con número (CVU): 848834

DEDICATORIA

A MI ESPOSO

Edgar A. Vázquez Rodríguez, siendo la mayor motivación en mi vida encaminada al éxito, por su incondicional apoyo y aportación no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida. Por el ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto personales como profesionales. Por confiar en mí y en mis fortalezas, por darme amor, cariño y mantenerse siempre a mi lado.

A MIS PADRES

Jaime García Sierra y Zamira E. Garza López, estoy especialmente agradecida con ellos por mostrarme el camino de la sabiduría y de las oportunidades, por darme educación y un hermoso hogar donde crecer, desarrollarme y donde adquirí los valores que hoy me definen. Sin ustedes este mérito no se hubiese conseguido.

A MIS HERMANOS

Zamira M. García Garza y Jaime I. García Garza, quienes siempre estuvieron apoyándome en todo momento y supieron darme sus muestras de cariño sin importar la distancia, que con su amor y paciencia me han enseñado a salir adelante.

ÍNDICE

Capítulo 1	Marco de referencia	1
1.1.	Introducción	2
1.2.	Antecedentes	3
1.3.	Planteamiento del problema.....	4
1.4.	Objetivos	4
1.4.1.	Objetivo general	4
1.4.2.	Objetivos específicos	4
1.5.	Hipótesis	5
1.6.	Justificación	5
1.7.	Alcances y limitaciones	5
Capítulo 2	Marco teórico.....	7
2.1.	Modelos de manufactura.....	8
2.1.1.	Definición de manufactura	8
2.1.2.	Industrias manufactureras.....	8
2.1.3.	Medidas de desempeño.....	9
2.1.4.	Tiempo de ciclo	9
2.1.5.	Inventario en proceso.....	10
2.1.6.	Productividad de la manufactura	10
2.2.	Teoría de restricciones	12
2.2.1.	Filosofía de Teoría de restricciones.....	12
2.2.2.	Definición de restricción	13
2.2.3.	Tipo de restricciones.....	14
2.2.4.	Herramientas de teoría de restricciones.....	15

2.2.5.	Los cinco puntos focales de teoría de restricciones.....	16
2.2.6.	Indicadores económicos de teoría de restricciones.....	19
2.3.	Sistema Tambor–Cuerda-Amortiguador.....	21
2.3.1.	Definición del sistema DBR.....	21
2.3.2.	Definición de cuello de botella.....	22
2.3.3.	Estrategia DBR.....	23
2.3.4.	Tambor	23
2.3.5.	Amortiguador	24
2.3.6.	Cuerda.....	26
2.4.	Simulación	27
2.4.1.	Definición de simulación.....	27
2.4.2.	Aplicaciones de la simulación	28
2.4.3.	Sistemas, modelos y simulación.....	29
2.4.4.	Elementos del sistema	30
2.4.5.	Simulación de eventos discretos.....	32
2.4.6.	Ventajas y desventajas de la simulación de eventos discretos	32
2.4.7.	Etapas para el desarrollo del proyecto de simulación.....	34
2.5.	ProModel®	37
2.5.1.	Definición de ProModel®	37
2.5.2.	Elementos básicos del modelado.....	38
2.5.3.	Elementos operacionales	45
2.6.	Estado del arte.....	51
Capítulo 3	Metodología.....	58
3.1.	Método de trabajo	59

Capítulo 4	Resultados	64
4.1.	CASO 1. SISTEMA DE FABRICACION DEL PRODUCTO M Y N.....	65
4.1.1.	Descripción del sistema de manufactura	65
4.1.2.	Etapa 1. Definir las características de funcionamiento del sistema.....	66
4.1.3.	Etapa 2. Recolección y análisis de datos	67
4.1.4.	Etapa 3. Construcción y verificación del modelo.....	67
4.1.5.	Etapa 4. Validación del modelo.....	71
4.1.6.	Etapa 5. Experimentación con base en la filosofía de TOC	71
4.1.7.	Etapa 6. Documentación y presentación de resultados.....	75
4.2.	CASO 2. EMPRESA PRODUCTORA DE FLECHAS DE VELOCIDAD CONSTANTE (CVJ).....	80
4.2.1.	Descripción del sistema de manufactura	80
4.2.2.	Etapa 1. Definir las características de funcionamiento del sistema.....	81
4.2.3.	Etapa 2. Recolección y análisis de datos	85
4.2.4.	Etapa 3. Construcción y verificación del modelo.....	89
4.2.5.	Etapa 4. Validación del modelo.....	92
4.2.6.	Etapa 5. Experimentación con base en la filosofía de TOC	95
4.2.7.	Etapa 6. Documentación y presentación de resultados.....	101
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones	106
	REFERENCIAS	109
	ANEXO	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación de una línea de producción con cuello de botella.....	13
Figura 2.2. Los cinco puntos focales	18
Figura 2.3. Representación de los tipos de amortiguadores	26
Figura 2.4. Elementos de un sistema	32
Figura 2.5. Etapas de un proyecto de simulación	35
Figura 2.6. Menú construcción del modelo	38
Figura 2.7. Menú para declaración de entidades	39
Figura 2.8. Menú para declaración de locaciones	40
Figura 2.9. Menú de tiempo de parada por reloj	41
Figura 2.10. Menú de tiempo de parada por entradas	41
Figura 2.11. Menú de tiempo de parada por uso	42
Figura 2.12. Menú de tiempo de alistamiento	42
Figura 2.13. Menú para las redes de recorridos.....	43
Figura 2.14. Menú para los recursos.....	44
Figura 2.15. Menú para el proceso	46
Figura 2.16. Menú de operaciones lógicas	47
Figura 2.17. Menú de movimientos lógicos	48
Figura 2.18. Menú de Arribos	48
Figura 2.19. Ventana para definir variables	49
Figura 3.1. Método de investigación	63
Figura 4.1. Representación del sistema de manufactura	65
Figura 4.2. Estaciones y locaciones de llegada del modelo	68
Figura 4.3. Entidades del modelo	68
Figura 4.4. Llegadas del modelo	68
Figura 4.5. Variables globales del modelo	69
Figura 4.6. Representación del layout del sistema actual.....	71
Figura 4.7. Estado de los recursos (General report. Location states Single).....	72
Figura 4.8. Estado de los recursos después de explotar el recurso cuello de botella (General report. Location states Single).....	72

Figura 4.9. Representación del layout del modelo aplicando la metodología DBR.....	74
Figura 4.10. Layout del modelo final	75
Figura 4.11. Resultados del inventario en proceso en cada uno de los sistemas analizados.....	76
Figura 4.12. Resultado de las unidades producidas en cada uno de los sistemas analizados.	77
Figura 4.13. Resultado de los costos de inventario en cada uno de los sistemas analizados. ...	78
Figura 4.14. Resultado del throughput en cada uno de los sistemas analizados.	78
Figura 4. 15. Diagrama de flujo de la entidad a través del sistema línea 2	80
Figura 4. 16. Representación del layout en la línea 2.....	81
Figura 4.17. Tamaño de muestra calculado en software Minitab.....	86
Figura 4.18. Resultados de la curva y la prueba de bondad de ajuste	89
Figura 4.19. Entidades del modelo	89
Figura 4.20. Locaciones y conveyor dentro del modelo.....	90
Figura 4.21. Red que permite el movimiento de los operarios por sus estaciones	90
Figura 4.22. Recursos del modelo	91
Figura 4.23. Representación del layout y declaraciones del proceso en el sistema actual	91
Figura 4.24. Variables globales del modelo	92
Figura 4.25. Representación del layout del sistema actual.....	92
Figura 4.26. Cálculo del número de replicas	94
Figura 4.27. Diagrama de tiempo de piezas procesadas.....	95
Figura 4.28. % Operación recurso restrictivo (General report. Location states Single).....	96
Figura 4.29. Registro máximo de piezas antes de la restricción (General report. Location)	97
Figura 4.30. Diagrama de tiempo conveyor 8.1	98
Figura 4.31.% Operación de la restricción después de explotarla (General report).....	98
Figura 4.32. Representación del layout del modelo aplicando el amortiguador al recurso restrictivo	99
Figura 4.33. Diagrama de tiempo conveyor 8	100
Figura 4.34. Representación del layout del modelo aplicando la metodología DBR.....	101
Figura 4.35. Resultados del inventario en proceso en cada uno de los sistemas analizados...	102
Figura 4.36. Resultado de las unidades producidas en cada uno de los sistemas analizados. .	103
Figura 4.37. Resultado de los costos de inventario en cada uno de los sistemas analizados. .	103

Figura 4.38. Resultado del throughput en cada uno de los sistemas analizados.	104
Figura 4.39. Porcentaje de mejora en caso 1 y caso 2	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Artículos tecnológicos relevantes.....	51
Tabla 4.1. Tiempo de procesamiento.....	67
Tabla 4.2. Instrucciones de procesamiento.....	69
Tabla 4.3. Interacción entre recurso y operación.....	83
Tabla 4.4. Muestreo de tiempos de inspección realizados por el operario 4.....	86
Tabla 4.5. Muestreo obtenido de tiempos de inspección realizados por el operario 4.....	87
Tabla 4.6. Tiempo de procesamiento.....	87
Tabla 4.7. Tiempo de inactividad	88
Tabla 4.8. Piezas procesadas sistema real y modelado.....	93

Resumen

Dentro de las principales necesidades de las empresas manufactureras se encuentran la introducción de estrategias y herramientas que logren mejorar los recursos y procesos de producción, con el fin de generar mayores ingresos, atender las necesidades del cliente y aumentar su nivel de competitividad. El alto WIP y los bajos ingresos originados por una inadecuada administración de sus recursos restrictivos, es una de las situaciones que se presentan en las empresas manufactureras que impiden su desarrollo óptimo. Tomando en cuenta dicha problemática, el presente trabajo propone una metodología basada en sistemas de programación de mejoramiento continuo conocido como DBR y simulación de eventos discretos mediante el uso del software ProModel®. A través de la aplicación de estos principios, se busca reducir el nivel del WIP, aplicando la metodología para el desarrollo de proyectos de simulación exitosos propuesto por los autores Harrell, Ghosh y Bowden, alterando las variables de producción e identificando los recursos restrictivos en el sistema. En este trabajo se logra identificar las restricciones en dos casos de estudio, armonizando cada una de las operaciones al ritmo que demanda el cuello de botella con ayuda de un escenario de simulación, obteniendo como resultado una reducción en el WIP en más del 50%, una reducción en los costos de inventario y con ello, un incremento en el throughput y en las utilidades netas.

Abstract

In the manufacturing companies, within their main needs, it is considered the introduction of strategies and tools to improve the management of resources and production processes, in order to generate higher revenues, meet the needs of the client and increase their level of competitiveness. The high WIP and low income caused by inadequate management of its restrictive resources, is one of the situations that occur in manufacturing companies that its optimal development. Taking this problem into account, this article proposes a methodology based on continuous improvement programming systems known as DBR and simulation of discrete events through the use of ProModel® software, with the purpose of determining the minimum levels of work in process in manufacturing companies. Through the application of these principles, we seek to determine the minimum level of WIP, applying mainly the technique for the development of successful simulation projects such as the authors Harrell, Ghosh, and Bowden, altering the variables of production and Identifying Restrictive resources in the system, because is what mainly affects WIP control. In this work it is possible to identify the restrictions in two cases of study, harmonizing each of the operations at the rate required by the bottleneck with the help of a simulation scenario, obtaining as a result a reduction in the WIP by more than 50%. a reduction in inventory costs and with it, an increase in throughput and in net profits.

Capítulo 1

Marco de referencia

1.1. Introducción

Con el fin de lograr un buen nivel de competencia, las empresas manufactureras buscan controlar sus recursos, además de mantener y mejorar los planes de producción y los niveles de cumplimiento, así como reducir inventarios de materias primas y productos terminados. La mala administración de las “restricciones” es una de las causas que impide a las empresas manufactureras lograr su máximo rendimiento y eficiencia en sus sistemas de producción. En este sentido, se tiene conocimiento de una filosofía que ayuda a determinar una mejor forma de administrar dichas restricciones, conocida como teoría de restricciones (TOC, por sus siglas en inglés). “La Teoría de Restricciones es todo un proceso de mejoramiento continuo, basado en un pensamiento sistémico, que ayuda a las empresas a incrementar sus utilidades con un enfoque simple y práctico, identificando las restricciones para lograr sus objetivos, y permitiendo efectuar los cambios necesarios para eliminarlos” (Goldratt & Cox, 1993).

Existen algunas herramientas de dicha filosofía, las cuales ayudan a resolver las problemáticas de restricción en los sistemas de producción, una de ellas es el sistema de programación Drum, Buffer, Rope (DBR por sus siglas en inglés). (García, Vázquez, Albertón, & Jaime, 2010) Señalan que el sistema DBR consiste en liberar material en función del requerimiento de menor productividad, si esta producción es menor a la demanda del cliente este se transforma en el recurso cuello de botella del sistema, el cual impacta principalmente en el control del inventario en proceso (WIP, por sus siglas en inglés), ya que, si la sincronización de los recursos no corresponde al cuello de botella, el tiempo de producción del sistema disminuye y el WIP aumenta.

La reducción del inventario en proceso conduce a una mayor liquidez, un mejor flujo de efectivo, un mejor servicio al cliente y menores riesgos comerciales (Breyfogle , 2014). Por ello, existe un gran número de sistemas y herramientas aplicados para la gestión y reducción del inventario en proceso, por ejemplo, en (Pergher & Roehe Vaccaro, 2014) se logra controlar el niveles de WIP en una empresa metal-mecánica utilizando simulación con la herramienta IRIS y el método electreTRI, igualmente en (Kissani & Bouya, 2014) se llevó a cabo la gestión del WIP mediante el sistema Kanban y

simulación por medio del software ProModel®, en una compañía dedicada al cableado de arneses. Por otro lado, en (Saraswat, Kumar, & Kumar Sain, 2015) se hizo uso de la herramienta mapeo de flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés), logrando reducir el WIP y el tiempo ciclo en una empresa dedicada a la producción de rodamientos, por mencionar algunas aplicaciones.

Por otro lado, (Palma & Forradellas, 2009) señala que en los últimos años han aparecido una serie de herramientas vinculadas a la simulación que han tenido un rápido crecimiento en su adaptación en los medios industriales para mejorar la calidad de proceso de toma de decisión. Recientemente (Herrera-Vidal, Campo-Juvinao, Bernal-Hernandez, & Tilves-Martinez, 2018) utiliza un enfoque de teoría de restricciones con consideraciones de optimización para detectar el recurso restrictivo y mejorar la toma de decisiones y análisis de la rentabilidad en una empresa del sector plástico. Por ello, la principal contribución de este trabajo es reducir el inventario en proceso, mediante modelos de simulación de eventos discretos específicamente el software ProModel® y el sistema DBR, alterando las variables de producción, logrando identificar cuellos de botella, buscando la disminución en WIP y un aumento en el throughput en un sistema de producción ficticio y un sistema de producción real.

1.2. Antecedentes

Durante las últimas décadas se han desarrollado un gran número de metodologías para la mejora continua las cuales son utilizadas para mejorar la calidad y desempeño de toda organización, algunas de estas metodologías son conocidas como, Administración de la calidad total (TQM, por sus siglas en inglés), Justo a tiempo (JIT, por sus siglas en inglés) y teoría de restricciones. Cada una de ellas se trata de filosofías administrativas con diversas características, ventajas y desventajas. A diferencia de dichas filosofías, la teoría de restricciones se destaca por enfocarse en reducir y eliminar los recursos restrictivos que impiden a la organización ganar dinero.

El principio de esta filosofía fue conocida a finales de los 70's como Tecnología de Producción Optimizada (OPT, por sus siglas en inglés), un software comercial para la programación de una organización, el cual dio a conocer la importancia de reconocer y eliminar los cuellos de botella en las empresas. Una gran cantidad de compañías importantes como Ford motor Company, General Electric Company, Texas Instrument, Lucent Company, entre otras, han replicado dicha lógica reportando grandes éxitos. Ese fue el inicio de teoría de restricciones, lo cual llevo a desarrollar entre otros, los cinco puntos focales para la mejora continua y el sistema DBR para la planeación y control de la producción.

1.3. Planteamiento del problema

El alto nivel de inventario en proceso y los bajos ingresos originados por una inadecuada administración de sus recursos restrictivos, son algunas de las situaciones que se presentan en las empresas manufactureras que impiden su desarrollo óptimo. Tomando en cuenta dicha problemática, el presente trabajo propone una metodología basada en sistemas de programación de mejoramiento continuo conocido como, DBR y simulación de eventos discretos mediante el uso del software ProModel®, con la finalidad de reducir el inventario en proceso y aumentar los niveles de throughput.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Reducir el inventario en proceso para disminuir los costos de manufactura mediante un enfoque de teoría de restricciones y simulación de eventos discretos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar y analizar los indicadores claves involucrados al sistema en un caso de estudio.
- Desarrollar modelos de simulación que permitan analizar los niveles actuales del inventario en proceso.

- Identificar la(s) posible(s) restricciones que impiden aprovechar al máximo la productividad del sistema.
- Analizar y reducir los niveles de inventario en proceso en diferentes escenarios de simulación.

1.5. Hipótesis

Al hacer uso del sistema de programación DBR, así como herramientas de simulación de eventos discretos en procesos de producción manufactureros, se logrará una disminución en los costos de producción ocasionados por un alto nivel de inventario en proceso.

1.6. Justificación

Una de las principales necesidades de las empresas manufactureras es la introducción de estrategias y/o herramientas que logren optimizar los recursos y procesos de producción, con el fin de generar mayores ingresos, atender las necesidades del cliente y aumentar su nivel de competitividad. El alto inventario en proceso y los bajos ingresos originados por una inadecuada administración de sus recursos restrictivos, es una de las situaciones que se presentan en las empresas manufactureras que impiden su desarrollo óptimo.

A través de este trabajo se aplicarán los principios de teoría de restricciones que se manejan actualmente, para determinar el nivel mínimo de inventario en proceso mediante el desarrollo de modelos de simulación de eventos discretos. Esto permitirá analizar y disminuir el inventario en proceso en diferentes escenarios, esto con el fin de reducir los costos de producción.

1.7. Alcances y limitaciones

El alcance de este trabajo comprende la experimentación de un modelo de producción manufacturero ficticio y un modelo de producción real, aplicando metodología propuesta por medio del simulador ProModel®. Debido a la limitación de tiempo y de información

por parte de la empresa, se determinó analizar únicamente una de las líneas de producción y un número de parte del producto que se fabrica. Además, las sugerencias de mejora no serán implementadas por el momento, únicamente se obtuvieron resultados en modelos de simulación.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Modelos de manufactura

Los autores en (García-Velázquez, Pineda-Domínguez, & Andrade-Vallejo, 2015) destacan que, la industria manufacturera ha sufrido cambios significativos a lo largo de las últimas dos décadas, en los cuales hemos sido testigos de una variedad de técnicas y estrategias que logran una mejora en la administración y operación de los procesos, esto, dado a la estricta demanda por parte de los clientes en cuestión de calidad, servicio y costos, además de la competencia que existe entre empresas dedicadas a la manufactura. Debido a la demanda de producción que se presentó durante la devastación a causa de la segunda guerra mundial Henry Ford da a conocer la manufactura de operación sincronizada, el cual establecía mantener un flujo de producción sincronizada; la importancia de eliminar los desperdicios, es decir todo aquello que se presenta en exceso en el ambiente manufacturero, posteriormente las estrategias se enfocaron en cómo reducir los costos, y el tiempo de producción, generar más producto y con mejor calidad.

2.1.1. Definición de manufactura

La manufactura a lo largo de los años se ha hecho referencia a la actividad humana que genera productos en grandes cantidades en masa el uso de maquinaria avanzada y técnicas destinadas a ello. El autor (Groover, 2007) define este término como, la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de uno o más operaciones de procesamiento o Ensamblado.

La clave es que la manufactura agrega valor al material cambiando su forma o propiedades, o mediante combinar materiales distintos también alterados. La clave de la manufactura es agregarle valor económico a la materia prima, para transformarlo en producto terminado y con ello genera ingresos.

2.1.2. Industrias manufactureras

La manufactura es una actividad importante, pero no se lleva a cabo solo por sí misma, Se ejecuta como una actividad comercial de las compañías que venden productos a los

clientes. El tipo de manufactura que una empresa realiza depende de la clase de producto que fabrica.

Esta relación se va a analizar primero con el examen de los tipos de industrias manufactureras, y después con la identificación de los productos que generan. La industria consiste en empresas y organizaciones que producen o suministran bienes y servicios. Las industrias se clasifican como primarias, secundarias o terciarias.

El autor Harrell, Ghosh, & Bowden (2000) señala que comprender cómo modelar los sistemas de fabricación requiere un conocimiento de la terminología que se usa en las industrias manufactureras.

2.1.3. Medidas de desempeño

La mayoría de las empresas manufactureras consta de varias operaciones de procesamiento para ser realizadas por diferentes máquinas bajo una secuencia específica. Las dos medidas de rendimiento más importantes en un proceso como ese son el tiempo de ciclo y el inventario en proceso, los cuales se definen a continuación.

2.1.4. Tiempo de ciclo

Los autores (Hopp & Spearman, 2001) señalan que el tiempo de ciclo es la cantidad de tiempo que un trabajo pasa por el sistema, es decir el tiempo que transcurre desde el inicio del proceso hasta el final de todo el proceso y es denotado como CT . Debe hacerse una distinción de notación entre el tiempo de ciclo de fábrica promedio denotado como CT y el tiempo de ciclo promedio en la estación de trabajo i (la i -ésima agrupación de máquinas idénticas) denotado como $CT(i)$. Por lo tanto, los TC son el tiempo promedio que un trabajo pasa dentro de la fábrica, ya sea procesado en una estación de trabajo o esperando en una cola de estación de trabajo; mientras que $CT(i)$ es el tiempo promedio que se gasta el trabajo en la estación de trabajo i más el tiempo promedio que se gasta en la estación de trabajo en cola.

Donde, $CT(i)$ es el tiempo promedio que un trabajo pasa en la cola frente a la estación de trabajo y $T_s(i)$ denota el tiempo de servicio (o tiempo de procesamiento) en la estación de trabajo i , para la variable aleatoria T , el subíndice “ s ” se refiere a "servicio".

2.1.5. Inventario en proceso

El inventario en proceso representa el inventario que ya ha recibido algún valor agregado, pero que todavía debe sufrir un procesamiento adicional antes de poder utilizarlo para atender la demanda de los clientes y es denotado como WIP . La medición de inventario es un tipo de herramienta que ayuda a controlar la eficiencia de los procesos. De esta manera se tiene la oportunidad de incrementar la productividad, aumentando las ganancias y disminuyendo los costos de producción.

2.1.6. Productividad de la manufactura

“La productividad de la manufactura mide qué tan eficiente la organización de la manufactura produce resultados utilizando los recursos que tienen a su disposición. La productividad se mide como una relación entre el dinero gastado y el dinero ganado. Es decir, los gastos operativos para el throughput. Por lo tanto, si la manufactura se vuelve más efectiva generará más ingresos por menos gasto, lo que generará un beneficio neto adicional.” (Woepfel, 2001).

El autor (Tompkins, 1992) menciona que, el tiempo de entrega, los costos de producción y control de producción e inventarios son requisitos importantes para llegar a una producción exitosa. Reducir significativamente los tiempos de entrega, los costos de producción y los inventarios, además de mantener un control sobre ellos, llevará a la empresa a lograr el éxito.

En un proceso de fabricación se involucran tres tipos de tiempo los cuales son esenciales de comprender para lograr una adecuada reducción de tiempo, el primero es el tiempo de fabricación, la cual hace referencia al tiempo que transcurre desde que la materia

prima se encuentra lista para la primera operación, hasta que finalizan todas las operaciones necesarias para el proceso de fabricación.

El segundo lleva por nombre tiempo de producción, que es el tiempo que transcurre desde que se ordenan los materiales necesarios, hasta que finalizan todas las operaciones necesarias para el proceso de fabricación. Por último, el tiempo de entrega al cliente, que es el tiempo que transcurre desde que el cliente ordena el producto hasta que lo recibe. El conocimiento y medición de cada uno de ellos será de gran ayuda para comenzar a analizar los tiempos y lograr una reducción significativa.

El autor Tompkins (1992) señala que algunas empresas tratan de reducir el tiempo de entrega simplemente obligando a su personal a trabajar más rápido, lo cual es un error, el autor establece el siguiente procedimiento que debe de seguirse para reducir de forma significativa los tiempos de entrega:

- Identificar y poner por escrito los tiempos de entrega a los clientes actuales. Se recomienda un diagrama de flujo en el que se establezca todo lo que está ocurriendo durante este tiempo.
- Análisis de la competencia. Conocer los tiempos de entrega de la competencia nacional y extranjera.
- Establecer una meta. La meta debe incluir compromiso de reducir dicho plazo mediante el análisis y métodos para hacer negocios.
- Identificar los cuellos de botella. En el diagrama de flujo deben transcribirse las metas de cada actividad. Para asegurarse que se cumple la meta con respecto al plazo final, el resultado de la suma de los tiempos por reducir en cada actividad debe ser menor que la reducción necesaria para cumplir con la meta.

“La clave para reducir el tiempo de fabricación de un producto consiste en reducir su tiempo de estancia, esto es, el tiempo que transcurre entre la operación que se ha terminado y el comienzo de la siguiente. El tiempo de estancia en el tiempo de espera y el tiempo de manejo de material” (Tompkins, 1992).

2.2. Teoría de restricciones

La Teoría de restricciones también conocida como TOC (por sus siglas en inglés), consiste en una filosofía administrativa, creada y desarrollada por el Dr. Eliyahu Goldratt en su famoso libro *La meta*, un proceso de mejora continua, el cual se publicó en 1984, en donde se presentan principios globales sobre la manufactura, partiendo de la historia, aplicando la lógica para poder responder a la pregunta ¿qué estamos haciendo mal?

Dicha teoría se dio a conocer principalmente como una solución a los problemas de producción, denominado en un inicio como manufactura sincrónica. Sin embargo, el desarrollo y un buen funcionamiento de este modelo en los procesos llevo a la implementación de esta teoría en otros campos de la organización, como lo es las finanzas, gerencia de proyectos, mercado, vetas, compras, logística y recursos humanos. TOC es un enfoque de administración sistemático que se enfoca en la gestión activa de los cuellos de botella que impiden el progreso de una empresa hacia su objetivo de maximizar las ganancias y utilizar sus recursos de manera efectiva (Pandit & Naik, 2009).

2.2.1. Filosofía de Teoría de restricciones

El autor Goldratt E. es considerado el primero en utilizar el término de teoría de restricción en su libro *La meta* (1993) donde lo define como, es todo un proceso de mejoramiento continuo, basado en un pensamiento sistémico, que ayuda a las empresas a incrementar sus utilidades con un enfoque simple y práctico, identificando las restricciones para lograr sus objetivos, y permitiendo efectuar los cambios necesarios para eliminarlos.

Dicha teoría sostiene que cualquier sistema en organizaciones tiene al menos una restricción, el cual impide a la empresa crecer y generar recursos, una restricción es todo aquello que impide o limita a conseguir un objetivo. En el proceso de manufactura la restricción es todo aquello que impide el cumplimiento de producción de la demanda también es conocido como cuello de botella. La capacidad de cada una de las etapas de

un sistema no dependerá de su propia capacidad, sino de la capacidad del cuello de botella.

En las empresas manufactureras los procesos de producción tienen una capacidad específica en cada uno de los procesos operativos, en la mayoría de los procesos existe un proceso que limita o restringe el rendimiento de la operación completa, la Figura 2.1 representa una línea de producción de tres estaciones, en la cual la materia es procesada por la estación 1, la cual tiene la capacidad de producir seis unidades por hora, posteriormente pasan a la estación 2, la cual puede producir únicamente dos unidades por hora, y por último la estación tres la cual puede procesar cuatro unidades por hora. Con ello podemos observar como la estación 2 obstruye y limita el rendimiento de la estación 3 y con ello de toda la línea de producción.

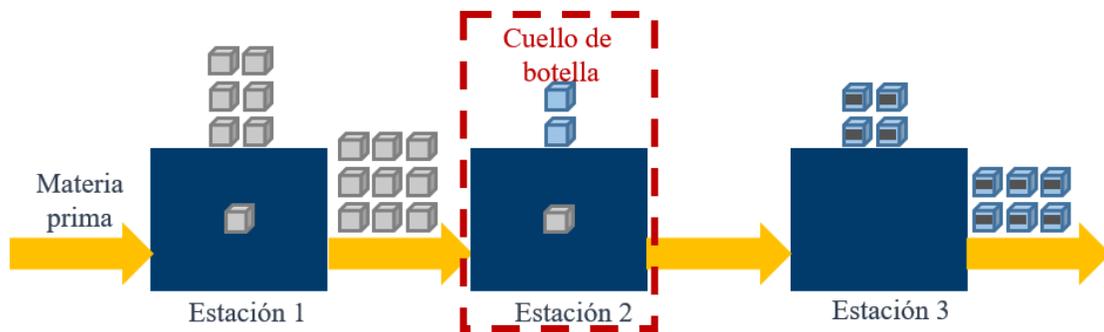


Figura 2.1. Representación de una línea de producción con cuello de botella
Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Definición de restricción

“Una restricción es, en términos generales, cualquier factor que limita a la compañía para alcanzar su objetivo. En el caso de casi todas las empresas, ese objetivo es hacer dinero, lo que se manifiesta en un incremento del rendimiento, lo cual se logra gracias a las ventas, no solo a la producción” (Chapman, 2006). Cada sistema debe tener al menos una restricción, si esto no fuera así, cada una de las empresas con fines de lucro, podrían obtener ganancias ilimitadas. Por lo tanto, una restricción es: “cualquier cosa que limite a un sistema para lograr su meta”. Si existe una o más restricciones en un sistema, esto representa oportunidad de mejora. A diferencia de otros sistemas, la teoría de

restricciones ve las restricciones como algo positivo, dado que el flujo del sistema completo depende de la capacidad que tenga el cuello de botella, una reducción gradual de las restricciones mejorará el desempeño del sistema.

Este método se ha desarrollado desde un método de planeación de manufactura hasta una filosofía de gestión de manufactura, para generar soluciones de sentido común a los problemas. Desde la perspectiva de sistema de negocios, la teoría de restricciones enfatiza tres dimensiones: Mentalidad, Indicadores y Metodología (Boyd & Gupta, 2004)

- ***Mentalidad*** ¿Cuál es la meta del sistema?

Una de las principales suposiciones de teoría de restricciones es que toda organización tiene la meta de “ganar más dinero, tanto ahora como en el futuro” sin violar ciertas condiciones necesarias.

- ***Indicadores*** ¿Cómo debe de ser medido el desempeño del sistema? La teoría de restricciones propone un grupo de medidas operacionales llamados indicadores: throughput, inventario y gastos de operación.
- ***Metodología*** ¿Cómo el sistema puede ser mejorado continuamente? Establece que toda organización tiene por lo menos una restricción.

2.2.3. Tipo de restricciones

Toda fuente de restricción puede clasificarse dentro de una de las siguientes tres categorías: políticas, recurso y material. El autor Woepel (2001) describe tres tipos de restricciones: política (paradigma), recurso (físico), y material. Los cuales se tratarán con detalle a continuación:

- ***Restricciones de política***

Una restricción política es una regla, medida o condición que dicta el comportamiento de la organización. Las restricciones de política son, por mucho, el tipo de restricción de mayor prevalencia (90%) y son los menos costosos de arreglar. Reglas de tamaño de

lote, pautas de utilización de recursos, y las reglas de configuración pueden considerarse restricciones de política cuando impiden a la organización lograr un mayor rendimiento.

- ***Restricciones de recursos***

Las restricciones de recursos son mucho menos comunes (8%) que las restricciones de política. En más de 10 años de implementar la gestión de restricciones, he visto menos de cinco restricciones de recursos reales. La mayoría de las organizaciones tienen mucha más capacidad de lo que ellos se dan cuenta. No lo ven porque se consume y se almacena. El sello de exceso de capacidad es el exceso de inventario en proceso y productos terminados en inventario. Si tiene exceso de inventario, tiene exceso de capacidad.

- ***Restricciones de material***

Las limitaciones de material son las menos comunes. Estas son generalmente cosas como materiales escasos, pero también puede ser un material comúnmente disponible que se encuentra en escasez de suministro debido a problemas en la cadena de suministro.

2.2.4. Herramientas de teoría de restricciones

Una parte esencial de teoría de restricciones la constituye un conjunto de herramientas administrativas, las cuales fueron desarrolladas a partir del proceso mental, que pueden ser empleadas para mejorar de manera significativa las habilidades gerenciales como; la comunicación efectiva al romper las barreras de información creadas entre los departamentos o áreas que se relacionan entre sí; lograr el cambio al designar los equipos de trabajo para lograr objetivos cada vez más ambiciosos; motivar e incluir al personal dentro de una organización para sugerir soluciones viables, al asignar responsabilidades y autoridad.

Los procesos lógicos de pensamiento TOC nos proporcionan una serie de pasos que combinan relaciones causa-efecto con nuestra experiencia e intuición para ganar un mayor conocimiento, empezando con la observación de lo que nos rodea. Esta teoría contiene dos componentes principales, uno de ellos es el que se enfoca en su filosofía el

cual corresponde a cinco etapas de mejora continua (Five focussing steps) conocida como Tambor-Cuerda-Amortiguador y el sistema de gestión de amortiguadores el cual es usualmente utilizado en logística. El segundo componente es llamado proceso de pensamiento (Thinking Process) el cual es enfocado a temas de investigación, análisis y resolución de problemas complejos.

2.2.5. Los cinco puntos focales de teoría de restricciones

El autor (Goldratt E. M., 1990) desarrolló una metodología que se conoce como los cinco puntos focales de TOC en el proceso de mejora continua para lograr reducir las limitaciones de rendimiento que se pueden presentar en una organización debido a sus restricciones. Para optimizar de manera apropiada el sistema de producción establece los siguientes cinco pasos:

1. Identificar la(s) restricción(es).
2. Decidir cómo explotar la(s) restricción(es) del sistema.
3. Subordinar todos los demás a la decisión anterior.
4. Elevar la(s) restricción(es) del sistema.
5. Si, en los pasos anteriores, se rompe una restricción, regresar al paso uno.

1. Identificar la(s) restricción(es)

Este primer punto consiste en que recursos son los que limitan el desempeño del sistema. Implica conocer el impacto que la restricción tenga en la meta de la organización. Para la identificación de la restricción el autor Woeppe (2001) formulo un par de preguntas, las cuales facilitara la detección de las mismas:

- ¿Dónde está respaldado el trabajo? ¿Dónde están esperando las pilas de trabajo?
- ¿Dónde parecen originarse la mayoría de los problemas?
- ¿Hay algún recurso con alta utilización? En muchas plantas, mucho del esfuerzo se gasta en el seguimiento de la utilización de los recursos. ¿Cuál (es) tiene (n) más alto?

- ¿Hay un recurso "clave"? A veces el liderazgo de producción ha decidido que ciertos recursos son "críticos" o recursos clave, y si no mantienen ese recurso en funcionamiento, otros recursos se morirán de hambre.

2. Decidir cómo explotar la(s) restricción(es) del sistema

Una vez detectada la restricción, resulta evidente el segundo paso: decidir cómo explotar a restricción del sistema. Este punto se refiere en otras palabras a aprovechar al 100% el recurso cuello de botella. La fuente más obvia de tiempo perdido es el tiempo de inactividad. Es el más fácil de encontrar y arreglar. Elimine todo el tiempo de inactividad en el recurso de restricción. Esto, en sí mismo, tendrá un impacto dramático en la línea de fondo. Menos obvio es el tiempo perdido en producción. "La salida del sistema está limitada por la tasa de rendimiento en la restricción" (Mohammadi & Eneyo, 2012).

El autor Woepel (2001) sugiere formular las siguientes preguntas para facilitar la decisión de cómo explorar la(s) restricción(es):

- ¿Está produciendo inventario para ser vendido en la próxima semana?
- ¿Estás siendo "eficiente" con las configuraciones, produciendo inventario para ventas futuras, mientras que las órdenes actuales se ven obligadas a esperar?
- ¿Tienes el mejor operador que ejecuta este recurso? Si, de hecho, este recurso es la restricción, tiene sentido tener a la mejor persona ejecutándola.

3. Subordinar todos los demás a la decisión anterior

Después de determinar cómo explotar las restricciones, el siguiente paso consiste en administrar la mayoría de los recursos del sistema, las no restrictivas, de tal forma que todo lo que consume o requiera la restricción será por los demás recursos. Este paso consiste en subordinar toda la acción a la decisión del paso número dos; realizar una administración efectiva de la restricción como prioridad y revisar estas acciones continuamente. Es importante no detenerse en este paso solo por obtener resultados, ya que el proceso de mejora continua aún no ha terminado.

4. Elevar la(s) restricción(es) del sistema

Este paso consiste en romper la restricción, como por ejemplo aumentar su capacidad, al romper la restricción esta ya no limitará al sistema. “Cuando esté seguro de que el vínculo más débil se ha explotado por completo, busque más capacidad (equipo, personas, tiempo). Se debe considerar una inversión adicional solo después de estar seguro de que ha hecho lo mejor que puede al romper las restricciones” (Woepfel, 2001).

5. Regresar al paso uno

Si se ha roto una restricción en los pasos anteriores, regresar al paso uno sin permitir que la inercia del sistema cree una nueva restricción. Este punto tiene una advertencia, no permitir que la inercia cree una nueva restricción. “Eventualmente, romperá la restricción y aparecerá una nueva. Si se desea una mejora continua, deben identificarse y romperse continuamente restricciones. Recuerde que las reglas de ayer se convirtieron en las limitaciones de hoy” (Woepfel, 2001). En la Figura 2.2 podemos observar el ciclo que se debe cumplir para obtener los resultados esperados en la implementación de esta herramienta.



Figura 2.2. Los cinco puntos focales
Fuente: Elaboración propia

2.2.6. Indicadores económicos de teoría de restricciones

La teoría de restricciones establece que el objetivo de una organización es hacer dinero ahora y en el futuro. Sin embargo, alcanzar la meta requiere también que se cumplan algunas condiciones necesarias para no poner en riesgo el producto que se genera, como por ejemplo conservar la calidad de los productos o servicios; mantener un ambiente de trabajo seguro para los trabajadores; mantener un flujo de efectivo sano, etc. Los autores Goldratt & Fox, (1986) (Goldratt E. M., 1990) establecen medidas globales (financieras) y operativas:

Medidas de desempeño financieras:

- **Throughput (T):** El dinero producido por el sistema se llama Throughput. Es todo el dinero generado por el sistema. Algunos se refieren a él como el valor añadido. Es la tasa a la cual el sistema genera ganancias por medio de sus ventas. La fórmula para calcular el throughput es: ventas menos el total de los costos de materia prima o los totalmente variables. Las ventas son válidas cuando la empresa puede disponer de ganancias, lo que significa que producir meramente para invertirlo no forma parte del throughput. “El throughput de todo el sistema está limitado por la restricción” (Woeppe, 2001).
- **Inventario (I):** Todo el dinero que el sistema invierte en la compra de cosas que pretende vender, incluyendo las instalaciones, maquinaria y equipo, así como el costo variable del inventario. El costo de mano de obra directa para la producción del inventario no forma parte del inventario según TOC. Esta definición difiere de la tradicional en dos aspectos: la primera el inventario no agrega valor a los materiales mientras son procesados y la segunda, incluye únicamente los materiales que la empresa pueda vender, no se contabilizan consumibles como los son herramientas de corte, lubricantes, equipo de limpieza, etc. ya que la empresa no pretende transformar estos productos para venderlos y generar throughput.
- **Gastos de operación (OE):** Todo el dinero que el sistema gasta para poder transformar el inventario throughput. Esta definición de gasto de operación

incluye no solo mano de obra directa, sino también la gerencia, las computadoras e incluso las secretarías. Todos los gastos operativos aparecen los sueldos de directores, gerentes, personal operativo, renta, energía eléctrica, teléfono, etc.

La estrategia principal de teoría de restricciones para alcanzar la meta de ganar dinero en el presente y en el futuro es considerar los siguientes cambios: incrementar el throughput, reducir el inventario y reducir los costos operativos. Lo más importante es incrementar el throughput a través de las ventas.

Medidas de desempeño operativas:

Además de estos tres indicadores existen dos relaciones o indicadores que miden el desempeño de una empresa (Villagómez, Viteri, & Medina, 2012) (Goldratt E. M., 1990), las cuales pueden vincularse a las medidas globales del sistema: ganancia neta y rendimiento de la inversión, productividad y la rotación de inventario (Stein, 2003).

El beneficio neto (NP) es igual al throughput menos el gasto operativo (ver ecuación 2.1) y representa el dinero que la empresa ha ganado después de restar los costos de materia prima y los gastos de operación.

$$NP = T - OE \quad (2.1)$$

El rendimiento de la inversión (R) es igual al beneficio neto dividido por el inventario (ver ecuación 2.2) lo cual muestra cuánto dinero se ha ganado con respecto al dinero que se ha invertido en el sistema.

$$R = NP/I \quad (2.2)$$

La productividad (P) es el beneficio neto dividido por el Gasto Operativo (ver ecuación 2.3)

$$P = NP/OE \quad (2.3)$$

Las rotaciones de inventario (IT) son throughput dividido por inventario (ver ecuación 2.4) el cual mide que tan efectiva es la transformación de inventario o inversiones de materiales cuando se convierten en throughput.

$$IT = T/I \quad (2.4)$$

Mientras más alto sea este valor significa que se tiene un flujo más rápido de producción, lo cual reduce los tiempos de entrega.

2.3. Sistema Tambor–Cuerda-Amortiguador

La teoría de restricciones propone una solución para recursos con diferente capacidad y para los cuales es imposible eliminar la variabilidad y los eventos aleatorios, la solución es denominada Tambor-Cuerda-Amortiguador (DBR, por sus siglas en inglés), el cual consiste en grandes rasgos, en atar un extremo de la cuerda al líder de la tropa y el otro extremo al explorador más lento, que representa la restricción, de esta manera aseguramos que el líder no pueda avanzar más delante de lo que le permite el tamaño de la cuerda. Los exploradores detrás del explorador más lento podrían alcanzar siempre el paso de este ya que son más rápidos y pueden cerrar rápidamente los espacios que se llegan a formar temporalmente, en este caso los más rápidos son obligados a bajar el paso avanzar más lento.

Volviendo a la analogía el tamaño de la cuerda que une al líder con el niño más lento representa el inventario en proceso ya que la cuerda lo limita. La distancia entre el líder y los niños más rápidos al niño más lento es considerada el amortiguador de la restricción. A continuación, se tratarán los temas relacionados con esta analogía y los principios de este sistema.

2.3.1. Definición del sistema DBR

El nombre del método se basa en metáforas desarrolladas en La Meta (Goldratt & Cox, 1993). El sistema DBR fue desarrollado para reconocer la restricción del sistema y propone una planeación de producción con el fin de reducir el tiempo de control en la programación de las operaciones, evitando la transmisión de fluctuaciones en el proceso. Este consta de tres elementos Tambor, Cuerda y Amortiguador.

En las empresas manufactureras para controlar y planificar la producción son comúnmente usados sistemas conocidos como Planeación de los recursos de manufactura (MRPII, por sus siglas en inglés), así como el sistema Justo a tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), sin embargo la implementación de estos requiere tiempo y costos algo elevados, además tienen la desventaja de no reconocer ni administran efectivamente la restricción del sistema, no se identifican las restricciones y tampoco reciben atención especial para eliminarlas. Esta acción limita la habilidad de estos sistemas para generar niveles mayores de throughput y mantener al mismo tiempo bajos niveles de inventario en proceso y gastos de operación.

El poder del sistema de producción DBR radica en estar basado en los conceptos de administración de las restricciones y su enfoque en el impacto global de las decisiones. La flexibilidad del sistema permite la aplicación del DBR en empresas manufactureras universalmente. Para desarrollar un correcto plan de producción se requieren de los siguientes tres aspectos importantes:

1. Requerimientos de información actualizada de la demanda
2. Debe existir un suministro de materiales suficiente para soportar el plan de producción
3. El flujo propuesto no debe exceder la capacidad de los recursos

2.3.2. Definición de cuello de botella

Se considera que el cuello de botella es la estación de trabajo que tiene la mayor utilización o la mayor relación entre el tiempo de procesamiento requerido y el tiempo disponible. En un sentido más amplio, un cuello de botella puede ser cualquier restricción o factor limitante (un operador, un sistema de transporte) en la producción de bienes.

“Un cuello de botella se define como cualquier recurso cuya capacidad sea menor que su demanda. Un cuello de botella es una restricción en el sistema que limita la producción. En el proceso de manufactura, es el punto donde el caudal se adelgaza hasta

ser una corriente flaca. Un cuello de botella puede ser una máquina, falta de trabajadores capacitados o una herramienta especial.” (Chase & Jacobs, 2010).

Los recursos cuello de botella son los que determinan la capacidad de la planta y la clave es equilibrar tal capacidad con respecto a la demanda del mercado, y a partir de ello balancear el flujo de la producción de todos los recursos al ritmo del cuello de botella y aprovecharlos al máximo.

2.3.3. Estrategia DBR

Para la construcción de un plan DBR se debe tener en cuenta dos aspectos fundamentales. El primer punto es la habilidad de la empresa para ejecutar el plan de producción durante un tiempo preestablecido, y el segundo es cómo reacciona la empresa ante las desviaciones imprevistas, pero presentes el flujo de producción.

El autor (Schragwneim & Ronen, 1990), propone tres pasos para programar la producción de manera sencilla haciendo uso del sistema DBR, los cuales se muestran a continuación:

- a. Desarrollo del plan de producción, que sea consistente con las restricciones del sistema (Tambor)
- b. Protección del throughput del sistema de las fluctuaciones, determinando el tamaño del amortiguador de tiempo en los puntos críticos del sistema (Amortiguador)
- c. Programar la liberación de material al ritmo de la restricción, atando la producción de todos los recursos al ritmo del tambor (Cuerda)

2.3.4. Tambor

El principal recurso es el tambor el cual marca el ritmo del sistema completo. El tambor debe armonizar los requerimientos del cliente con las restricciones del sistema. Para ello es necesario primero identificar el cuello de botella del sistema y enfocarse a determinar el ritmo con respecto a él. De lo contrario se presentarán intervalos de tiempo en los

recursos limitados serán mayores a la capacidad disponible, entorpeciendo el flujo de producción planeado.

Para definir el tambor es necesario principalmente identificar los recursos cuello de botella, posteriormente determinar la mejor manera para modificar el plan maestro de la producción, de acuerdo a la capacidad de los recursos. “Tratemos al principal recurso con restricción de capacidad como si fuera el tambor. Su velocidad de producción funge como el ritmo del tambor para toda la planta.” (Goldratt & Cox, 1993).

2.3.5. Amortiguador

El tiempo que el amortiguador dirige a proteger las entregas prometidas para los pedidos, de las variaciones inevitables de la planta es su objetivo primordial. Para ello es necesario tener claro que la meta no se basa en lograr que el flujo actual de producción sea exactamente igual al planeado, sino asegurarse que el flujo actual de producción sea suficiente para satisfacer la demanda. El sistema DBR a través del empleo de amortiguadores de tiempo logra proteger el sistema de casi todas las eventualidades que se presentan.

Existen dos formas de clasificar los amortiguadores la primera es amortiguador de tiempo la cual representan el tiempo extra, planificado para la entrega y requerido en la producción, y las preparaciones para que los materiales alcancen los puntos específicos en el flujo de los materiales. Colocados estratégicamente, los amortiguadores de tiempo están diseñados para proteger el throughput del sistema de las desviaciones inherentes a los procesos.

Y el segundo es el amortiguador de stock son inventarios de productos específicos, que se mantienen en forma de producto terminado, producto en proceso o en materia prima para cumplir en menor tiempo con las fechas de entrega de los pedidos. En comparación con los amortiguadores de stock, los amortiguadores de tiempo son más sencillos de administrar, ya que los amortiguadores de stock requieren ser monitoreados

constantemente y ajustados a los requerimientos de los clientes, para evitar tener productos incorrectos en el amortiguador y terminar con piezas obsoletas.

Existen tres tipos de amortiguadores de tiempo, los cuales se definirán a continuación y se representan en la Figura 2.3:

- ***Amortiguador de embarque***

Este amortiguador es utilizado para proteger los embarques de los pedidos terminados: además es utilizado para determinar el programa inicial o tambor de la restricción y la cuerda para la liberación de los materiales, que no pasen por el amortiguador de la restricción ni por el de ensamble.

- ***Amortiguador de restricción***

Es utilizado para proteger la restricción y para determinar la liberación de los materiales de todas las operaciones, que pasen por la restricción.

- ***Amortiguador de ensamble***

Este amortiguador es utilizado para garantizar que las operaciones de ensamble alimentadas por la restricción no esperen a los materiales provenientes de otros recursos. Además, determina la liberación de los materiales.

Cálculo del amortiguador

El amortiguador es igual al tiempo de proceso de una parte más un tiempo para la variación normal y un tiempo para acomodar la contención de recursos. El tiempo de proceso debe incluir el transporte, el tiempo de proceso real y el tiempo de configuración, nada más. El tiempo de variación normal (Ley de Murphy) es el tiempo que toma recuperarse de un problema típico. La contención de recursos es un tiempo adicional para tener en cuenta la disponibilidad no instantánea de recursos cuando llega la tarea (Woepfel, 2001) (Goldratt E. M., 1990).

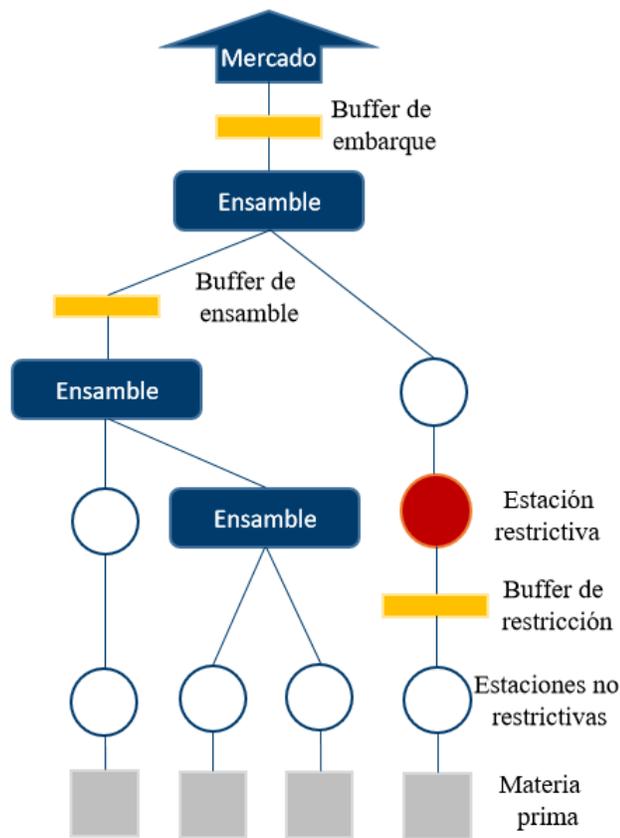


Figura 2.3. Representación de los tipos de amortiguadores
Fuente: Chase & Jacobs, 2010

Estas reglas de oro le permitirán establecer el amortiguador inicialmente. El único medio eficaz para determinar la "corrección" del tamaño del amortiguador es gestionarlo activamente. La gestión de amortiguador tiene dos componentes: una reunión diaria y un proceso de informe. La reunión diaria determina el plan de acción a corto plazo para lograr la entrega a tiempo. El proceso de presentación de informes muestra tendencias hacia que los recursos se conviertan en cuellos de botella

2.3.6. Cuerda

El último elemento del sistema DBR es llamado cuerda el cual su función consiste en comunicar efectivamente a través de toda la fábrica las acciones requeridas para apoyar el programa del tambor. Cada estación de trabajo debe estar sincronizada con los

requerimientos del plan maestro de la producción, de tal forma que el plan pueda ejecutarse.

El mecanismo de la cuerda enfoca la función de control tan solo a las áreas críticas mantiene la información y el nivel de información del detalle al mínimo requerido, esto ayudando a garantizar que los recursos de capacidad sin restricción se utilicen correctamente y no sobre activados y desubicados.

2.4. Simulación

El desarrollo que se ha presentado en los últimos años, tanto en el área de la computación como en el área de la tecnología, ha llevado a mejorar los procesos y productos de forma permanente. Los autores (García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013) señalan que una de las técnicas para el desarrollo de pruebas piloto, con resultados rápidos y de bajo costo, se basan en la modelación, conocida también como simulación, la cual se ha visto beneficiada por los nuevos avances. A continuación, se tratan temas de gran importancia para el desarrollo de un proyecto de simulación.

2.4.1. Definición de simulación

La simulación es la utilización de un modelo de sistemas, que trata de acercarse más a las características de la realidad, a fin de reproducir la esencia de las operaciones reales. Asimismo, es la una representación de un proceso real, mediante el empleo de un modelo o sistema que reaccione de la manera similar a la que reaccionaría uno real, en un conjunto de condiciones dadas (Coss Bu, 2010) (Flores & Bernardi, 2006). García et al (2013) definieron simulación como: un gran conjunto de métodos y aplicaciones que buscan imitar el comportamiento de sistemas reales, general ente por medio de una computadora con un software apropiado.

El uso de simulación es adecuado cuando el tamaño y complejidad del problema, impide el uso de técnicas de optimización de procesos, así como en aplicaciones en las que, la experimentación o réplica del proceso es bastante caro. A lo largo del tiempo la simulación ha sido implementada para el análisis de modelos de filas de espera,

inventarios, distribución de planta y mantenimiento. “La visualización, mediante la animación por ordenador, de los resultados de la simulación proporciona credibilidad y acceso inmediato a los resultados, de forma más concreta y amable que la proporcionada por el análisis de tediosos listados o visiones estáticas de la evolución de los sistemas” (Piera, Guasch, Casanovas, & Ramos, 2013).

2.4.2. Aplicaciones de la simulación

A continuación, el autor Piera et al (2013) describe algunas áreas en las que se han aplicado la simulación como herramienta para la toma de decisiones estratégicas u operativas.

“Fabricación: Una de las áreas en donde tradicionalmente se ha aplicado intensivamente la simulación es en el campo de los procesos de fabricación y los sistemas de manipulación de materiales. Los aspectos específicos que se pueden estudiar son:

- **Las necesidades de equipo y/o personal:** número y tipo de máquinas para alcanzar un determinado objetivo, planificación de las tareas del personal, entre otras.
- **Análisis de rendimiento: análisis de producción;** análisis del tiempo en el sistema; análisis de los cuellos de botella.
- **Evaluación de estrategias operacionales:** planificación de la producción; políticas de gestión de inventarios; estrategias de control; políticas de control de calidad.

Redes de distribución: En el mundo de las corporaciones virtuales, ya no son las empresas productoras las que compiten entre sí, sino las redes de distribución, ya que dependen de un conjunto de suministradores, recursos de transporte, fábricas y almacenes para su correcto funcionamiento.

Transporte: Es un área con un interés creciente en las técnicas de simulación, ejemplos de simulación se pueden encontrar en todos los modos de transporte, ya sea aéreo,

marítimo o terrestre. Estas empresas emplean la simulación para racionalizar sus circuitos de transporte y planificar mejor sus operaciones.

Sanidad: Es cada vez más fuerte la presión sobre el entorno sanitario para controlar los costos manteniendo o mejorando los niveles de servicio, el principal reto es incrementar la eficiencia en sus operaciones. La simulación es una herramienta adecuada para el análisis y la ayuda a la toma de decisiones por su capacidad para modelar estas relaciones y los factores aleatorios inherentes a estos sistemas.

Negocios: La simulación se aplica con éxito en el proceso administrativo propios a empresas de servicio como lo son los bancos, empresas de seguros y administración, como puede ser la circulación de documentos, la estimación de riesgos, etc.”

2.4.3. Sistemas, modelos y simulación

En este apartado se va a profundizar más en los conceptos principales que han aparecido desde la definición misma de simulación:

Sistema: es un conjunto de elementos que interactúan entre sí para lograr funcionar como un todo (García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013).

Modelo: es una representación simplificada de la realidad diseñada para representar, conocer y predecir propiedades del objeto real (Coss Bu, 2010). La descripción de las características de interés de un sistema se conoce como modelo del sistema y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se conoce como modelado (Herrera, 2013).

Modelos de simulación: Existen distintos modelos de simulación, podemos tener modelos físicos o modelos matemáticos, los cuales pueden diferenciarse según el tipo de ecuaciones matemáticas. Los modelos se clasifican en modelos continuos y modelos discretos los cuales se definen a por los autores (Law & Kelton, 1991), a continuación:

- **Modelos discretos:** Un sistema discreto es aquel para el cual las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo, por ejemplo, el número de clientes en el banco, solo cambian cuando llega un cliente o cuando un cliente termina de atenderse y se va.

- **Modelos continuos:** Un sistema continuo es aquel para el cual las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo, por ejemplo, un avión que se mueve por el aire es un ejemplo de un sistema continuo, ya que variables de estado como la posición y la velocidad pueden cambiar continuamente con respecto al tiempo.

2.4.4. Elementos del sistema

Un sistema lo componen cuatro elementos esenciales para la construcción y comprensión de este, los cuales son definidos por el Harrell et al (2000) de la siguiente manera:

Entidades: Las entidades son los elementos procesados a través del sistema, como productos, clientes y documentos. Diferentes entidades pueden tener características únicas tales como costo, forma, prioridad, calidad o condición. Las entidades se pueden subdividir en los siguientes tipos:

- Humano o animado (clientes, pacientes, etc.).
- Inanimado (partes, documentos, papeleras, etc.).
- Intangible (llamadas, correo electrónico, etc.).

Para la mayoría de los sistemas de fabricación y servicio, las entidades son elementos discretos. Este es el caso de la fabricación de piezas discretas y ciertamente es el caso de casi todos los sistemas de servicios que procesan clientes, documentos y otros.

Actividades: Las actividades son las tareas realizadas en el sistema que están directa o indirectamente involucradas en el procesamiento de las entidades. Las actividades generalmente consumen tiempo y a menudo implican el uso de recursos. Las actividades se pueden clasificar como:

- Procesamiento de la entidad (check-in, tratamiento, inspección, fabricación, etc.).

- Movimiento de entidad y recursos (viaje en montacargas, montando en un elevador, etc.).
- Ajustes de recursos, mantenimiento y reparaciones (configuraciones de máquina, reparación de copiadora, etc.).

Recursos: Los recursos son el medio por el cual se realizan las actividades. Proporcionan las instalaciones de apoyo, el equipo y el personal para llevar a cabo las actividades. Si bien los recursos facilitan el procesamiento de la entidad, los recursos inadecuados pueden restringir el procesamiento al limitar la velocidad a la que puede tener lugar el procesamiento. Los recursos tienen características tales como capacidad, velocidad, tiempo de ciclo y confiabilidad. Al igual que las entidades, los recursos se pueden categorizar como:

- Humano o animado (operadores, médicos, personal de mantenimiento, etc.).
- Inanimado (equipo, herramientas, espacio en el piso, etc.).
- Intangible (información, energía eléctrica, etc.).

Los recursos también se pueden clasificar como dedicados o compartidos, permanentes o de consumo, y móviles o estacionarios.

Controles: Los controles dictan cómo, cuándo y dónde se realizan las actividades. Los controles imponen orden en el sistema. En el nivel más alto, los controles consisten en horarios, planes y políticas. En el nivel más bajo, los controles toman la forma de procedimientos escritos y lógica de control de la máquina. En todos los niveles, los controles proporcionan la información y la lógica de decisión sobre cómo debe funcionar el sistema. Ejemplos de controles incluyen

- Secuencias de enrutamiento.
- Planes de producción.
- Programas de trabajo.
- Priorización de tareas.
- Hojas de instrucciones.

En la Figura 2.4 se puede visualizar la interacción que existe entre ellas, estos elementos definen el *quien*, *qué*, *dónde*, *cuándo* y *cómo* es procesada la entidad.

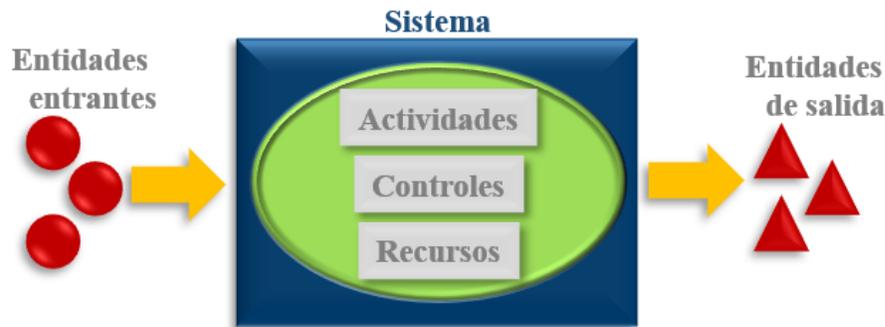


Figura 2.4. Elementos de un sistema
Fuente: Harrell, Ghosh, & Bowden, 2000

2.4.5. Simulación de eventos discretos

“Este proceso consiste en relacionar los diferentes eventos que pueden cambiar el estado de un sistema bajo estudio por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas del problema que se esté analizando. Por ejemplo, un proceso de inspección donde sabemos estadísticamente que 0.2 % de los productos tiene algún tipo de defecto, puede simularse con facilidad mediante una simple hoja de cálculo, al considerar estadísticas de rechazos y productos sin defecto, y al asignar una distribución de probabilidad con 0.2 % de oportunidad de defecto para cada intento de inspección” (García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013).

“La simulación de eventos discretos se refiere al modelado de un sistema a medida que evoluciona a lo largo del tiempo mediante una representación en la que las variables de estado cambian instantáneamente en momentos separados en el tiempo” (Law & Kelton, 1991).

2.4.6. Ventajas y desventajas de la simulación de eventos discretos

La simulación es una de las herramientas que se pueden utilizar para analizar y tomar decisiones en cuanto al comportamiento del proceso al modificar las variables

relacionadas. Sin embargo, como toda herramienta la simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación que se le dará.

Los autores García et al (2013), describen algunas ventajas y desventajas más comunes que ofrece la simulación, las cuales se citan a continuación.

Ventajas:

- a) Es muy buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin necesidad de llevarlos a cabo en la realidad.
- b) Mejora el conocimiento del proceso actual ya que permite que el analista vea cómo se comporta el modelo generado bajo diferentes escenarios.
- c) Puede utilizarse como medio de capacitación para la toma de decisiones.
- d) Es más económico realizar un estudio de simulación que hacer muchos cambios en los procesos reales.
- e) Permite probar varios escenarios en busca de las mejores condiciones de trabajo de los procesos que se simulan.
- f) En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución.
- g) En la actualidad los paquetes de software para simulación tienden a ser más sencillos, lo que facilita su aplicación.

Desventajas:

- a) Aunque muchos paquetes de software permiten obtener el mejor escenario a partir de una combinación de variaciones posibles, la simulación no es una herramienta de optimización.
- b) La simulación puede ser costosa cuando se quiere emplearla en problemas relativamente sencillos de resolver, en lugar de utilizar soluciones analíticas que se han desarrollado de manera específica para ese tipo de casos.
- c) Se requiere bastante tiempo por lo general meses para realizar un buen estudio de simulación; por desgracia, no todos los analistas tienen la disposición (o la oportunidad) de esperar ese tiempo para obtener una respuesta.

- d) Es preciso que el analista domine el uso del paquete de simulación y que tenga sólidos conocimientos de estadística para interpretar los resultados.
- e) En algunas ocasiones el cliente puede tener falsas expectativas de la herramienta de simulación, a tal grado que le asocia condiciones similares a un video juego o a una bola de cristal que le permite predecir con exactitud el futuro.

2.4.7. Etapas para el desarrollo del proyecto de simulación

Para el desarrollo de un proyecto exitoso de simulación, es recomendable llevar a cabo la ejecución de una serie de actividades, para ello se consideran las etapas propuestas por (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2000). En la Figura 2.5 se muestra el diagrama general de las etapas propuestas por el autor las cuales permiten llevar a cabo una correcta planeación y coordinación del proyecto de simulación.

Etapa 1. Análisis del sistema

En esta etapa se definen las variables relacionadas con el modelo, además de determinar la relación entre estas, conocer los alcances y limitaciones que el modelo podría presentar. Para ello es necesario llevar a cabo un diagrama del sistema, el cual ayuda a conocer las fronteras, las restricciones, sus elementos, las variables involucradas y los recursos que lo componen.

Etapa 2. Recolección de datos

La recolección de datos es una de las etapas más críticas, ya que es necesario definir con claridad y exactitud los datos que el modelo requiere para producir los resultados deseados y que estos sean confiables. Los datos requeridos pueden ser tomados de bases de datos históricos, registros contables, ordenes de trabajo, órdenes de compra u opiniones de expertos. De no contar con información es necesario realizar experimentación y/o un estudio estadístico.

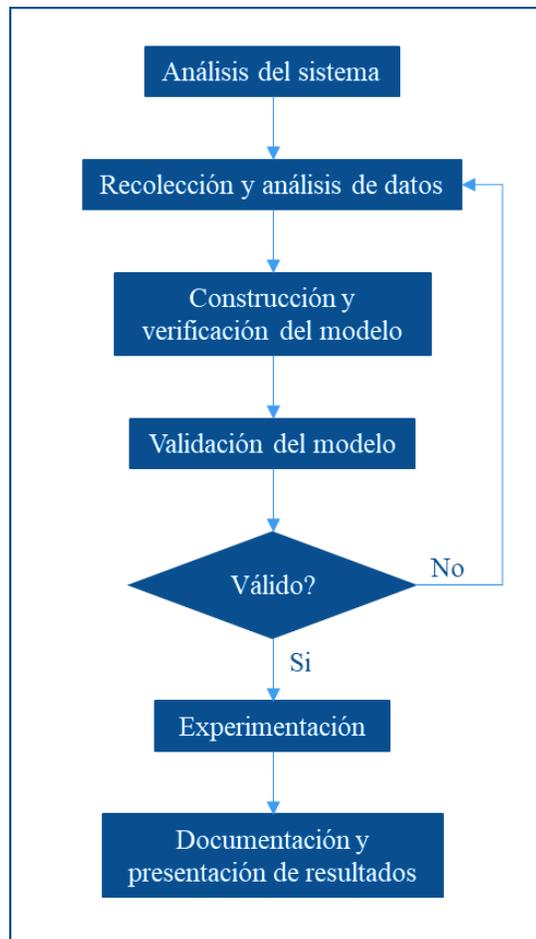


Figura 2.5. Etapas de un proyecto de simulación
Fuente: Elaboración propia

Etapas 3. Análisis de datos

La etapa tres consiste en estudiar los datos recolectados, con el fin de conocer el comportamiento estadístico de los mismos. El análisis de los datos puede llevarse a cabo mediante un software analizador de datos el cual ayuda a conocer las características de las variables. La independencia, la homogeneidad y la estacionalidad son comportamientos que deben estar bien definidos para cada una de las variables del modelo y continuar con la construcción del modelo

Etapas 4. Construcción de modelo en software especializado

En esta etapa se elabora un modelo del sistema lo más similar posible al problema propuesto, integrando la información obtenida a partir del análisis de los datos. Además

de determinar cuáles son los elementos que deben ser incluidos al modelo y la forma de representar los elementos del sistema en el modelo.

Etapa 5. Verificación del modelo

La verificación del modelo es un proceso necesario que evalúa todos los parámetros utilizados en la simulación, para corroborar que funcionan correctamente. Dado que la simulación requiere operaciones de programación que involucra distribuciones de probabilidad complejas, cualquier cambio puede ocasionar que la simulación se comporte muy diferente a lo que se espera.

Etapa 6. Validación del modelo

La validación del modelo consiste en llevar a cabo pruebas para demostrar que el modelo es una representación semejante al sistema real o propuesto, como es el caso. La validación se lleva a cabo haciendo una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y la información de salida del modelo respecto a los datos reales.

Etapa 7. Experimentación

Esta etapa busca probar y evaluar el comportamiento del sistema, llevando a cabo un análisis de sensibilidad para validar que se presentan los mejores resultados de acuerdo al objetivo propuesto.

Etapa 8. Documentación y presentación de resultados

Una vez realizado el análisis de los resultados, se debe recopilar toda la información y documentación del modelo. En ella se deberá incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas a las variables, todos sus alcances y limitaciones, todas las consideraciones de la programación. Además, agregar sugerencias y resultados obtenidos del modelo. Por último, se presentan las conclusiones del proyecto de simulación.

2.5. ProModel®

El uso de modelos en computadora para representar o simular cualquier tipo de sistemas de procesos puede ser posible solamente con el uso de esfuerzo e ingenio por parte del usuario, además del uso adecuado de un software especializado para el modelaje de procesos de manufactura facilita al análisis y desarrollo del mismo. La selección y conocimiento de una adecuada herramienta de simulación facilitará el proceso de modelaje y la obtención de resultados deseados y confiables, siendo capaz de llevar a cabo simulaciones de procesos controlados y programadas con base en sistemas como Justo a tiempo, sistemas de empujar y jalar, logística, teoría de restricciones como es el caso, entre otros.

2.5.1. Definición de ProModel®

ProModel® es un paquete de simulación comercial potente, pero fácil de usar, diseñado para modelar eficazmente cualquier sistema de procesamiento de eventos discretos. Según el autor García et al (2013), ProModel® es uno de los paquetes de software comerciales para simulación más usados en el mercado. Cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar. Básicamente, este producto se enfoca a procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros.

En ProModel®, un modelo consta de entidades (los elementos que se procesan), Locaciones (los lugares donde se procesa), recursos (agentes utilizados para procesar y mover entidades) y rutas (pasillos y vías por las que atraviesan las entidades y los recursos). Los diálogos están asociados con cada uno de estos elementos de modelado para definir el comportamiento operativo, como las llegadas de entidades y la lógica de procesamiento. Los horarios, tiempos de inactividad y otros atributos también se pueden definir para entidades, recursos y ubicaciones.

Algunas aplicaciones típicas de ProModel® son las siguientes:

- Líneas de ensamble
- Sistemas de manufactura flexible
- Producción por lotes
- Justo a tiempo (JIT) y Sistemas de producción KANBAN.
- Sistemas de colas. (Para servicios o manufactura tales como líneas de empaque).

2.5.2. Elementos básicos del modelado

Para el desarrollo de este trabajo, utilizaremos la clasificación de objeto simple empleada por ProModel®, los cuales son definidos por el autor Harrell et al (2000), (García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013) de la siguiente manera:

Build:

El menú *Build* es uno de los más utilizados ver Figura 2.6, en él se especifican las características del modelo; como por ejemplo locaciones, entidades, recursos, arribos, procesos, etc.

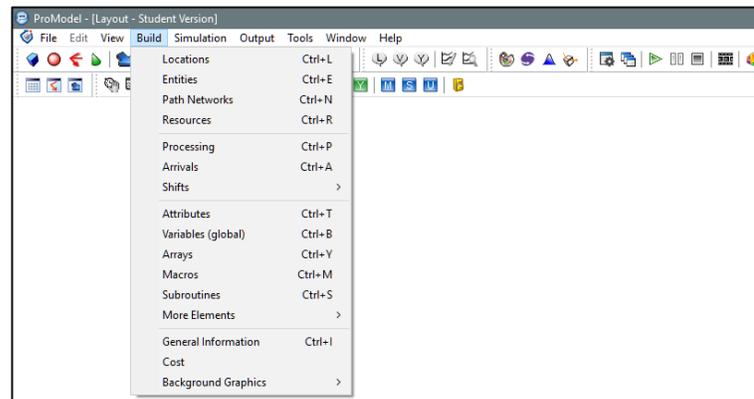


Figura 2.6. Menú construcción del modelo
Fuente: ProModel, 2006

Entidades:

Las entidades son los objetos procesados en el modelo que representan las entradas y salidas del sistema. Las entidades en un sistema pueden tener características especiales tales como velocidad, tamaño, condición, etc. Las entidades siguen una o más rutas

diferentes en un sistema y tienen procesos realizados en ellas. Pueden llegar desde fuera del sistema o crearse dentro del sistema.

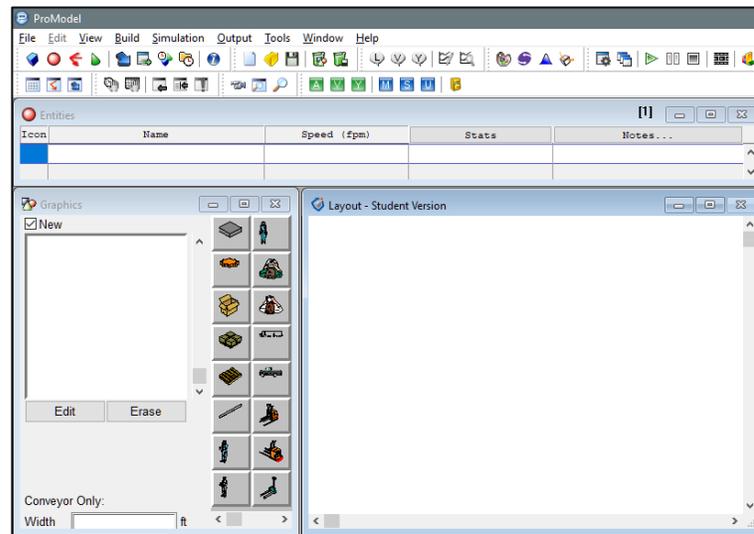


Figura 2.7. Menú para declaración de entidades
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.7 se muestra el menú de entidades, en él, es necesario declarar la siguiente información:

- **Icon:** Se asigna un gráfico deseado para representar la entidad seleccionada
- **Name:** Se especifica el nombre que llevará la entidad.
- **Speed:** Velocidad a la cual la entidad se desplaza en el modelo (150 predeterminado).
- **Stats:** seleccionar el nivel que sea necesario:
 - None**, no se recogen estadísticas.
 - Basic**, solamente se muestra la utilización y el promedio del tiempo.
 - Time Series**, Calcula y grafica información del modelo respecto al tiempo.

Locaciones:

Las locaciones son lugares en el sistema que las entidades visitan para procesar, esperar o tomar decisiones. Una locación puede ser una sala de tratamiento, una estación de trabajo, un punto de registro, una cola o un área de almacenamiento. Las locaciones

tienen una capacidad de espera y pueden tener ciertas veces que están disponibles. También pueden tener entradas y salidas especiales, como entradas basadas en la prioridad más alta o salidas basadas en el primero en entrar, primero en salir (FIFO).

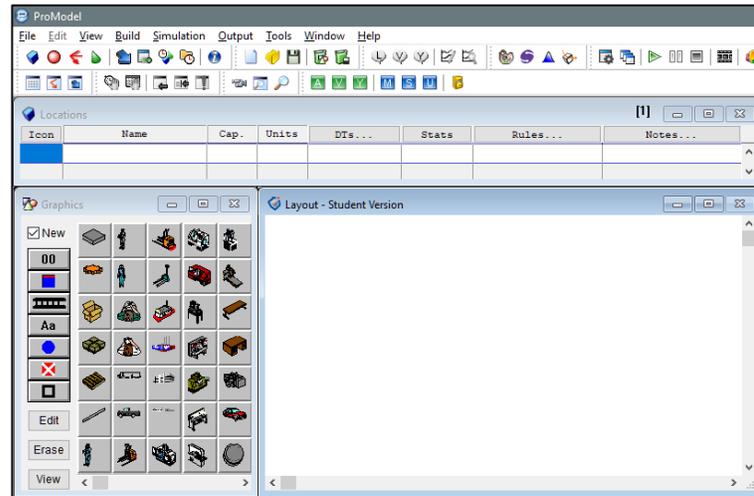


Figura 2.8. Menú para declaración de locaciones
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.8. se muestra cada una de las características que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de registro de locaciones, un layout y un menú de gráficos.

Registro de locaciones:

Cuando se crea una locación, automáticamente se crea un registro con las siguientes características que deben ser declaradas para cada locación:

- **Icon:** Se asigna un gráfico deseado para representar la locación.
- **Name:** Se declara el nombre que llevara la locación.
- **Cap:** Numero de entidades que puede procesar al mismo tiempo.
- **Unit:** Número de veces que puede repetirse la locación dentro del proceso.
- **DTs:** Define los tiempos muertos que puede tener la locación, estos pueden ser:
 - ***Clock***, Se detiene después de que la entidad ha cumplido cierto tiempo específico. En él es necesario declarar ver Figura 2.9, *Frequency* (tiempo que estará detenido), *First Time* (tiempo desde el cual empieza a contabilizarse el tiempo de la frecuencia), *Priority* (Prioridad que el tiempo muerto tiene para

que suceda), *Schedule* (Si la parada está contemplada en la programación y no desea que se tome en cuenta en las estadísticas), *Logic* (declarar instrucciones que ocurren en el momento de la parada), *Disable* (se desea o no que se efectúe la parada).

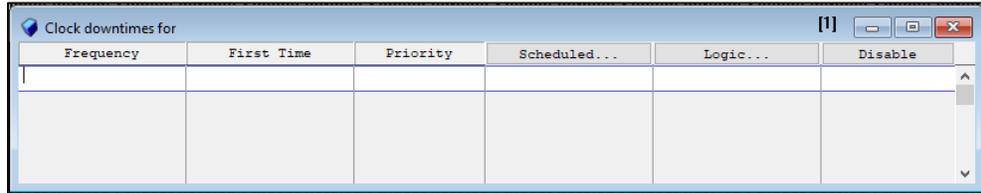


Figura 2.9. Menú de tiempo de parada por reloj
Fuente: ProModel, 2006

- ***Entry Downtime***, Esta parada se realiza después de un número determinado de entradas a la locación. En él es necesario declarar ver Figura 2.10, *Frequency* (número de entidades que deben ser procesadas antes de realizar la parada), *First Occurrence* (Tiempo desde el cual empieza a contabilizarse el número de entradas que le ha dado en frecuencia), *Logic* (declarar instrucciones que ocurren en el momento de la parada), *Disable* (se desea o no que se efectúe la parada).

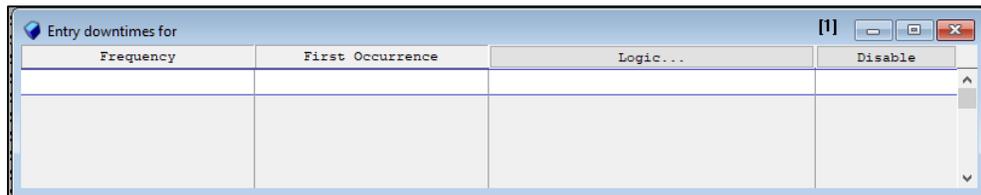


Figura 2.10. Menú de tiempo de parada por entradas
Fuente: ProModel, 2006

- ***Usage Downtime***, Esta parada es muy parecida a la de *Clock*, pero difiere en que el tiempo empleado es el tiempo efectivo o de uso de trabajo. En él es necesario declarar ver Figura 2.11, *Frequency* (tiempo efectivo en el cual está presupuestada la parada), *First Time* (tiempo desde el cual empieza a contabilizarse el tiempo de la frecuencia), *Priority* (Prioridad que el tiempo muerto tiene para que suceda), *Schedule* (Si la parada está contemplada en la programación y no desea que se tome en cuenta en las estadísticas), *Logic*

(declarar instrucciones que ocurren en el momento de la parada), *Disable* (se desea o no que se efectúe la parada).

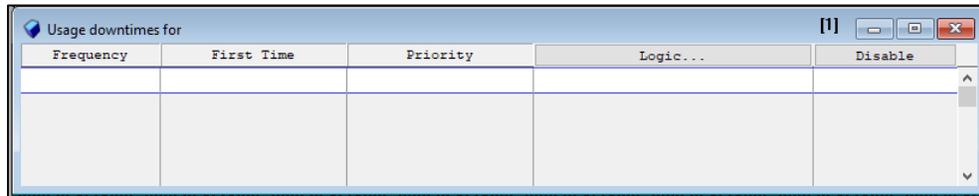


Figura 2.11. Menú de tiempo de parada por uso
Fuente: ProModel, 2006

- **Setup Downtime**, Puede utilizarse en situaciones en que la locación procesa diferentes tipos de entidades, pero necesita un alistamiento antes de cada corrida. En él es necesario declarar ver Figura 2.12, *Entity* (entidad que se está procesando en el momento en la locación), *Prior Entity* (Nueva entidad que se va a procesar en la misma locación), *Logic* (declarar instrucciones que ocurren en el momento de la parada), *Disable* (se desea o no que se efectúe la parada).

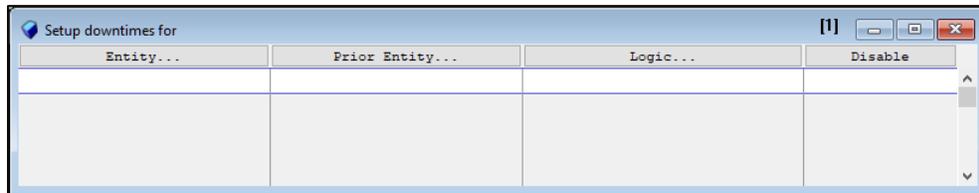


Figura 2.12. Menú de tiempo de alistamiento
Fuente: ProModel, 2006

- **Stats:** Al hacer clic en esta opción aparecen tres niveles:
 - **None**, no se recogen estadísticas.
 - **Basic**, solamente se muestra la utilización y el promedio del tiempo.
 - **Time Series**, Calcula y grafica información del modelo respecto al tiempo.

Path Networks:

Son las rutas definen el curso del viaje para las entidades y los recursos. Las rutas pueden estar aisladas, o pueden estar conectadas a otras rutas para crear una red de rutas. En

ProModel®, las rutas simples se crean automáticamente cuando se define una ruta de enrutamiento. Una ruta de enrutamiento que conecta dos ubicaciones se convierte en la ruta de viaje predeterminada si no hay una ruta definida explícitamente o una red de ruta conecta las ubicaciones.

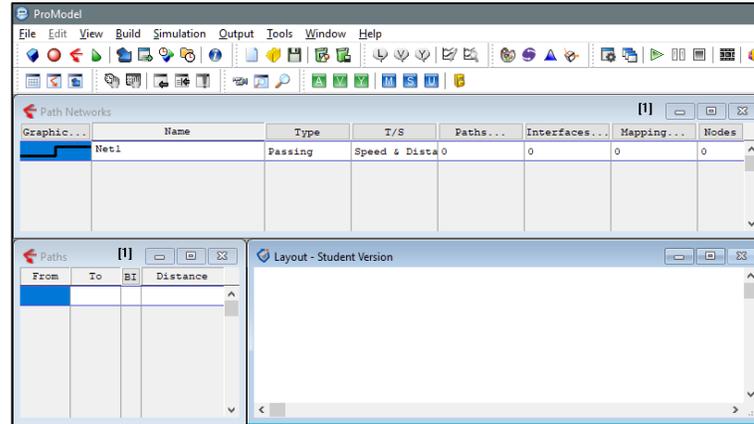


Figura 2.13. Menú para las redes de recorridos
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.13. se muestra cada una de las ventanas que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de registro de Path Network, un layout y una ventana de Paths.

Registro de Path Network:

Cuando se crea una ruta, automáticamente se crea un registro con las siguientes características que deben ser declaradas para cada una de ellas:

- **Graphic:** En él se elige si se desea poner un color en la red o dejarla visible o invisible durante la simulación.
- **Name:** Nombre que se le asigna a la red.
- **Type:** Hay tres tipos de redes:
 - **Passing**, Cuando los recursos se pueden mover libremente por la red.
 - **Non-passing**, Es una red que tiene algún tipo de restricciones.
 - **Crane**, Esta es especial para grúas y puentes de grúas.
- **T/S:** Se puede trabajar con dos tipos de unidades básicas de distancias: en tiempo o velocidad y distancia.

- **Interfaces:** Cada locación tiene que tener un nodo que la relaciona. La forma de unir los nodos de la red con las locaciones es mediante interfaces.
- **Mapping:** Cuando se tenga una red conformada por varios nodos, automáticamente buscará el nodo más corto.

Recursos:

Los recursos son los agentes utilizados para procesar entidades en el sistema. Los recursos pueden ser estáticos o dinámicos dependiendo de si son estacionarios (como una copiadora) o se mueven en el sistema (como un operador). Los recursos dinámicos se comportan de forma similar a las entidades, ya que ambos se mueven en el sistema. Como entidades, los recursos pueden ser animados (seres vivos) o inanimados (una herramienta o máquina).

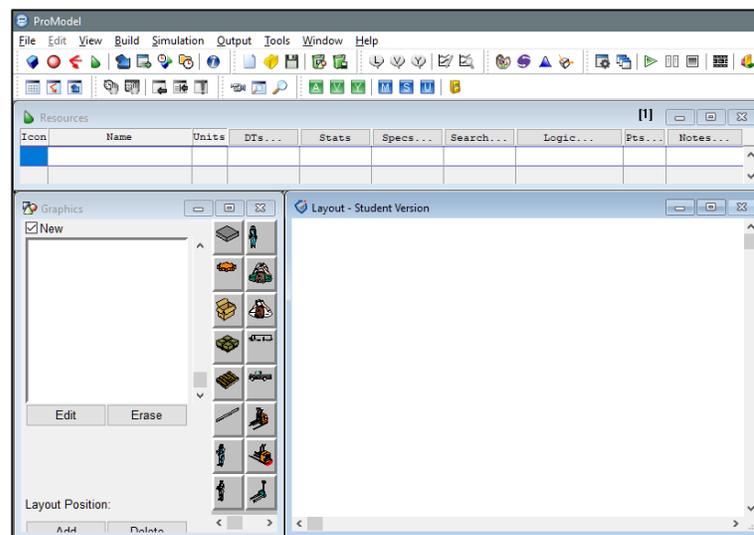


Figura 2.14. Menú para los recursos
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.14. se muestra cada una de las ventanas que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de registro de Recursos, un layout y una ventana de Graphics.

Registro de Recursos:

Cuando se crea un recurso, automáticamente se crea un registro con las siguientes características que deben ser declaradas para cada uno de ellos:

- **Units:** Número de recursos que se desea tener.
- **DTs:** Los recursos pueden tener paradas igual que las detalladas en la locación.
- **Stats:** Al hacer clic en esta opción aparecen tres niveles:
 - **None**, no se recogen estadísticas.
 - **Basic**, solamente se muestra la utilización y el promedio del tiempo.
 - **Time Series**, Calcula y grafica información del modelo respecto al tiempo.
- **Specs:** En este campo se pueden asignar al recurso una red y otras propiedades.
- **Search:** Puede elegir entre dos de las siguientes opciones:
 - **Work Search**, Crea una lista de locaciones donde la entidad puede esperar un recurso.
 - **Park Search**, Crea una lista de nodos a los cuales pueden enviarse si no están trabajando y están esperando otro trabajo.
- **Logic:** Permite crear instrucciones o procesos en el momento de la parada.

2.5.3. Elementos operacionales

El software ProModel® también cuenta con elementos operacionales los cuales definen el comportamiento de los diferentes elementos físicos en el sistema y cómo interactúan. Estos incluyen rutas, operaciones, llegadas, movimiento de entidades y recursos, reglas de selección de tareas, programas de recursos, tiempos de inactividad y reparaciones. Los cuales son definidos por el autor García et al (2013) a continuación:

Procesos:

El proceso define la secuencia de flujo para las entidades de una ubicación a otra. Cuando las entidades completan su actividad en una ubicación, la ruta define a qué entidad va después y especifica el criterio para seleccionar entre varias ubicaciones posibles. El

menú de proceso es uno de los más importantes debido a que en él se programa la operación.

En la Figura 2.15. se muestra cada una de las ventanas que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de Process, Routing, layout y una ventana de Tools.

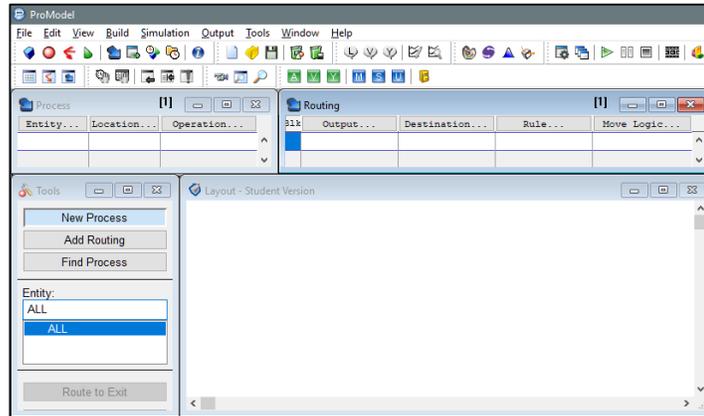


Figura 2.15. Menú para el proceso
Fuente: ProModel, 2006

Process:

En él se declara cada una de las entradas del proceso:

- **Entity:** Entidad que se va a procesar.
- **Location:** Locación donde se encuentra la entidad.
- **Operation:** Operaciones que se realizan en esa locación (ver operaciones).

Routing:

En él se declara cada una de las salidas del proceso.

- **Output:** Entidad que sale de la anterior locación.
- **Destination:** Locación a donde se dirige la entidad.
- **Rule:** Regla o condición de desplazamiento.
- **Move logic:** Operaciones que se realizan en esta locación (ver operaciones).

Operaciones:

Una operación de entidad define qué le sucede a una entidad cuando ingresa a una ubicación. Para fines de modelado, la naturaleza exacta de la operación (mecanizado, registro de paciente o lo que sea) no es importante. Lo esencial es saber qué sucede en términos del tiempo requerido, los recursos utilizados y cualquier otra lógica que afecte el rendimiento del sistema.

- ***Consolidación de entidades***

Las entidades a menudo se someten a operaciones en las que se consolidan o se conectan física o lógicamente con otras entidades. En ProModel®, las entidades se consolidan permanentemente utilizando el comando COMBINE. Las entidades se pueden consolidar temporalmente utilizando el comando GROUP.

- ***Adjunto de entidades***

Además de consolidar las entidades acumuladas en una ubicación, las entidades también se pueden unir a una entidad específica en una ubicación. En ProModel®, las entidades se conectan a otra entidad utilizando el comando LOAD para archivos adjuntos temporales o el comando JOIN para archivos adjuntos permanentes.

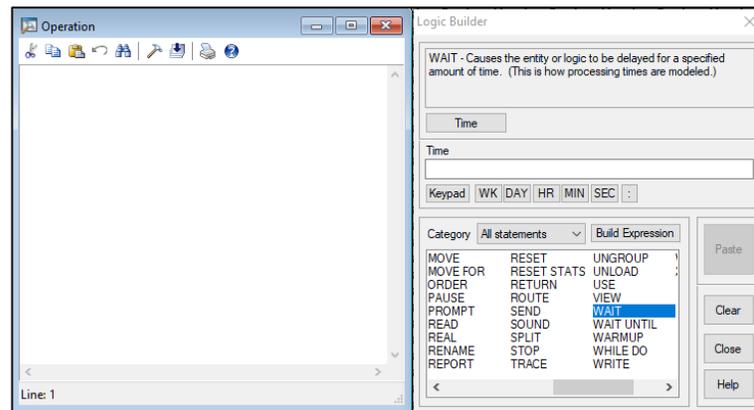


Figura 2.16. Menú de operaciones lógicas
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.16 se muestra el menú de operaciones con el cual se puede crear un gran número de instrucciones y lógicas para simular los procesos y en la Figura 2.17 se muestran los movimientos lógicos.

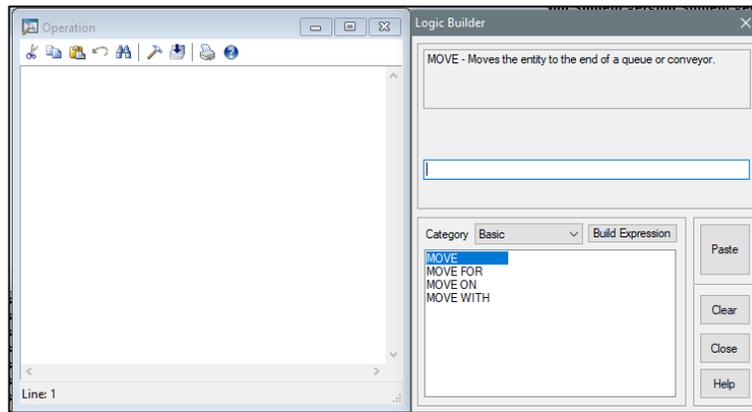


Figura 2.17. Menú de movimientos lógicos
Fuente: ProModel, 2006

Arribos:

Las llegadas de entidades definen el tiempo, la cantidad, la frecuencia y la ubicación de las entidades que ingresan al sistema. Las entidades pueden llegar a un sistema de manufactura o de servicio de una de varias maneras diferentes:

- Periódico: llegan a un intervalo periódico.
- Programado: llegan a horas especificadas.
- Fluctuante: la velocidad de llegada fluctúa con el tiempo.
- Evento desencadenado: llegan cuando se desencadena por algún evento.

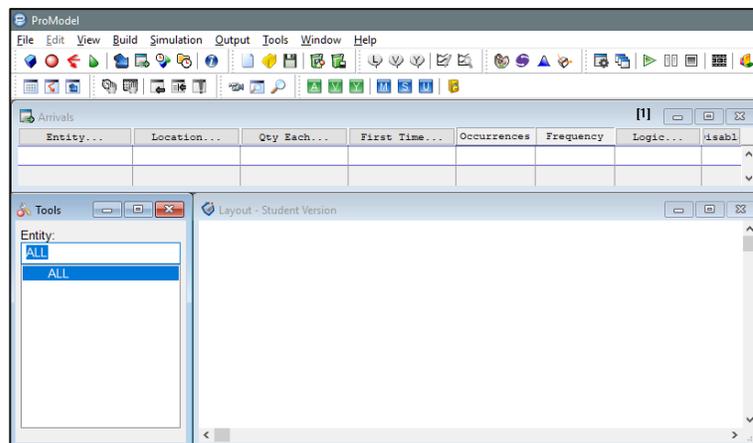


Figura 2.18. Menú de Arribos
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.18. se muestra cada una de las ventanas que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de registro de Arribos, layout y una ventana de Tools.

Registro de Arribos:

Cuando se crea un arribo, automáticamente se crea un registro con las siguientes características que deben ser declaradas para cada uno de ellos:

- **Entity:** Nombre de la entidad que llega al sistema.
- **Location:** Nombre de la locación a donde llega la entidad.
- **Qty each:** Número de entidades que llegan a la vez.
- **First time:** Tiempo de la primera llegada.
- **Occurrences:** Número de veces que puede llegar una entidad.
- **Frequency:** Intervalo de tiempo entre una llegada y otra.
- **Logic:** Se puede definir operaciones que se ejecuten en el momento de la llegada de la entidad al sistema.
- **Disable:** En este campo se activa o desactiva la llegada al sistema.

Variables:

Se puede emplear variables tipo global o local. Las variables son útiles para calcular o guardar información numérica, ya sea real o entera. El valor de una variable global se puede utilizar en cualquier parte de la simulación mientras que en una variable local solo se puede utilizar dentro del bloque (logic) en el que se colocó.

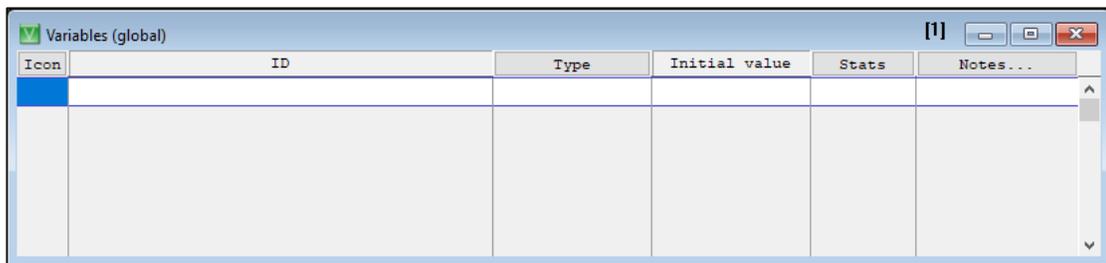


Figura 2.19. Ventana para definir variables
Fuente: ProModel, 2006

En la Figura 2.19. se muestra cada una de las ventanas que tiene este menú, en el cual se observa una ventana de registro de variables.

Registro de variables:

Cuando se crea una variable, automáticamente se crea un registro con las siguientes características que deben ser declaradas para cada uno de ellos:

- **Icon:** Si el campo dice “Yes”, muestra las variables por pantalla; de lo contrario no lo hará.
- **ID:** Nombre de la variable.
- **Type:** La variable puede ser tipo real o entero.
- **Stats:** Al hacer clic en esta opción aparecen tres niveles:
 - **None**, no se recogen estadísticas.
 - **Basic**, solamente se muestra la utilización y el promedio del tiempo.

Software Stat::fit

Stat::fit es una herramienta que se encuentra dentro del paquete de ProModel®, el cual te permite lograr 5 objetivos que apoyan a que tus resultados de simulación sean confiables:

- Ajuste de Curvas. Te ayuda a encontrar la mejor distribución para representar los datos. Stat::fit utiliza las pruebas de Bondad de Ajuste más comúnmente conocidas, como son:
 - Anderson-Darling
 - Chi-Cuadrada
 - Kolmogorov-Smirnov
- Determinar el número de réplicas para correr un modelo de simulación.
- Determinar el tamaño de la muestra para toma de tiempos de proceso y transportación.
- Graficar los datos de entrada, graficar todas las distribuciones de probabilidad que se pueden utilizar, hacer estadística descriptiva de datos.

2.6. Estado del arte

Para continuar con la búsqueda de información, en la Tabla 2.1 se hará mención de artículos tecnológicos cuyos temas sean de gran importancia y estén conformados en su mayoría, por temas que ayudan al desarrollo de este trabajo de tesis.

Tabla 2. 1. Artículos tecnológicos relevantes.

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
2018	Revista Espacios Volumen 39 No. 3, página 10	Modelo de teoría de restricciones con consideraciones de optimización y simulación- Un caso de estudio	(Herrera-Vidal, Campo-Juvinao, Bernal-Hernandez, & Tilves-Martinez, 2018)	El propósito de este trabajo consistió en detectar la restricción de un sistema de una empresa del sector plástico en la ciudad de Cartagena, Colombia. Esto mediante el uso de la filosofía de teoría de restricciones y consideraciones de optimización en GAMS y simulación por medio del Software ProModel®, facilitando la identificación del recurso cuello de botella y analizar los indicadores de desempeño y costos de operación, obteniendo como resultado una gestión eficiente de los recursos, además de obtener un aumento en las unidades producidas y por lo tanto una maximización en las utilidades.
2017	International Journal of Production Economics 188 116–127	Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops With bottlenecks: An assessment by simulation	(Thürer, Stevenson, Silva, & Qu, 2017)	Este estudio evalúa el rendimiento del sistema drum-buffer-rope (DBR) y la liberación de Workload Control en un taller de trabajo puro y un taller de flujo general con diferentes niveles de cuello de botella. El estudio se llevó a cabo mediante la metodología Workload Control con y sin cuello de botella. Los resultados se analizaron mediante modelo de simulación, los cuales mostraron que los métodos de lanzamiento de Workload Control conducen a un mejor rendimiento que el sistema DBR, si la gravedad del cuello de botella es baja, en cambio el

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
				sistema DBR arroja un mejor rendimiento si existe un fuerte cuello de botella, de acuerdo al análisis de simulación se muestra que, el principal factor que determina cuál de estos métodos de lanzamiento se debe emplear, es la gravedad del cuello de botella que se presenta en el sistema.
2016	Springerplus Volmen. 5 No. 1, pag. 1-15	Dynamic bottleneck elimination in mattress manufacturing line using theory of constraints	(Gundogar, Sari, & Kokcam, 2016)	En este estudio, se analiza la línea de fabricación de colchones de muelles de una empresa de fabricación de muebles. La compañía quiere aumentar su producción con nuevas inversiones. El objetivo es encontrar los cuellos de botella en la línea de producción para equilibrar el flujo de material semiacabado. Estos cuellos de botella se investigan y se prueban varios escenarios diferentes para mejorar el sistema de fabricación actual. El problema con un tema principal basado en la eliminación del cuello de botella se resuelve utilizando la teoría de restricciones y con un método heurístico mediante el software de simulación Arena 13.5..
2015	International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC) Vol. 6, No. 2.	Reduction of work in process inventory and production lead time in a bearing industry using value stream mapping tool	(Saraswat, Kumar, & Kumar Sain, 2015)	En este documento, la herramienta Value Stream Mapping (VSM) se utiliza en la industria de fabricación de rodamientos centrándose tanto en los procesos como en los tiempos de ciclo para un producto UC-208 INNER. Para utilizar el mapeo del flujo de valor, se han recopilado y analizado datos relevantes. Después de recopilar los datos, se identificó la necesidad del cliente. El mapa del estado actual se dibujó al definir los recursos y actividades necesarios para fabricar, entregar el producto. El estudio del mapa estatal actual

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
				muestra las áreas para mejorar e identificar los diferentes tipos de desechos. A partir del mapa de estado actual, se observó que el procesamiento de recocado y mecanizado CNC tiene un mayor tiempo de ciclo y inventario en proceso. Se crearon los principios y las técnicas lean implementados o sugeridos y el mapa del estado futuro logrando una reducción en el tiempo de entrega total y WIP en cada estación de trabajo.
2015	Procedia Economics and Finance 23 134 – 139	Application of The Theory of Constraints Instrument in The Enterprise Distribution System	(Šukalová & Ceniga, (2015)	<p>El documento ha proporcionado un marco para utilizar el enfoque TOC en la práctica de las empresas de la industria eslovaca, dado que en esta parte del mundo el tema de TOC es algo nuevo.</p> <p>El artículo discute la posibilidad de aplicar el instrumento TOC en los sistemas de distribución. La solución del problema solicita el análisis de los elementos del sistema de distribución (inventarios, planificación de la venta, la fiabilidad de los proveedores) y la evaluación de las principales deficiencias en esta área. Según el análisis, es posible aplicar los pasos específicos de la herramienta Teoría de restricciones. El procedimiento de solicitud conduce a la solución de distribución del TOC. El objetivo principal de esta investigación fue la implementación del método TOC en el sistema de distribución de la empresa.</p>
2015	Revista Ingeniería Industrial Vol. 14	Procedimiento para la programación y control de la	(Ortiz & Caicedo , 2015)	Este estudio centra su atención en el diseño de un procedimiento para la programación y control de la producción de una pequeña empresa

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
		producción de una pequeña empresa.		<p>de calzado, obteniendo una reducción en los costos de producción, aumentando el throughput y cumpliendo con los tiempos de requerimiento, desarrollando un modelo matemático que logró programar y controlar la producción de una pequeña empresa.</p> <p>Esta mejora se llevó a cabo mediante el uso de técnicas, como teoría de restricciones y técnicas de programación lineal. Se identificaron las restricciones, se desarrolló un modelo matemático y por último se determinaron los valores óptimos de fabricación.</p> <p>Validando la mejora mediante pruebas de hipótesis, logrando maximizar el throughput, reducir los costos de inventario y mejorando los tiempos de entrega. Con el fin de permitir la implementación de este modelo en pequeñas empresas que laboren con características similares a esta pequeña empresa de calzado.</p>
2014	International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia, p. 2489-2499	Analysis of WIP Inventory Control and Simulation of KANBAN System within Wiring Harness Company	(Kissani & Bouya, 2014)	<p>Este proyecto sugiere una implementación aproximada y simulación del sistema KANBAN dentro de la empresa de mazos de cableado. Este último adopta la filosofía de Just-in-Time, pero sin respetarlo totalmente recurriendo al sistema push para controlar su inventario de Work In Process (WIP). Es por eso que se realizó un análisis sobre los defectos y deficiencias existentes al nivel de la gestión de las existencias de WIP.</p> <p>Después de detectar la alarmante situación del control de inventario, especialmente en el área de pre-</p>

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
				ensamblaje, se sugirió una implementación y simulación inicial del sistema KANBAN utilizando ProModel® incluso si se han encontrado muchas restricciones en cuanto a datos y software.
2014	Ingeniería de Procesos: Casos Prácticos, 1° edición	Reducción y control de inventarios	(Pérez Martínez, Pérez Olguín, Fernández Gaxiola, & Zepeda Miranda, 2014)	<p>Este artículo, centra su atención en el control y reducción de inventarios en la línea de producción de una empresa continental ubicada en cd. Juárez. El enfoque utilizado para lograr los objetivos fue el análisis de los procesos que conforman el sistema productivo de sus estaciones de trabajo, para eliminar actividades que no agregaran valor al producto y reducir los desperdicios. Asimismo, se presentan resultados que muestran una disminución de los costos de inventario de materiales cargados en el sistema SAP.</p> <p>Las técnicas utilizadas para su reducción se basaron principalmente en la implementación de un control basado en el Work In Process, control planeado para retroalimentar los sistemas de gestión de materiales con la finalidad de que estos mostraran información certera. Asimismo, se realizaron balanceos de línea para reducir los caminares presentes y se dieron platicas al personal operativo sobre la importancia de las implementaciones efectuadas, entre las que se incluye el sistema Kanban.</p>
2014	Production, Volumen 24, No. 3 p. 536-547	Work in process level definition: a method based	(Pergher & Roehé Vaccaro, 2014)	Este documento propone un método para definir los niveles de inventario en curso (WIP) en entornos productivos gestionados por políticas constantes de inventario en proceso (CONWIP). El método propuesto

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
		on computer simulation and electre TRI		combina los enfoques de Computer Simulation y Electre TRI para respaldar la estimación del nivel adecuado de WIP y se presenta en dieciocho pasos. El documento también presenta un ejemplo de aplicación, realizada en una empresa metalúrgica. El método de investigación se basa en simulación por computadora, respaldada por análisis de datos cuantitativos. La principal contribución del documento es su provisión de una forma estructurada para definir los inventarios de acuerdo con la demanda. Con este método, los autores esperan contribuir al establecimiento de mejores planes de capacidad en entornos de producción.
2014	International Journal of Production Economics 188	A study of scheduling under the theory Constraints.	(Golmohamadi, 2014)	En este estudio se implementaron las reglas de la teoría de restricciones, así como el sistema DBR por medio del programa arena 12 que permitió la verificación del modelo gráfico, el análisis estadístico, múltiples escenarios y diversos parámetros de entrada, de un sistema de taller de trabajo, el cual agrega complejidad a la programación según el autor. Se analizó el impacto de los productos gratuitos en un sistema de producción y rendimiento. Se discutió el papel de las reglas de prioridad para los productos no libres y los tiempos de preparación. Esta investigación proporciona varios hallazgos relacionados con la programación de operaciones complejas que deberían ser interesantes para investigadores y profesionales.

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
2013	Revista de la Ingeniería Industrial Vol. 7	Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca	(Ferrer, Moras, Fernández, & Álvarez, 2013)	<p>En este artículo, los autores muestran mediante la técnica de simulación un modelo que representa el sistema actual de la empresa, partir de este se creó un modelo del sistema mejorado para solucionar los problemas de baja productividad que presentaba la empresa, el cual permitió medir los tiempos de producción real y tiempos perdidos, permitiendo analizar las posibles pérdidas que se estaban generando por la falta de administración de los tiempos de producción.</p> <p>La técnica se llevó a cabo, aplicando la metodología de simulación propuesta por los autores Law y Kelton (2007), desarrollando un modelo de simulación para el proceso de producción de la empresa, con el fin de poder analizar las medidas de desempeño que provocan la baja productividad.</p>

Capítulo 3

Metodología

3.1. Método de trabajo

El presente capítulo consta del contenido metódico para abordar la problemática plasmada en el capítulo 1. Este apartado incluye una serie de etapas y actividades que conducen a alcanzar los objetivos establecidos previamente. Este procedimiento propone una metodología basada en sistemas de programación de mejoramiento continuo DBR y simulación de eventos discretos mediante el uso del software ProModel®, con la finalidad de determinar los niveles mínimos de WIP en empresas manufactureras.

Debido a que, el uso de herramientas de teoría de restricciones proporciona una serie de beneficios de control y administración de las restricciones en los sistemas de producción, se decidió aplicar una de ellas en procesos de manufactura por medio de simulación de eventos discretos, ya que, al llevar a cabo la experimentación y análisis de este tipo de herramienta en procesos de producción real puede ocasionar altos costos para las empresas. Tomando en cuenta la información revisada en el capítulo anterior acerca del sistema DBR y las etapas para llevar a cabo un proyecto de simulación exitoso, se propone el proceso metodológico mostrado en la Figura 3.1, el cual llevará a desarrollar un proceso sencillo de simulación en procesos de manufactura haciendo uso del sistema DBR.

Esta metodología empieza por definir las características de funcionamiento del sistema de manufactura al cual se le quiera aplicar la mejora, en esta etapa se definen las variables de interés y las medidas de desempeño, es decir, los elementos que definen el comportamiento del sistema y cuales son relevantes para su funcionamiento y evaluación. Posteriormente, se deben recolectar y analizar los datos referentes a las variables definidas previamente con el fin de establecer su comportamiento estadístico. La etapa tres, consiste en la elaboración y verificación del modelo el cual requiere una comprensión total de todo el sistema de manera que dicho modelo sea lo más cercano posible al sistema en estudio, identificar las locaciones, arribos, recursos y la secuencia lógica del proceso.

Una vez que se cuenta con un modelo estable, en la etapa cuatro se valida el modelo realizando pruebas experimentales para cotejar si el modelo es una representación fidedigna o semejante del sistema real, esto se hace mediante la comparación de la información de salida del modelo o resultados obtenidos de la simulación previa contra los datos observados reales. Si el sistema llega a fallar la prueba de validación, es necesario regresar a la etapa uno para descartar cualquier fallo en los pasos anteriores.

En cambio, si la validación fue exitosa la siguiente etapa es la de experimentación, en la cual se evalúa el comportamiento y los escenarios del sistema, llevando a cabo un análisis de sensibilidad para validar que se presentan los mejores resultados de acuerdo al objetivo propuesto. En esta sección se hará uso de los cinco puntos focales de la TOC para lograr que un sistema de producción consiga sus objetivos, esto mediante el uso del sistema DBR. Esta técnica permitirá identificar las limitaciones a partir de los siguientes cinco pasos:

1. Identificar la restricción

En este punto se determina cual es el recurso que limita el desempeño del sistema, es decir detectar el cuello de botella analizando la carga del trabajo y el tiempo de operación de cada recurso identificando la operación con el mayor porcentaje de utilización o con el mayor número de inventario por procesar. La restricción es el evento en el proceso que determina el rendimiento de todo el sistema.

2. Explorar la restricción

Por medio del modelo de simulación se hará un análisis y manipulación de las variables involucradas para tratar de aprovechar la restricción del sistema al 100%, evitando que el cuello de botella cuente con tiempo de inactividad. La explotación de la restricción busca lograr la mayor tasa de rendimiento posible utilizando los recursos actuales de la organización.

3. Subordinar la restricción

El tercer paso es subordinar los otros pasos del proceso, esto se debe a que la restricción determina el rendimiento de todo el proceso. Por ello se llevará a cabo una administración de la restricción como prioridad, tratando de armonizar cada uno de los recursos en función de la restricción, evitando que esta tenga tiempo de inactividad. Para ello se hará uso del sistema DBR el cual tiene los siguientes tres principios (Schragwneim & Ronen, 1990):

a. Programar la restricción (Tambor)

Una vez identificada la restricción, este será el tambor del sistema, el cual determina el rendimiento del sistema. La función del tambor es proteger las fechas de envío.

b. Determinar el tamaño del amortiguador (Amortiguador)

Se coloca un amortiguador antes del recurso cuello de botella para asegurarse de que siempre tenga algo en lo que trabajar. Para ello existen tres tipos, los cuales son: amortiguador de restricción (antes del cuello de botella), de envío (Inventario de producto terminado) y de tiempo (Tiempo del inventario en proceso). Los amortiguadores se colocan frente a la restricción o en otros lugares estratégicos elegidos para superar la falta de materias primas y para proteger las fechas de entrega prometidas.

c. Programar la liberación de material al ritmo de la restricción (Cuerda)

Esta etapa es conocida como la cuerda del sistema, su función es comunicar al tambor hasta el principio del sistema con ello el sistema estará subordinado al ritmo de la restricción. Si el cuello de botella casi se queda sin material para producir, la cuerda libera material a la primera operación a un ritmo determinado por el cuello de botella.

4. Elevar la restricción

Significa elevar el rendimiento agregando capacidad al sistema en la ubicación de restricción. Esto puede resultar en la adquisición de capacidad adicional, nuevas máquinas o nueva tecnología para levantar o romper la restricción.

5. Si la restricción se eliminó regresar al paso uno

Una vez que se analizaron los resultados, la última etapa consiste en recopilar toda la información y documentación del modelo. En ella se deberá incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas a las variables, todos sus alcances y limitaciones, todas las consideraciones de la programación. Además, agregar sugerencias y resultados obtenidos del modelo. Por último, se presentan las conclusiones y resultados obtenidos en el proyecto de simulación mediante la comparación de las medidas de desempeño establecidas.

A continuación, se detalla el proceso de la metodología tomando en cuenta cada una de las etapas descritas anteriormente. Además, se observa la lógica del seguimiento para cada una de ellas y que puros se desarrollan en cada una de ellas como se muestra en la figura 3.1.

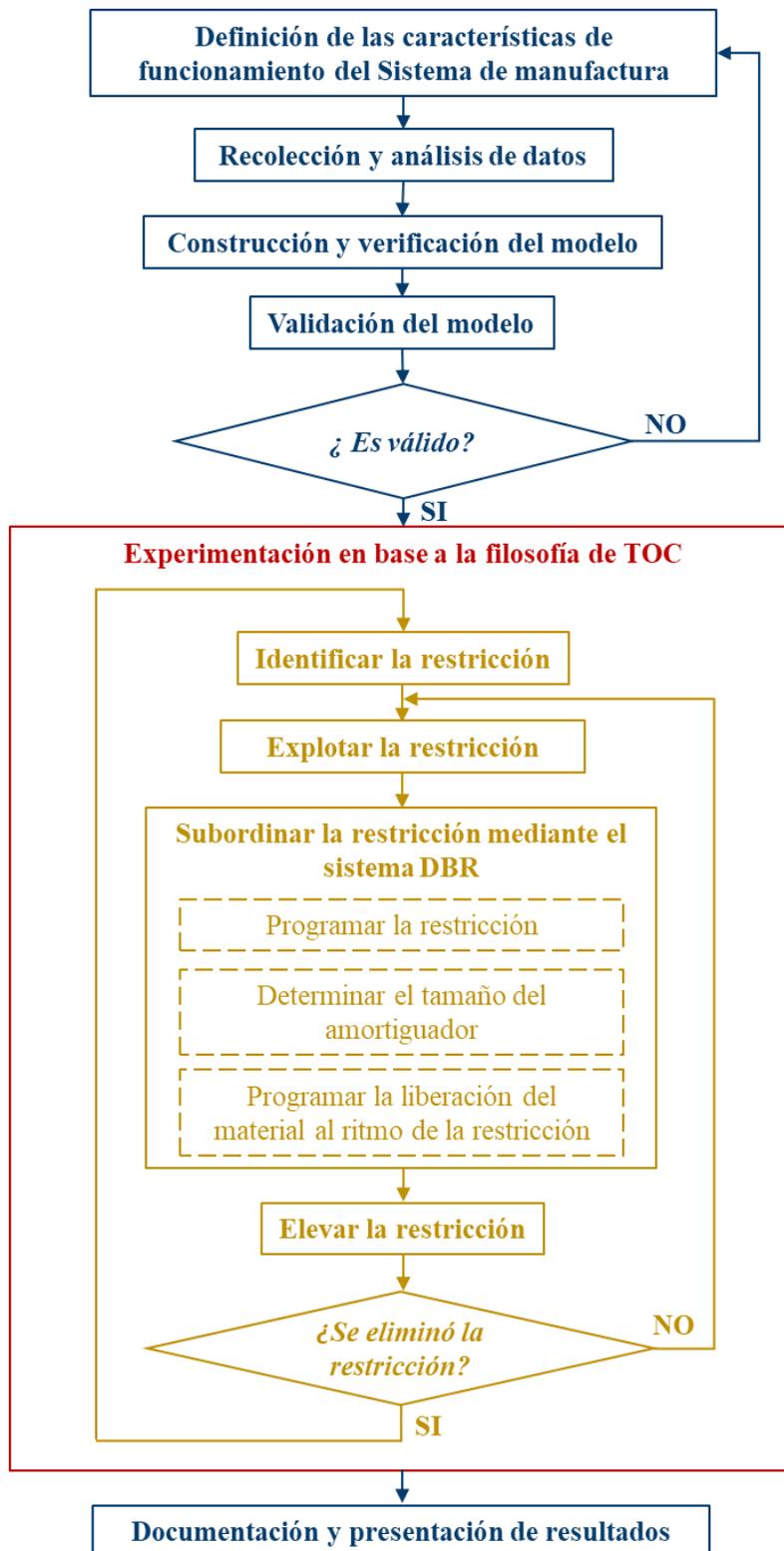


Figura 3.1. Método de investigación
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Resultados

4.1. CASO 1. SISTEMA DE FABRICACION DEL PRODUCTO M Y N

4.1.1. Descripción del sistema de manufactura

El presente sistema de manufactura (Chase & Jacobs, 2010), se analizó mediante la metodología propuesta en el capítulo anterior. Este sistema se puede apreciar en la Figura 4.1, consta de tres operaciones de las cuales dos de ellas son compartidas (Maquina B y C) y una independiente (Maquina A) como se muestra en el diagrama de flujo en la Figura 4.1, las cuales procesan tres tipos de materia prima (MP1, MP2 y MP3) con un costo de 60, 40 y 40 dólares respectivamente, para ser procesadas y producir dos tipos de productos (producto M y producto N), cada máquina dispone de 2,400 minutos a la semana.

El total de gastos de operativos es una constante de \$12,000 dólares semanales, las materias primas no se incluyen en el gasto de operación semanal. El producto terminado se entrega inmediatamente al cliente con una demanda constante de producto M de 100 unidades por semana con un precio de venta de \$190 dólares por unidad y 50 unidades por semana del producto N con un precio de venta de \$200 dólares por unidad. El sistema presenta problemas de cumplimiento de demanda.

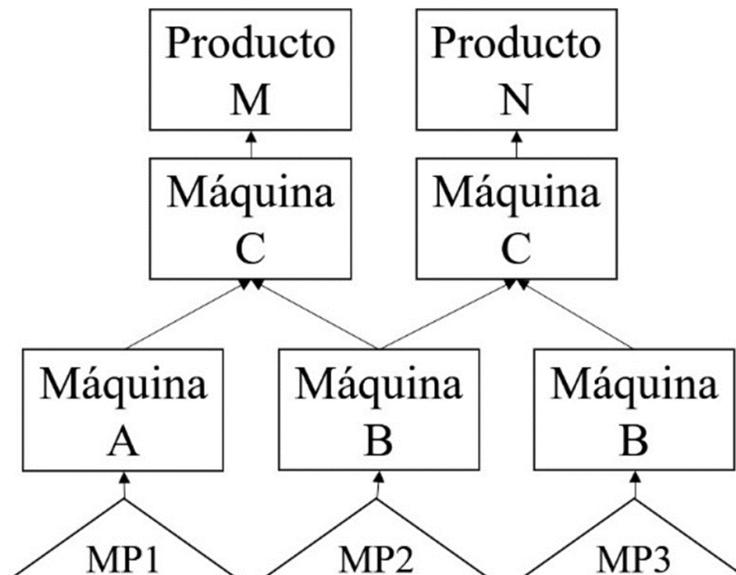


Figura 4.1. Representación del sistema de manufactura
Fuente: Chase & Jacobs, 2010

A continuación se desarrollan cada una de las etapas de la metodología al sistema propuesto para posteriormente analizar si se cumplen los resultados esperados.

4.1.2. Etapa 1. Definir las características de funcionamiento del sistema

Aquí se definen las variables en el sistema actual con el fin de establecer su comportamiento, así como las medidas de desempeño para evaluarlo, los cuales serán introducidos en el software.

- ***Locaciones:***

El sistema consta de tres máquinas distintas, cada una de ellas cuentan con capacidad unitaria además de un almacén con capacidad infinita para cada una de las materias primas.

- ***Entidades:***

Se declaran tres tipos de material prima distintas MP_1, MP_2 y MP_3 además de dos tipos de productos terminados Producto M y Producto N.

- ***Llegadas:***

La materia prima 1 entra al sistema una pieza cada 20 minutos, la materia prima 2 llega al sistema una pieza cada 15 minutos y la materia prima 3 entra al sistema una pieza con una frecuencia de 75 minutos.

- ***Proceso:***

Cada una de las materias primas llegan a un almacén destinado para cada una de ellas, posteriormente inician su proceso de transformación en los recursos A y B con sus tiempos de procesamiento correspondientes, posteriormente pasan a la maquina C la cual se encarga de ensamblar el producto M mediante una pieza de materia prima 1 con una pieza de materia prima 2, del mismo modo la maquina C ensambla una pieza de materia prima 2 y una de materia prima 3 para fabricar una pieza del producto N. Las piezas se transportan de una maquina a otra de una en una sin tiempo de traslado.

Los indicadores de desempeño establecidos en (Goldratt E. M., 1990) para determinar la efectividad de las estrategias propuestas se muestran a continuación, las cuales serán analizadas para detectar como influye la reducción del inventario en proceso en cada uno de ellos, estos indicadores pueden ser calculados automáticamente mediante la generación de variables (global) proporcionados por el software ProModel®.

- *Inventario en proceso (WIP)*
- *Unidades producidas (PT)*
- *Inventario (I)*
- *Throughput (TH)*
- *Beneficio neto (NP)*
- *Rendimiento de la inversión (R)*
- *Productividad (P)*
- *Rotación de inventario (IT)*

4.1.3. Etapa 2. Recolección y análisis de datos

Para esta caso, los datos se tomaran directamente del problema propuesto, solo será necesario analizarlos y comprobar el los resultados en el modelo de simulación. El tiempo de procesamiento de cada máquina por pieza se detalla en la Tabla 4.1:

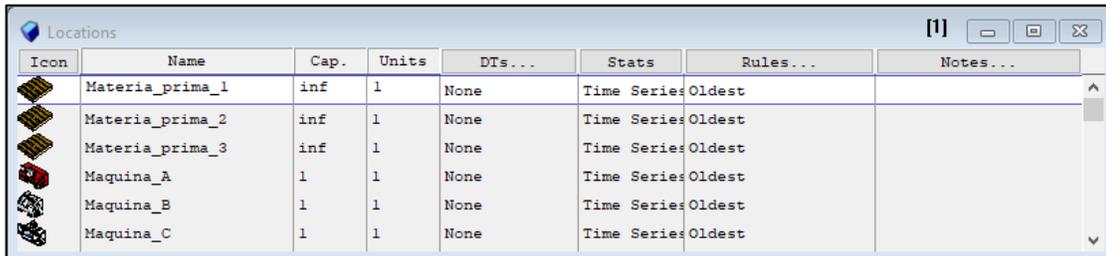
Máquina	Tiempo de procesamiento
Máquina A	20 min/pieza
Máquina B	15 min/pieza
Máquina C	15 min/pieza

4.1.4. Etapa 3. Construcción y verificación del modelo

Una vez que se establecieron las variables y datos del sistema, se ingresó al programa para construir un modelo de simulación que imitará el comportamiento del sistema de manufactura actual. Los datos iniciales fueron los siguientes:

- **Build (*Locations*)**

En la Figura 4.2. se muestra la ventana de declaración de locaciones del modelo, en el cual se establecieron las 3 maquinarias involucradas más 3 estaciones de llegada de materia prima.

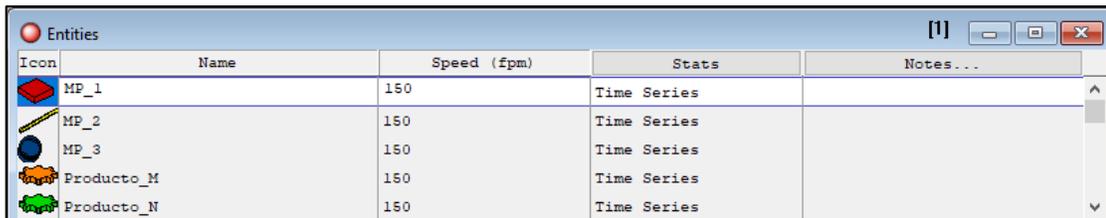


Icon	Name	Cap.	Units	DTs...	Stats	Rules...	Notes...
	Materia_prima_1	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	Materia_prima_2	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	Materia_prima_3	inf	1	None	Time Series	Oldest	
	Maquina_A	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Maquina_B	1	1	None	Time Series	Oldest	
	Maquina_C	1	1	None	Time Series	Oldest	

Figura 4.2. Estaciones y locaciones de llegada del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Entities)**

En la Figura 4.3 se muestran la declaración de las 3 entidades de materia prima y 2 de producto terminado representado por engranes.

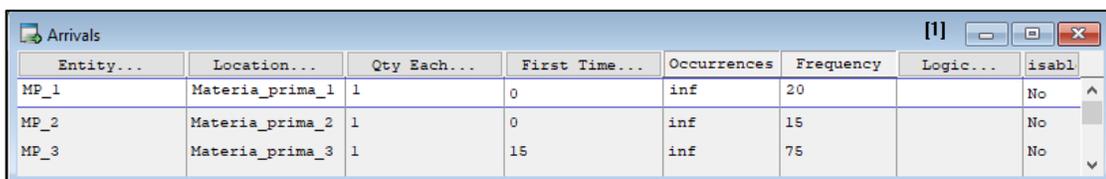


Icon	Name	Speed (fpm)	Stats	Notes...
	MP_1	150	Time Series	
	MP_2	150	Time Series	
	MP_3	150	Time Series	
	Producto_M	150	Time Series	
	Producto_N	150	Time Series	

Figura 4.3. Entidades del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Arrivals)**

Las entidades de materia prima 1, 2 y 3, llegan a las estaciones Materia_ prima_1, Materia_ prima_2 y Materia_ prima_3 respectivamente. La declaración de las llegadas se muestra en la Figura 4.4.



Entity...	Location...	Qty Each...	First Time...	Occurrences	Frequency	Logic...	isabl
MP_1	Materia_prima_1	1	0	inf	20		No
MP_2	Materia_prima_2	1	0	inf	15		No
MP_3	Materia_prima_3	1	15	inf	75		No

Figura 4.4. Llegadas del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Variables)**

Se declararon 21 variables de tipo global, para representar los indicadores establecidos en la etapa 1, *Inventario en procesos (WIP)*, *Unidades producidas (PT)*, *Inventario (I)*, *Throughput (TH)*, *Beneficio neto (NP)*, *Rendimiento de la inversión (R)*, *Productividad (P)* y *Rotación de inventario (IT)*, las cuales se muestran en la Figura 4.5.

Icon	ID	Type	Initial value	Stats	Notes...
Yes	Prod_M	Integer	0	Time Series	
Yes	Prod_N	Integer	0	Time Series	
Yes	Total_WIP	Integer	0	Time Series	
Yes	MP1	Integer	0	Time Series	
Yes	MP2	Integer	0	Time Series	
Yes	MP3	Integer	0	Time Series	
Yes	PT	Integer	0	Time Series	
No	ingreso_M	Integer	0	Time Series	
No	ingreso_N	Integer	0	Time Series	
No	Costo_de_M1	Integer	0	Time Series	
No	Costo_de_M2	Integer	0	Time Series	
No	Costo_de_M3	Integer	0	Time Series	
Yes	Ing_total	Integer	0	Time Series	
Yes	Costo_MP	Integer	0	Time Series	
Yes	NP	Real	0	Time Series	
Yes	TH	Integer	0	Time Series	
Yes	OE	Integer	0	Time Series	
Yes	I	Integer	0	Time Series	
Yes	R	Real	0	Time Series	
Yes	Prod	Real	0	Time Series	
Yes	IT	Real	0	Time Series	

Figura 4.5. Variables globales del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Processing)**

La Tabla 4.2 representa la declaración de cada una de las rutinas que llevara a cabo la operación del proceso y la lógica para la definición de variables.

Tabla 4.2. Instrucciones de procesamiento

Entity	Location	Operation	Output	Destination	Rule	Move Logic
MP_1	Materia_prima_1	INC Total_WIP INC MP1 OE = 12000	MP_1	Maquina_A	FIRST 1	DEC MP1 DEC Total_WIP INC Total_WIP
MP_1	Maquina_A	WAIT 20 MIN	MP_1	Maquina_C	FIRST 1	INC Total_WIP DEC Total_WIP
MP_2	Materia_prima_2	INC MP2 INC Total_WIP	MP_2	Maquina_B	FIRST 1	DEC MP2 DEC Total_WIP INC Total_WIP

Entity	Location	Operation	Output	Destination	Rule	Move Logic
MP_2	Maquina_B	WAIT 15 MIN	MP_2	Maquina_C	JOIN 1	INC Total_WIP DEC Total_WIP
MP_3	Materia_prima_3	INC MP3 INC Total_WIP	MP_3	Maquina_B	FIRST 1	DEC MP3 DEC Total_WIP INC Total_WIP
MP_3	Maquina_B	WAIT 15 MIN	MP_3	Maquina_C	FIRST 1	INC Total_WIP DEC Total_WIP
MP_1	Maquina_C	JOIN 1 MP_2 WAIT 15 MIN	Producto_M	EXIT	FIRST 1	INC Prod_M, 1 INC ingreso_M, 190 INC ing_total, 190 INC TH, 190 DEC TH, 100 DEC Total_WIP,2 INC PT INC Costo_de_M1, 60 INC costo_MP, 100 INC Costo_de_M2, 40 Prod = NP / OE
MP_3	Maquina_C	JOIN 1 MP_2 WAIT 15 MIN	Producto_N	EXIT	FIRST 1	INC TH, 200 DEC TH, 80 INC Prod_N, 1 INC ingreso_N, 200 INC ing_total, 200 DEC Total_WIP,2 INC PT INC Costo_de_M2, 40 INC Costo_de_M3, 40 INC costo_MP, 80 NP = TH - OE $I = (MP1 * 60) + (MP2 * 40) + (MP3 * 40)$ R = NP / I IT = TH / I

La verificación del modelo se llevó a cabo mediante el uso de rastreo proporcionado por el software ProModel®, llamado Trace, el cual permitió analizar paso a paso el comportamiento del sistema y comprobar que opera como se esperaba. El layout de este sistema se presenta en la Figura 4.6.

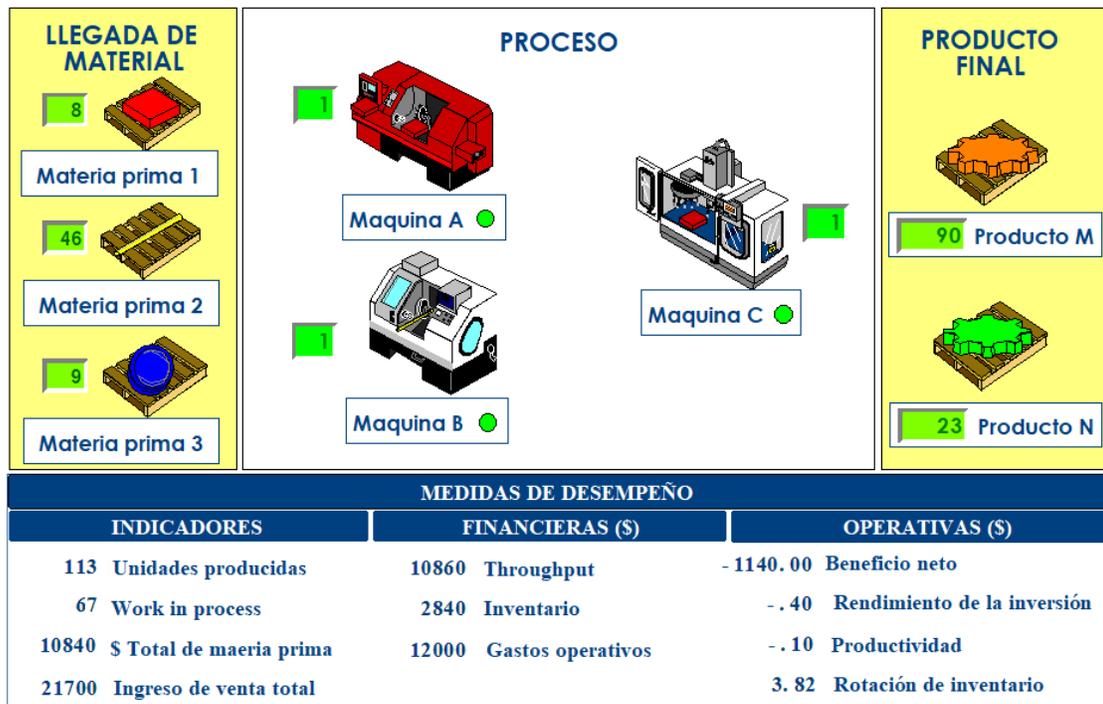


Figura 4.6. Representación del layout del sistema actual
Fuente: ProModel, 2006

4.1.5. Etapa 4. Validación del modelo

En esta etapa se provocó una falla para validar que el sistema trabajaba como se esperaba, fueron provocados pequeños cambios en los parámetros en las llegadas de material, provocando pequeños cambios en los resultados de la simulación los cuales eran esperados. Al introducir las fallas al modelo, el comportamiento de este presenta cambios previstos, demostrando así que el modelo está ajustado al modelo propuesto.

4.1.6. Etapa 5. Experimentación con base en la filosofía de TOC

Como se menciona en la sección anterior, en esta etapa se lleva a cabo la implementación de la filosofía TOC obteniendo los siguientes resultados.

1. Identificar la restricción

En la Figura 4.7 se muestra el estado de los recursos obtenidos por el software donde, %Op se refiere al porcentaje de tiempo que la localización estuvo en operación, %Setup es el porcentaje de tiempo que la localización estuvo en preparación, %Idle

significa el tiempo que la locación estuvo ociosa por falta de material, %Waiting es el porcentaje de tiempo esperado por una entidad para ensamblarse, %Blocked es el tiempo que las entidades permanecen bloqueadas en la localización y por último %Down al porcentaje de tiempo por paros no programados.

En esta Tabla se puede identificar la restricción como la operación que su porcentaje de utilización es mayor al resto de los recursos, en este caso la máquina B requiere 15 minutos para procesar el producto M además de otros 15 minutos para procesar el producto N, obteniendo como resultado un 85.83% de operación como se muestra en la Figura 4.7, lo cual lo identifica como el recurso cuello de botella.

Name	Scheduled Time (MIN)	% Operation	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down
Maquina A	2400.00	76.04	0.00	0.00	0.00	23.96	0.00
Maquina B	2400.00	85.83	0.00	0.00	14.17	0.00	0.00
Maquina C	2400.00	70.83	0.00	14.79	14.38	0.00	0.00

Figura 4.7. Estado de los recursos (General report. Location states Single)
Fuente: ProModel, 2006

2. Explotar la restricción

En la Figura 4.7 se puede observar que en recurso restrictivo tiene un porcentaje de operación de 85.83% y un tiempo de espera de 14.17%, para atacar este porcentaje de tiempo de espera, se analizó que la materia prima 2 que ha sido procesada permanece en espera de ser ensamblada mientras la maquina C se mantiene ensamblando, por ello, se propuso cambiar la cantidad de piezas trasladadas de la maquina B a la maquina C cambiándolo a lotes de transferencia de 4 piezas evitando con ello que el cuello de botella se mantenga en espera. Al hacer este cambio se obtuvo un porcentaje de utilización del 100% en el cuello de botella como se muestra en la Figura 4.8.

Name	Scheduled Time (MIN)	% Operation	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down
Maquina A	2400.00	83.33	0.00	0.83	0.01	15.83	0.00
Maquina B	2400.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maquina C	2400.00	77.50	0.00	20.21	2.29	0.00	0.00

Figura 4.8. Estado de los recursos después de explotar el recurso cuello de botella (General report. Location states Single)

3. Subordinar la restricción

Para subordinar la restricción se desarrollaron las siguientes tres etapas:

a. Programar la restricción (Tambor).

El cuello de botella o la restricción es el tambor, el cual determina el rendimiento del sistema. La función del tambor es proteger las fechas de envío y como se puede analizar en la descripción del sistema, el cliente demanda 100 unidades del producto M y 50 unidades del producto N a la semana, pero el sistema solo tiene capacidad de producir únicamente 100 unidades del producto M y 30 unidades del producto N con una disponibilidad de 40 horas por máquina. Por lo tanto podemos observar que el recurso cuello de botella no cuenta con la capacidad suficiente, aun trabajando con el 100% de su capacidad, para cubrir la demanda semanal del cliente.

b. Determinar el tamaño del amortiguador (Amortiguador).

Se calculó el tamaño del amortiguador que protegerá a la restricción de fluctuaciones en el sistema como podría ser el retraso en la llegada de materia prima 2 a la maquina B. En la Figura 4.9 se representa el layout del modelo aplicando el amortiguador (*BufferMP2*) con una capacidad de 4 piezas entre la llegada de materia prima 1 y la maquina B. El tamaño del amortiguador de la restricción se eligió de forma intuitiva en la base de varias ejecuciones iniciales simuladas hechas para dar algún tipo de instinto, ya que la decisión inicial debe tener en cuenta que el tamaño del amortiguador debe ser bastante largo, hasta que sea realista. El tamaño del amortiguador puede ser tres veces mayor que el promedio de tiempo de la restricción (Schragwnheim & Ronen, 1990). Por lo que se colocó un amortiguador antes de la restricción con un tiempo de protección de una hora para la materia prima 2.

c. Programar la liberación de material al ritmo de la restricción (Cuerda).

Después de establecer un amortiguador de protección es necesario modificar los arribos, esto es la cuerda del sistema, en función de la tasa de producción del

recurso cuello de botella, por lo que, al manipular las variables de entrada del sistema se decidió programar la llegada de materia prima 2, en lotes de 10 unidades cada 3 horas y la materia prima 3, llegarán 8 piezas cada 12.25 horas.

En la Figura 4.9 es posible apreciar el cambio de cada uno de los indicadores con la aplicación del sistema de programación DBR y las mejoras que se obtuvieron, logrando aumentar la cantidad de producto terminado y una reducción considerable en el WIP.

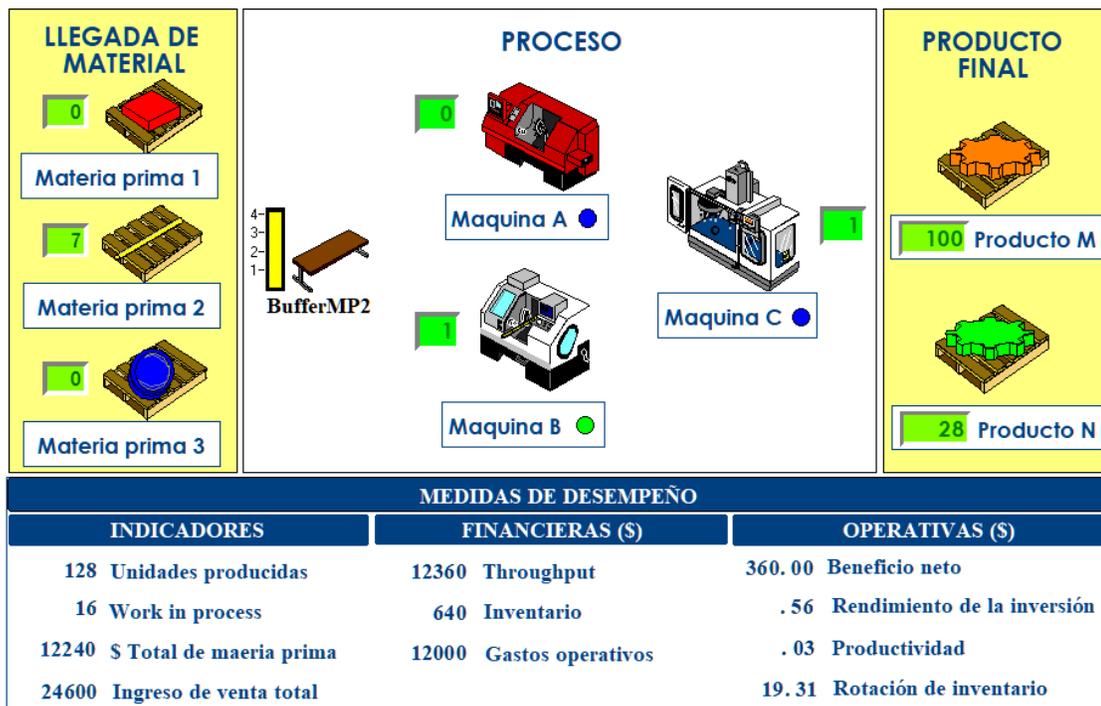


Figura 4.9. Representación del layout del modelo aplicando la metodología DBR
Fuente: ProModel, 2006

4. Elevar la restricción

En esta etapa, se requiere elevar la capacidad del recurso mediante una inversión económica. Esto solo se hace si los pasos 2 y 3 no aumentaron la capacidad de restricción de tal manera que no cumpla con los requerimientos del cliente, esta decisión dependerá de los intereses de cada empresa, en este caso, al analizar los resultados del sistema, aún con el 100% de capacidad en el recurso restrictivo. Por lo que, una solución para poder cumplir con la demanda del cliente podría ser trabaja horas de tiempo extra cada semana, pero la empresa elevaría los gastos de operación

mientras mantenga esta demanda, por lo tanto será recomendable invertir en la compra de una segunda maquina B en el que se aaria una inversión inicial pero se aumentaría la capacidad para cumplir con la demanda del cliente actual, además de tener capacidad para más pedidos. En la Figura 4.10, se muestra el layout del modelo con la metodología aplicada.

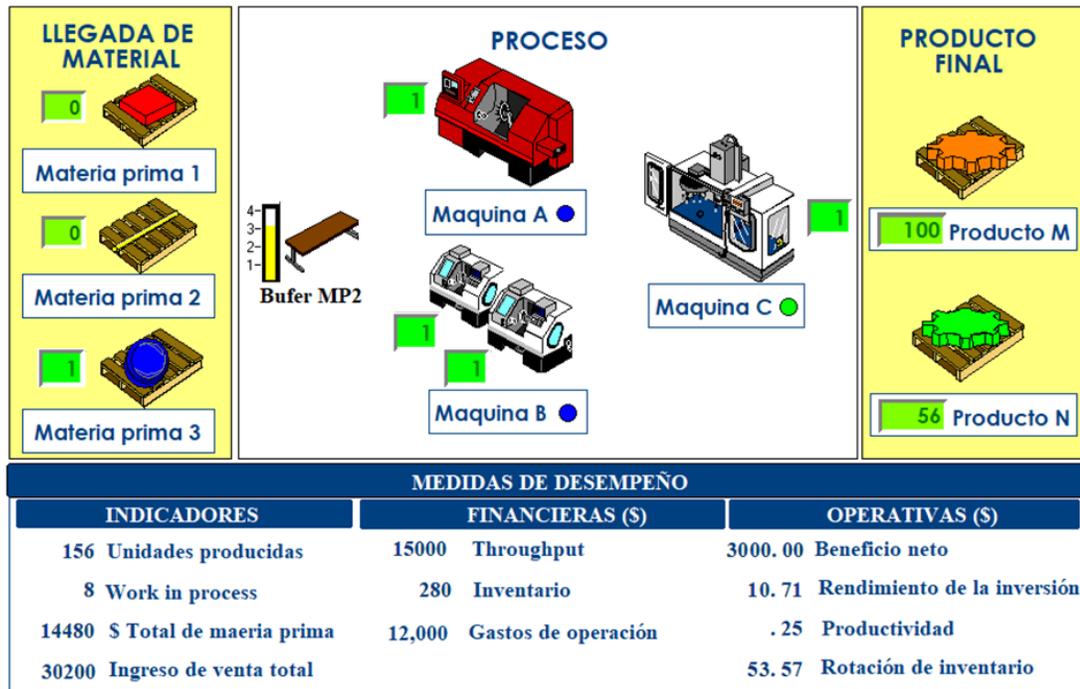


Figura 4.10. Layout del modelo final
Fuente: ProModel, 2006

4.1.7. Etapa 6. Documentación y presentación de resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al evaluar cada una de las medidas de desempeño establecidas, haciendo una comparación entre el estado actual del sistema y los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta basadas en los principios de la teoría de restricciones y simulación de eventos discretos.

Inventario en proceso (WIP)

En la Figura 4.11. Se muestra una comparativa del comportamiento del inventario en proceso en cada una de las modificaciones que se le hicieron al sistema de manufactura analizado. Se puede observar como en el sistema actual, la cantidad de piezas que se

mantenían en el sistema al final de la semana era de 67 unidades, posteriormente fueron aplicados los principios de TOC y sistema DBR obteniendo una reducción en la cantidad de piezas en el sistema al final de la semana de 16 piezas, por último se observa que a aplicar cada una de las etapas de la metodología y además realizar una inversión al comprar una segunda maquina B se logró reducir el inventario de inventario en proceso a únicamente 8 unidades en el sistema.

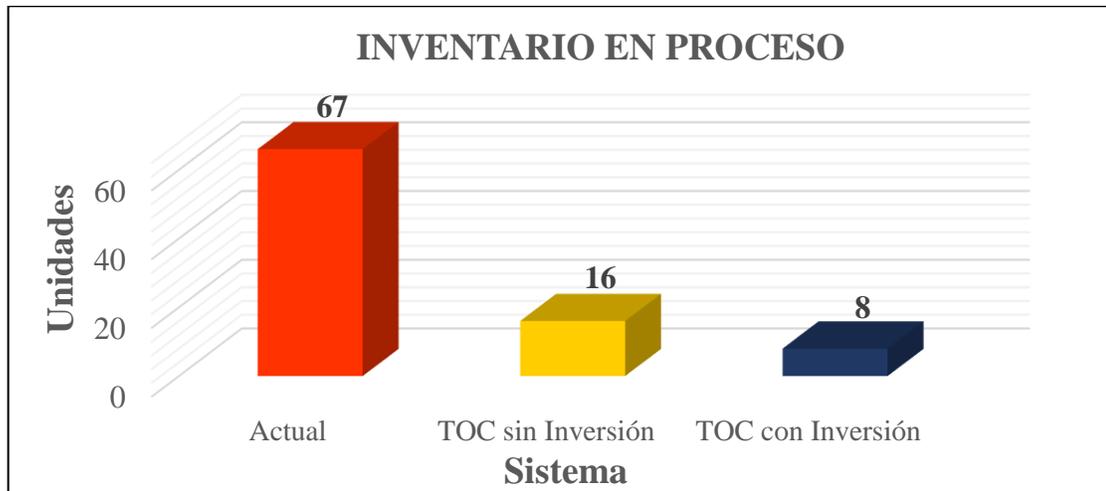


Figura 4.11. Resultados del inventario en proceso en cada uno de los sistemas analizados.

Unidades producidas (PT)

Como se mencionó en secciones anteriores, el sistema actual no contaba con la capacidad suficiente de satisfacer las necesidades del cliente, produciendo únicamente 113 unidades, 90 piezas del producto M y 23 piezas del producto N, al implementar la metodología propuesta se obtiene un total de 128 unidades, 100 y 28 respectivamente, por último al llevar a cabo la metodología y una inversión inicial se obtiene un total de 156 unidades, logrando que el sistema cumpla con las necesidades de demanda como se muestra en la Figura 4.12. Esto es debido a que en el modelo que opera bajo la metodología desarrollada se considera un amortiguador de existencias inicial para que el recurso restrictivo, que es el que determina el número de piezas que salen del sistema empiece a su máxima capacidad.

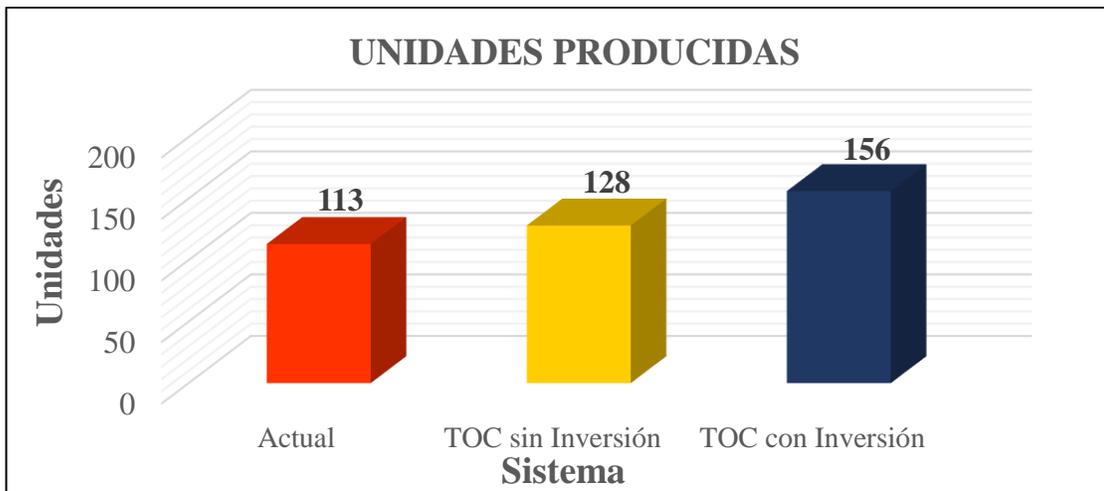


Figura 4.12. Resultado de las unidades producidas en cada uno de los sistemas analizados.

Inventario (I)

El inventario es uno de los indicadores más importantes ya que es la cantidad del dinero invertido en comprar material que se espera vender, este indicador está directamente relacionado con la cantidad de inventario en proceso. Los resultados del inventario para cada uno de los modelos se muestran en la Figura 4.13, donde se puede observar como el modelo actual muestra una inversión en materia prima de \$2,840 dólares, el modelo desarrollado con la metodología muestra un nivel de inventario de \$640 y el modelo de mejora con inversión inicial muestra un resultado de \$280 dólares de inventario. Esto debido a que en el modelo operando bajo la metodología desarrollada, el material se libera de una forma controlada y esto conduce a que exista menor inventario en proceso y con ello una menor inversión de materia prima.

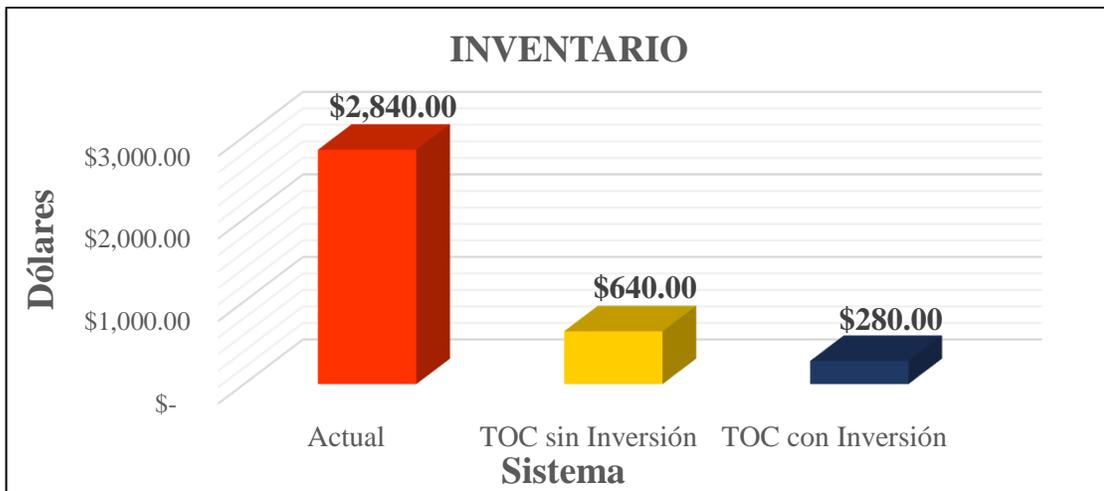


Figura 4.13. Resultado de los costos de inventario en cada uno de los sistemas analizados.

Throughput (TH)

En la Figura 4.14, se muestra como al implementar la metodología con base en los principios de TOC, el throughput del sistema aumenta obteniendo un resultado de hasta \$15,000 dólares, el modelo original trabajaba generando un throughput de \$10,860 dólares a la semana. Esto debido a que se producen más unidades, lo cual es una ventaja que posteriormente se verá representada en mayores ganancias.

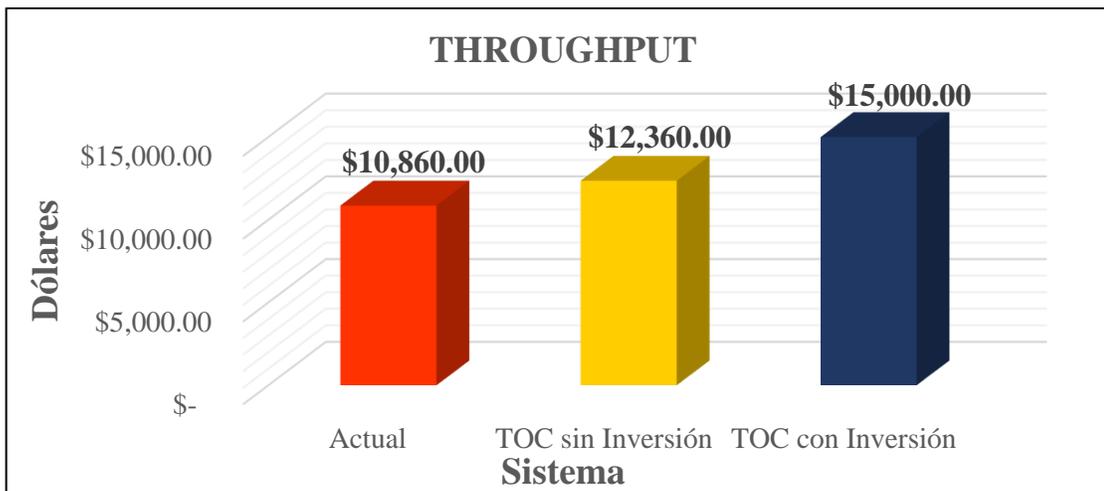


Figura 4.14. Resultado del throughput en cada uno de los sistemas analizados.

Mediante el establecimiento de cada uno de los indicadores de desempeño evaluados anteriormente, en este apartado, se puede analizar cada una de las medidas de desempeño financieras detalladas en el capítulo 2, y los resultados fueron los siguientes:

El beneficio neto (ecuación 2.1) que presenta en el sistema actual es negativo, ya que este no contaba con la capacidad suficiente para satisfacer la demanda del cliente con un total de pérdida de \$1,140 dólares semanales, posteriormente el sistema TOC sin inversión genera un beneficio neto de \$360 dólares y por último el modelo TOC con inversión genera un beneficio neto de \$3,000. Por otro lado, el rendimiento del sistema actual (ecuación 2.2) es 40%, posteriormente el sistema TOC sin inversión genera un rendimiento de 56% y por último el modelo TOC con inversión genera 107.1% de rendimiento.

La productividad (ecuación 2.3) también incremento considerablemente ya que en el sistema actual presentaba un porcentaje negativo de productividad del 10%, mientras que el sistema TOC sin inversión presenta un 3% de productividad, mientras que realizando la inversión se genera un 25% de productividad. Por último, la rotación de inventario (ecuación 2.4) en el sistema actual es de 3.82 veces, mientras que el sistema TOC muestra una rotación de 19.31 veces, finalmente el sistema final con inversión retorna 53.57 veces el inventario.

4.2. CASO 2. EMPRESA PRODUCTORA DE FLECHAS DE VELOCIDAD CONSTANTE (CVJ)

4.2.1. Descripción del sistema de manufactura

El sistema real analizado con la metodología propuesta corresponde a la línea 2 de producción de campanas con número de parte 2480 en una empresa del sector automotriz. Actualmente, dentro de los principales productos que elabora la empresa se encuentra las flechas de velocidad constante (CVJ), la cual consta de tres partes principales que son la junta fija, semieje y junta deslizable. La línea 2 se encarga procesar uno de los 9 componentes (cincho menor, bota, cinto mayor, bolas, pista, jaula y campana) que conforma a la junta fija, conocida como campana. El proceso de producción de la línea 2 se puede apreciar en la Figura 4.15, el cual consta de 23 máquinas, un almacén de materia prima y uno de producto terminado. Además 6 operarios y 2 brazos robóticos que se encargan de transportar las piezas de una locación a otra.

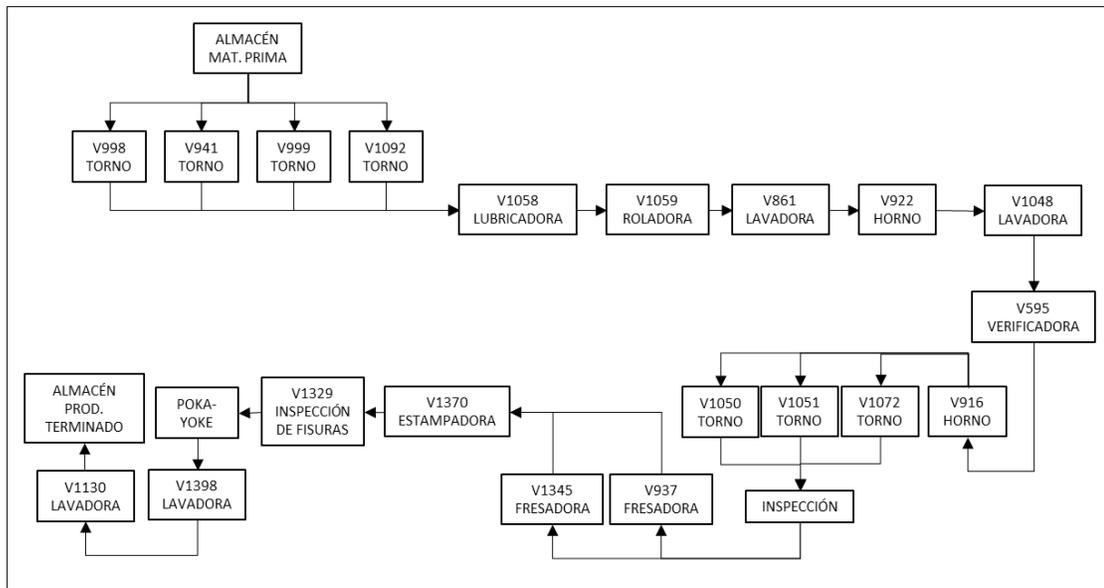


Figura 4. 15. Diagrama de flujo de la entidad a través del sistema (línea 2)

Fuente: Elaboración propia

El total de gastos de operativos es una constante de \$20,000 dólares diarios. El producto maneja un promedio de demanda de 96,000 unidades al mes con un precio de venta de \$10.41 dólares por unidad y un costo de materia prima de \$2.58 dólares. A continuación

se desarrollan cada una de las etapas de la metodología al sistema propuesto para posteriormente analizar si se cumplen los resultados esperados.

4.2.2. Etapa 1. Definir las características de funcionamiento del sistema

En la Figura 4.16 se muestra la distribución de la línea 2, en ella se observan cada uno de los datos que estructuran la línea, como son las locaciones y su número de identificación alfanumérica, representadas con líneas de color azul y rojo se muestran cada una de las bandas transportadoras (Conveyor C1-C24), así como la ubicación de cada uno de los operarios y brazos robóticos dentro de la línea de producción. A continuación, se describe detalladamente cada una de las operaciones, movimientos y recorridos de dentro de la línea.

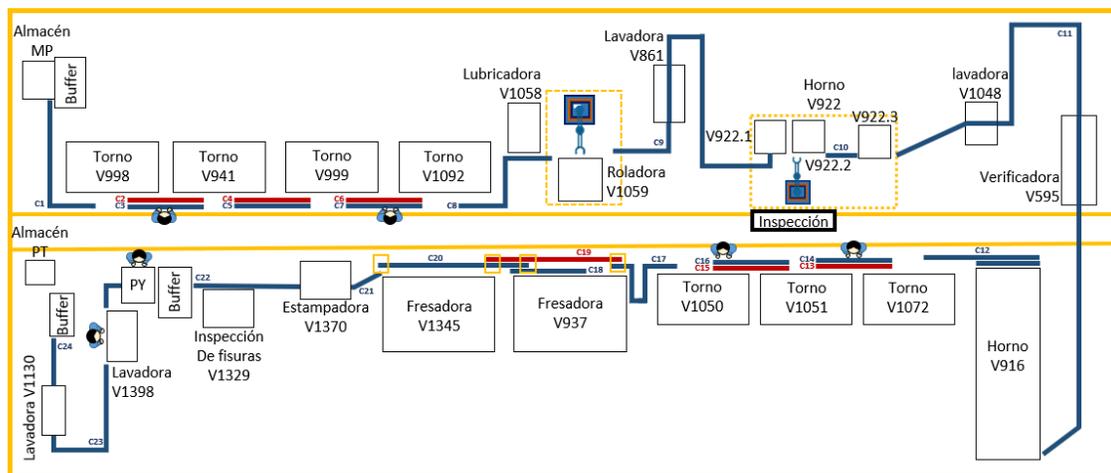


Figura 4. 16. Representación del layout en la línea 2
Fuente: Elaboración propia

- **Entidades:**

Campana 2480, con un diámetro de 88.15mm.

- **Llegadas:**

Las piezas entran al sistema 740 unidades cada que la línea lo requiera.

- **Transporte:**

Todos los movimientos entre una operación y otra son realizados mediante el uso de bandas transportadoras de acumulación, los cuales tienen una velocidad de 6 m/min.

- ***Movimientos:***

Las entidades se mueven de una ubicación a la siguiente según la capacidad disponible del conveyer de entrada en la siguiente ubicación.

- ***Horario de trabajo:***

Las estaciones están programadas para operar 24 horas al día, 7 días a la semana, se trabajan 3 turnos, cada operario trabaja 4 días y descansa 3. Los operarios cuentan con 12 horas de trabajo y 1.5 horas de descanso por turno; Los operarios 1, 3 y 5 salen a un descanso de media hora a las 9:00am y a las 11:00pm, además de un descanso de 15 min a las 3:00am y a las 3:00pm. Mientras que los operarios 2, 4 y 6 salen a un descanso de media hora a las 9:30am y a las 11:30pm, además de un descanso de 15 min a las 3:15am y otro a las 3:15pm

- ***Locaciones:***

La línea 2 consta de dos almacenes cada uno con capacidad de 60 unidades, siete máquinas de torno (V998, V941, V999, V1092, V1072, V1051 y V1050) cada una con capacidad unitaria, tres lavadoras de material (V861, V1048 y V1130) que transportan piezas a la velocidad del conveyer, dos fresadoras (V937 y V1345) con capacidad de 2 piezas cada una, dos poka-yokes (V1329 y POKA-YOKE) con capacidad unitaria. Además, una lubricadora (V1058), roladora (V1059), verificadora (V595) y estampadora (V1370) cada una de ellas con capacidad unitaria, un horno (V916) con capacidad de 300 piezas, una lavadora de ultrasonido (V1398) con capacidad de 50 piezas y por último un horno (V922) compuesto por 3 etapas; la primera se encarga del tratamiento de inducción interno (V922.1) con capacidad de dos piezas, la segunda se encarga del tratamiento de inducción externo (V922.2) con capacidad de dos piezas y por último el tratamiento térmico (V922.3) con capacidad unitaria.

- ***Recursos:***

De acuerdo a la Tabla 4.3, el sistema cuenta con 6 operarios; el operario 1 se encarga de mover el material del almacén de materia prima al buffer y de transportar el

material de C1 hacia el torno V998 o V941 (el que se encuentre disponible), el operario 2 transporta el material de C4 hacia el torno V999 o V1092 y se encarga de mover las piezas ya torneadas en C5 al C8, el operario 3 se encarga de mover las piezas de C12 al torno V1072 o V1052 y transportar el material sin procesar a C15 para que posteriormente el operario 4 lo procese en el torno V1050 y enviar las piezas ya torneadas a inspección y posteriormente a C17. El operario 5 se encarga de la inspección de campanas por partículas magnéticas y por último el operario 6 transporta el material de C22 hacia la lavadora de ultrasonido y el empaque del producto terminado. Por otro lado, el sistema cuenta con dos brazos robóticos; el primero mueve la pieza de la lubricadora hacia la roladora y el segundo transporta dos piezas del tratamiento de inducción interna hacia el tratamiento de inducción externo.

Tabla 4.3. Interacción entre recurso y operación

Recurso	Locación
Operario 1	Almacén MP, Buffer MP, Torno V998 y V941
Operario 2	Torno V999 y V1092
Operario 3	Torno V1072 y V1051
Operario 4	Torno V1050, Área de inspección
Operario 5	Poka-Yoke
Operario 6	Lavadora V1398 y V1130, Buffer PT y Almacén PT
Brazo robótico 1	Lubricadora V1058 y Roladora V1059
Brazo robótico 2	Horno V922.1 y V922.2

- **Proceso:**

El proceso comienza una vez que la materia prima llega al sistema al almacén de materia prima, una vez que llegan las piezas el operario 1 toma las piezas y las coloca en el buffer de materia prima (esta operación la hace cada que se encuentra desocupado, e el buffer se encuentre vacío) en donde C1 las transporta hasta el torno V998. Una vez que las piezas se encuentran al final de C1 empieza la operación de torneado externo, en donde, el operario 1 introduce una pieza a la máquina de torneado que se encuentre disponible (V998 o V941), si cada una de las dos máquinas de torneado se encuentran ocupadas, el operario 1 colocara la pieza en C4, esto para que el operario 2 tome dicha pieza y la procese en la máquina de torno que se

encuentre disponible (V999 o V1092). En cuanto las piezas hayan pasado por el proceso de torneado, el operario 1 retira dichas piezas de la máquina y las coloca en C3 o C5 dependiendo la posición en a que se encuentre, posteriormente el operario 2 toma las piezas terminadas de C5 y para después moverlas a C8 y transportarlas a la siguiente operación.

Una vez que la pieza se encuentra en C8, esta es detenida a la operación de lubricado y al finalizar dicha operación, la pieza es regresada al conveyor para posteriormente ser tomada por el brazo robótico 1 y llevado al proceso de formado de estrías (V1059), en cuanto esta operación termina, el brazo robótico 1 toma la pieza y la coloca en C9. La pieza es transportada mientras pasa por un proceso de lavado a la velocidad del conveyor (6m/min) para posteriormente ser enviada al tratamiento térmico (V922). El brazo robótico 2 toma 2 piezas al final de C9 y los pasa por un tratamiento de inducción interno (V922.1), espera a que el tratamiento termine y saca las dos piezas para posteriormente pasarlas por un tratamiento de inducción externo (V922.2) y por último el brazo robótico 2, toma las piezas terminadas y las coloca en C10 para ser transportadas al proceso de revenido.

Al finalizar el proceso de revenido, las piezas son transportadas a C11, para pasar por un proceso de lavado y después enviarlas a la inspección de diámetros de pernos en la máquina V595. La siguiente operación corresponde a la de revenido en el horno V916, esta máquina está compuesta de una banda transportadora que mueve el material mientras estas se hornean. Una vez que las piezas se encuentran listas, estas son enviadas a C12 para posteriormente ser enviadas al proceso de torneado en duro, el operario 3 toma una de las piezas de C12 y lo lleva a la máquina de torno que se encuentre disponible (V1072 o V1051), o bien si ambas se encuentran en operación, coloca la pieza en C15 para que el operario 4 lo lleve a la máquina de torno V1050. Ya que 3 piezas hayan pasado por el proceso de torneado en duro, el operario 4 las lleva a la estación de inspección, en donde le realiza algunas pruebas de diámetros y poka-yokes.

Siempre y cuando las piezas hayan pasado las pruebas, el operario 4 coloca cada una de ellas en C17 para pasar al proceso de fresado, donde el conveyor C18, C19 y C20 se encargan de transportar las piezas a la fresadora que se encuentre disponible (V937 o V1345), esto mediante el uso de elevadores en cada una de las entradas y salidas de dichas máquinas. Una vez que las piezas paran por el proceso de fresado, las piezas son transportadas por C21 hacia la estampadora, posteriormente a la inspección de fisuras y por último a la estación de inspección de campanas por partículas magnéticas la cual se lleva a cabo mediante la inspección visual del operario 5. Finalizada dicha inspección las piezas son transportadas por C22 a la estación de lavado por ultrasonido, en la que el operario 6 se encarga de introducir 50 piezas al proceso de lavado y una vez terminado son colocadas por el operario 6 en C23. La siguiente operación es la de lavado de material en la que las piezas llegan a la lavadora por medio de C23, para posteriormente pasar a C24 y por último transportadas al área de buffer de producto terminado para ser colocada en contenedores dentro del almacén de producto terminado.

La línea de producción se deja como está después de terminar las 12 horas de un turno y continúa desde allí en el siguiente turno. Los indicadores de desempeño establecidos en (Goldratt E. M., 1990) para la comparación del funcionamiento total del sistema, de los dos enfoques para controlar el flujo de producción, en estudio, se definieron las siguientes medidas de desempeño, estos indicadores pueden ser calculados automáticamente mediante la generación de variables (global) proporcionados por el software ProModel®.

4.2.3. Etapa 2. Recolección y análisis de datos

Los datos fueron recolectados de dos maneras, algunos de los datos operativos dentro de la línea de producción fueron tomados mediante muestras y entrevistas al personal especializado en la línea, estos datos fueron los tiempos de actividad, la capacidad de cada locación, flujo del material dentro del sistema, las rutas, locaciones y asignación de recurso, mientras que, los datos de productos, clientes, horarios, tiempos de inactividad

y tasa de llegada fueron obtenidos mediante datos históricos capturados dentro del sistema de la empresa y corroborados por el personal especializado.

Tiempo de operación en el área de inspección: Para determinar el tiempo promedio que toma el operario 5 en realizar la inspección a 3 piezas de manera simultanea, se hizo un muestreo de 10 inspecciones. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos en la observación.

Tabla 4.4. Muestreo de tiempos de inspección realizados por el operario 4

Muestra	Tiempo (Segundos)
1	15.81
2	14.92
3	14.95
4	15.92
5	13.29
6	15.30
7	14.74
8	15.28
9	14.52
10	11.89
Promedio	14.662
Desviación	1.22

Mediante el uso del software de Minitab los conjuntos de datos pueden analizarse automáticamente para conocer el tamaño necesario de muestras.

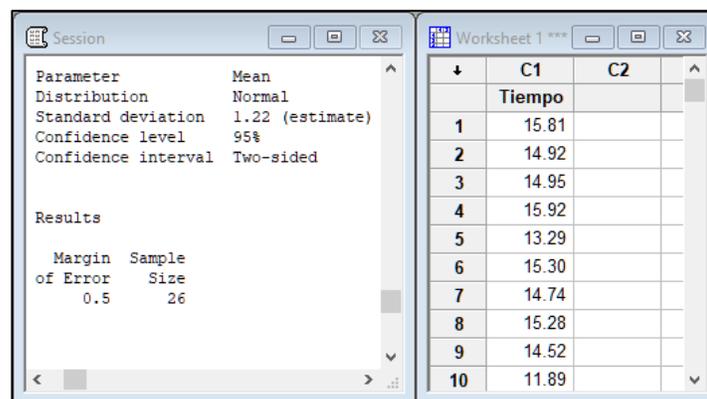


Figura 4.17. Tamaño de muestra calculado en software Minitab
Fuente: Minitab, 2016

En la Figura 4.17 se muestran los resultados obtenidos para conocer el tamaño de muestra considerando un error de $e=0.5$, un nivel de confianza de 95% obteniendo como resultado un tamaño de muestra de 26 datos, los cuales fueron recolectados y se muestran a continuación (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Muestreo obtenido de tiempos de inspección realizados por el operario 4

Muestra	Tiempo (Segundos)	Muestra	Tiempo (Segundos)	Muestra	Tiempo (Segundos)
1	15.81	11	13.23	21	14.59
2	15.92	12	16.53	22	13.32
3	10.95	13	11.66	23	15.08
4	13.92	14	14.95	24	16.50
5	14.29	15	16.22	25	12.65
6	11.30	16	15.90	26	14.47
8	13.28	18	11.29	Promedio	14.01
9	10.52	19	11.31	Desviación	1.83
10	14.89	20	14.99		

Tiempo de procesamiento: El tiempo promedio que requiere cada locación para cumplir con su operación se muestran en la Tabla 4.6. Cabe mencionar, que cada uno de estos datos se obtuvieron bajo el mismo procedimiento para la obtención del tamaño de muestra.

Tabla 4.6. Tiempo de procesamiento

Máquina	Tiempo de procesamiento (seg/pieza)	Máquina	Tiempo de procesamiento (seg/pieza)
V998	67.70	V916	67.80
V941	72.30	V1072	49.40
V999	67.10	V1051	48.50
V1092	67.80	V1050	49.90
V1058	14.28	V937	26.80
V1059	20.13	V1345	29.01
V922.1	17.65	V1370	15.89
V922.2	10.81	V1329	11.35
V922.3	16.04	V1398	5.54
V595	11.67	V1130	10.77

Tiempos de inactividad: Los datos históricos del tiempo de inactividad en la línea dos proporcionados por la empresa se muestran en la Tabla 4.7. El análisis de los tiempos de

inactividad se llevó a cabo mediante una prueba de bondad de ajuste, utilizando la herramienta estadística Stat::fit que proporciona el software ProModel®.

Tabla 4.7. Tiempo de inactividad

Día	Tiempo de inactividad (Hr)	Día	Tiempo de inactividad (Hr)
1	1.69	16	4.59
2	2.09	17	3.80
3	2.99	18	3.17
4	5.24	19	5.11
5	4.28	20	7.72
6	3.56	21	5.67
7	8.21	22	0.56
8	2.54	23	4.50
9	8.55	24	1.82
10	5.27	25	2.21
11	8.64	26	4.46
12	2.36	27	3.67
13	4.30	28	2.66
14	5.29	29	2.45
15	3.56	30	0.65

Los datos obtenidos fueron llevados a la Tabla de datos del software, una vez ingresados en la Tabla se seleccionó la opción *Auto::fit*, esto para que el software arroje las distribuciones en orden de ajuste de los datos analizados. Como se muestra en la Figura 4.18, en el apartado *Automatic Fitting y Comparison* sugiere que la probabilidad que se ajusta mejor a los tiempos de inactividad es la Lognormal(1.23,0.639), además se muestra un análisis detallado de la prueba.

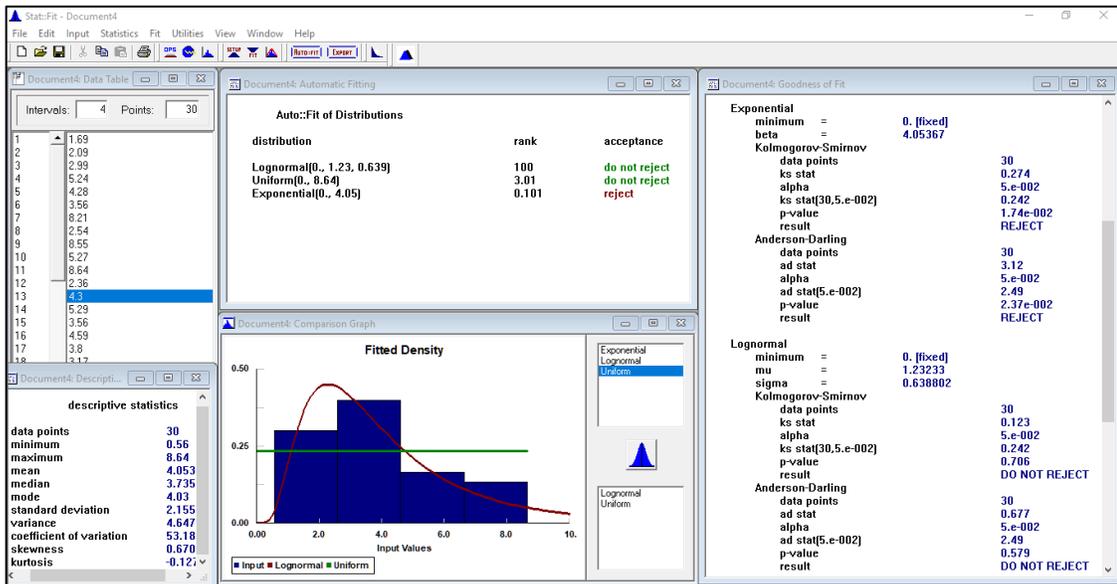


Figura 4.18. Resultados de la curva y la prueba de bondad de ajuste
Fuente: ProModel, 2006

4.2.4. Etapa 3. Construcción y verificación del modelo

Una vez establecidas las variables y datos del sistema, se ingresó al programa para construir un modelo de simulación que imitará el comportamiento del sistema de manufactura actual. Los datos iniciales fueron los siguientes:

- **Build (*Entities*)**

En la Figura 4.19 se muestran la declaración de la entidad campana 2480 con un diámetro de 88.15mm.

Icon	Name	Speed (fpm)	Stats	Notes...
	Campana	150	Time Series	

Figura 4.19. Entidades del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (*Locations*)**

En la Figura 4.20 se muestra la ventana de declaración de locaciones del modelo, en la cual se establecieron las 23 maquinarias involucradas en el sistema, más 2 estaciones de llegada de material, 3 buffers y 24 bandas transportadoras.

Icon	Name	Cap.	Units	DTs...	Stats...	Rules...
	Almacen_MP	inf	1	None	Time Serie Oldest	
	Buffer_MP	60	1	None	Time Serie Oldest	
	V998	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V941	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V999	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1092	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1058	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1059	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V961	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V922.1	2	1	None	Time Serie Oldest	
	V922.2	2	1	None	Time Serie Oldest	
	V922.3	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1048	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V695	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1072	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1051	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1050	1	1	None	Time Serie Oldest	
	Inspection	3	1	None	Time Serie Oldest	
	V937	2	1	None	Time Serie Oldest	
	V1345	2	1	None	Time Serie Oldest	
	V1370	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1329	1	1	None	Time Serie Oldest	
	Buffer_PY	65	1	None	Time Serie Oldest	
	PY	1	1	None	Time Serie Oldest	
	V1398	50	1	None	Time Serie Oldest	
	V1130	1	1	None	Time Serie Oldest	
	Buffer_PT	60	1	None	Time Serie Oldest	
	Almacen_PT	144	1	None	Time Serie Oldest	

Icon	Name	Cap.	Units	DTs...	Stats...	Rules...
	Loc1	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc2	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc3	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc4	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc5	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc6	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc7	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc8	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc9.1	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc9	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc10	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc11	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc11.1	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc12	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc13	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc14	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc15	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc16	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc17	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc18	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc19	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc20	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc21	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc22	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc23.1	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc23.2	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc23	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	
	Loc24	INFINIT	1	None	Time Serie Oldest, FIFO	

Figura 4.20. Locaciones y conveyor dentro del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Path Networks)**

En la Figura 4.21, se muestra la declaración de cada una de las redes dentro del sistema, las cuales conectan a cada operador con su estación de trabajo por medio de trayectorias, la línea azul corresponde a la red de movimiento del operario 1, la roja al operario 2. Por otro lado, la línea verde y amarilla corresponden al operario 3 y 4 respectivamente y por ultimo las líneas rosa y celeste corresponden a la red del operario 5 y 6.

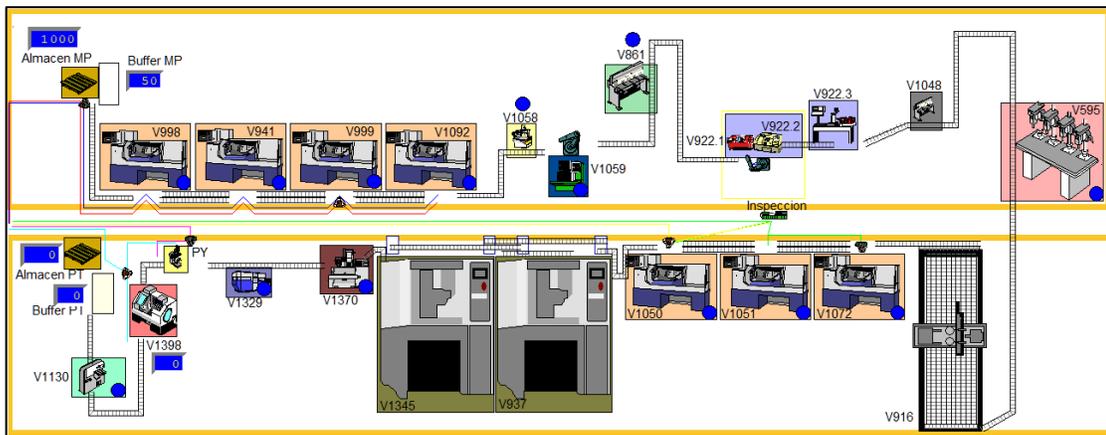


Figura 4.21. Red que permite el movimiento de los operarios por sus estaciones
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (Resources)**

En la Figura 4.22 se muestran la declaración de los 8 recursos involucrados en el Sistema.

Icon	Name	Units	DTs...	Stats	Specs...	Search...	Logic...	Pts...	Notes...
	Operario1	1	None	By Unit	Trayectoria_Op1, None		0	1	
	Operario2	1	None	By Unit	Trayectoria_Op2, None		0	1	
	Robot1	1	None	By Unit	Trayectoria_Rb1, None		3	1	
	Robot2	1	None	By Unit	Trayectoria_Rb2, None		4	1	
	Operario3	1	None	By Unit	Trayectoria_Op3, None		4	1	
	Operario4	1	None	By Unit	Trayectoria_Op4, None		3	1	
	Operario5	1	None	By Unit	Trayectoria_Op5, None		0	1	
	Operario6	1	None	By Unit	Trayectoria_Op6, None		0	1	

Figura 4.22. Recursos del modelo
Fuente: ProModel, 2006

- **Build (*Processing*)**

La Figura 4.23 representa la declaración de cada una de las rutinas que llevara a cabo la operación del proceso.

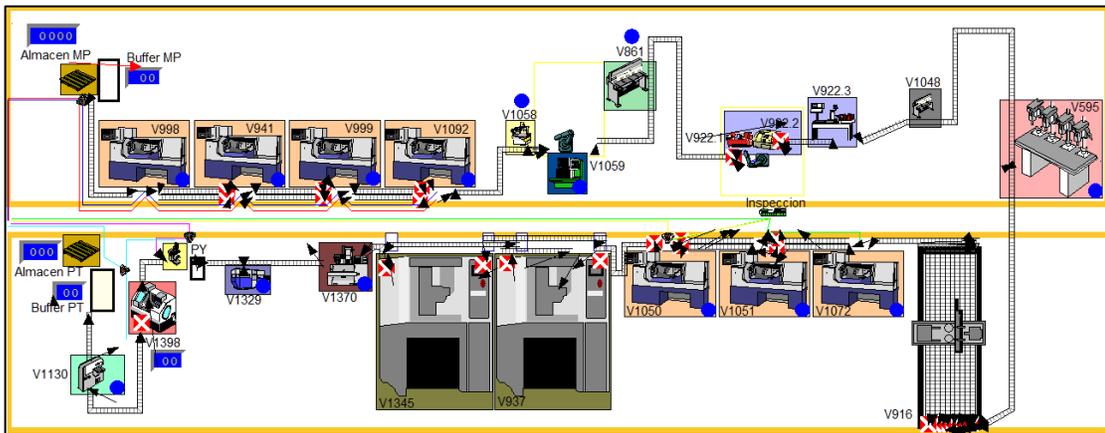


Figura 4.23. Representación del layout y declaraciones del proceso en el sistema actual
Fuente: (ProModel, 2006)

- **Build (*Variables*)**

Se declararon 11 variables de tipo global, para representar los indicadores establecidos en la etapa 1, *Inventario en procesos (WIP)*, *Unidades producidas (PT)*, *Inventario (I)*, *Throughput (TH)*, *Beneficio neto (NP)*, *Rendimiento de la inversión (R)*, *Productividad (P)* y *Rotación de inventario (IT)*, las cuales se muestran en la Figura 4.24.

Icon	ID	Type	Initial value	Stats	Notes...
Yes	PT	Integer	0	Time Series,	
Yes	WIP	Integer	0	Time Series,	
Yes	Costo_MP	Integer	0	Time Series,	
Yes	Ingreso_T	Integer	0	Time Series,	
Yes	TH	Integer	0	Time Series,	
Yes	I	Integer	0	Time Series,	
Yes	GO	Integer	0	Time Series,	
Yes	NP	Integer	0	Time Series,	
Yes	R	Integer	0	Time Series,	
Yes	Prod	Integer	0	Time Series,	
Yes	IT	Integer	0	Time Series,	

Figura 4.24. Variables globales del modelo
Fuente: ProModel, 2006

La etapa de verificación consistió en observar y analizar que el modelo de simulación construido corriera de acuerdo a la lógica de funcionamiento de un sistema de manufactura. La verificación se realizó con el sistema de rastreo de ProModel® llamado Trace, esta opción permitió conocer como trabajó el modelo paso a paso cada una de las instrucciones y operaciones, y con esto comprobar que el modelo se comportó como se esperaba. El layout final de este sistema se presenta en la Figura 4.25.

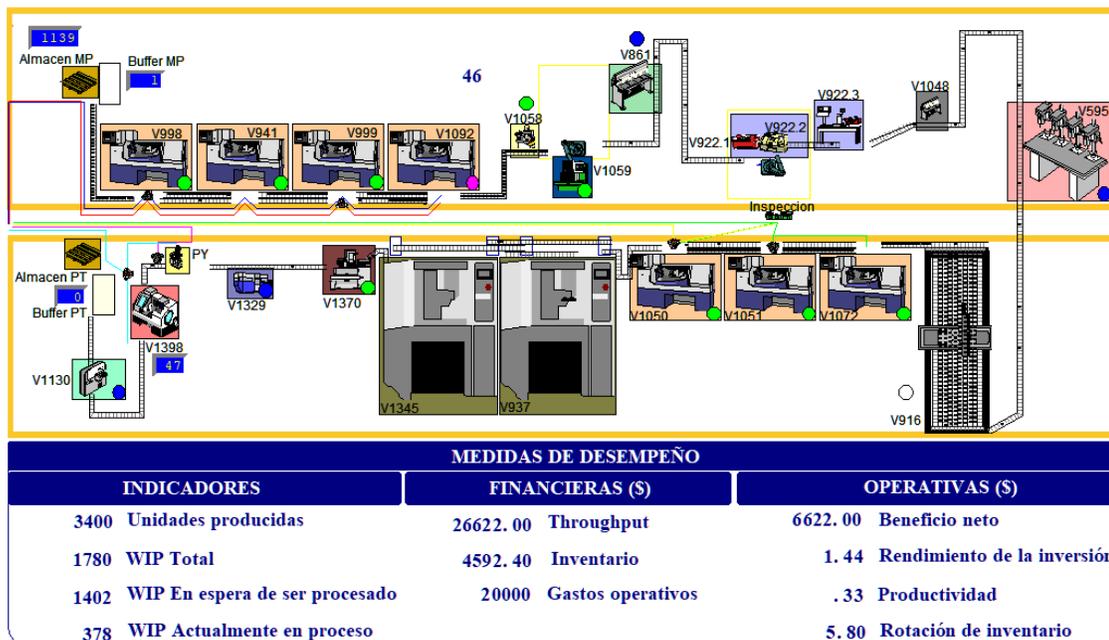


Figura 4.25. Representación del layout del sistema actual
Fuente: ProModel, 2006

4.2.5. Etapa 4. Validación del modelo

Para validar que los resultados reportados por el programa de simulación representen adecuadamente al sistema real, se aplicó la prueba t con una de las medidas de desempeño del sistema, esta es, el total de piezas producidas, tomando 30 datos históricos del sistema real proporcionados por la empresa y generando 30 réplicas para obtener el total de piezas producidas en el modelo obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.8. Piezas procesadas sistema real y modelado

Observación	Observaciones del sistema (x)	Observaciones del Modelo (y)
1	3782	3400
2	3670	3350
3	3337	3450
4	3211	3368
5	3500	3481
6	3524	3150
7	2570	3393
8	3591	3385
9	2162	3403
10	3099	3450
11	2575	3442
12	3750	3310
13	3390	3219
14	3208	3250
15	3522	3481
16	3126	3450
17	3470	3350
18	3710	3450
19	3234	3243
20	2751	3450
21	3133	3243
22	4120	3450
23	3726	3450
24	3345	3400
25	3570	3304
26	3590	3421
27	3167	3405
28	2837	3200
29	3512	3497
30	2726	3400

Estos datos fueron utilizados para generar una prueba de hipótesis:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad (4.1)$$

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y \quad (4.2)$$

Donde μ_x es la media de las observaciones en el sistema y μ_y es la media de las observaciones en modelo. Dicho análisis se llevó a cabo haciendo una prueba t de dos muestras en el software Minitab con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, Mediante el enfoque de valor p para la prueba de hipótesis y así rechazar H_0 si el valor p es menor que α , obteniendo como resultado un valor $p=0.341$ por lo tanto se acepta la hipótesis nula, obteniendo con ello la validación del modelo.

Número de réplicas: Con los datos de total de piezas producidas obtenidos en las 30 simulaciones se determinó el número de réplicas requeridas para estimar las medidas de desempeño necesarias, se obtuvieron los valores máximos y mínimos de las observaciones, los cuales se ingresaron a la herramienta Stat::fit con un margen de error de 50 y un nivel de confianza de 95%. El procedimiento se muestra en la Figura 4.26, obteniendo como resultado un necesario de 23 réplicas.

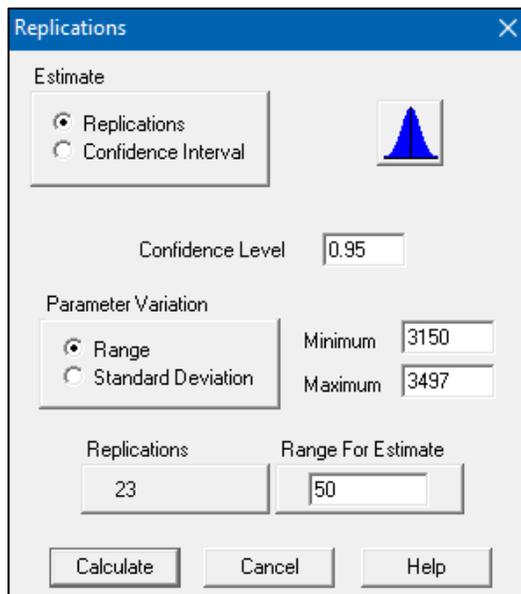


Figura 4.26. Cálculo del número de replicas
Fuente: ProModel, 2006

Periodo de estabilización (*warm-up*): Hay un período de calentamiento debido a la naturaleza del sistema. En la Figura 4.27 se muestran los resultados obtenidos en la simulación del modelo, donde ProModel® grafica el comportamiento de la salida del sistema, por lo que se puede deducir que se ha alcanzado un estado estable al final de las primeras 2.5 horas de simulación.

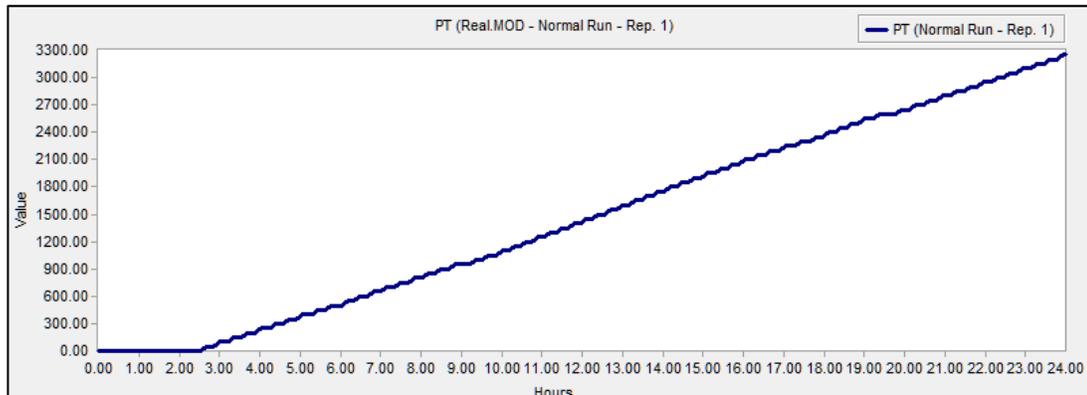


Figura 4.27. Diagrama de tiempo de piezas procesadas
Fuente: ProModel, 2006

En consecuencia, los datos de simulación de las primeras 2.5 horas no se consideran en los cálculos para evitar que los parámetros se vean afectados por estas estadísticas. Por lo tanto, en el software se definió un tiempo de procesamiento de 24 horas y un *warm-up* de 2.5 horas

4.2.6. Etapa 5. Experimentación con base en la filosofía de TOC

El sistema real genera un total de 3400 piezas promedio por día, un total de WIP promedio al día de 1780 piezas, a continuación, se analizará el modelo con el fin de obtener una reducción en el WIP y un aumento en los niveles de throughput. El análisis de cada etapa se muestra a continuación.

1. Identificar la restricción

Existen múltiples maneras de determinar la restricción. Una de ellas consiste en observar la estadística del estado de cada una de las operaciones. Estas son arrojadas por el software en el apartado de *General report, Location states single* donde se muestra el estado de cada locación. En la Figura 4.28 se puede identificar la

restricción como la operación con un porcentaje de utilización mayor al resto de los recursos, en este caso la máquina V1059 requiere 20.13 minutos para procesar cada campana, obteniendo como resultado un 96.74% de operación como se muestra en la Figura 4.28, lo cual lo identifica como el recurso cuello de botella. Además de eso, podemos observar como la roladora V1059 por ser el recurso cuello de botella bloquea el tiempo de operación en la maquina anterior a ella (Lubricadora V1058) con un bloqueo de 28.86%.

General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	Failed Arrivals	Entity Activity	Entity States	Variables
Real.MOD (Normal Run - Rep. 1)									
Name	Scheduled Time (DAY)	% Operation	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down		
V998	1.00	76.97	0.00	18.11	4.72	0.00	0.20		
V941	1.00	74.28	0.00	19.97	1.54	0.22	3.99		
V999	1.00	83.40	0.00	11.73	4.46	0.13	0.28		
V1092	1.00	80.59	0.00	7.88	3.69	7.70	0.14		
V1058	1.00	64.63	0.00	6.52	0.00	28.86	0.00		
V1059	1.00	96.74	0.00	3.26	0.00	0.00	0.00		
V861	1.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00		
V922.3	1.00	64.30	0.00	35.70	0.00	0.00	0.00		
V1048	1.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00		
V595	1.00	48.15	0.00	51.85	0.00	0.00	0.00		
V1072	1.00	69.22	0.00	23.98	5.00	1.63	0.17		
V1051	1.00	54.34	0.00	41.64	3.82	0.00	0.20		
V1050	1.00	74.27	0.00	20.00	4.16	1.35	0.22		
V1370	1.00	57.50	0.00	42.50	0.00	0.00	0.00		
V1329	1.00	43.10	0.00	56.90	0.00	0.00	0.00		
PY	1.00	14.37	0.00	74.45	5.49	5.69	0.00		
V1130	1.00	42.50	0.00	57.50	0.00	0.00	0.00		

Figura 4.28. % Operación recurso restrictivo (General report. Location states Single)
Fuente: ProModel, 2006

Otra forma de corroborar que la locación con mayor porcentaje de utilización es realmente el cuello de botella, es identificando la mayor cantidad de piezas que se mantienen en espera de ser procesadas antes de esta operación, en este caso el conveyor 8 y 8.1 son los que se encuentran afectados por la operación cuello de botella, y en los datos arrojados por el Software se muestra un total máximo de 46 campanas detenidas (ver Figura 4.29).

General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	Failed Arrivals	Entity Activity	Entity States	Variables
Real.MOD (Normal Run - Rep. 1)									
Name	Scheduled Time (DAY)	Total Entries	Avg Time Per Entry (HR)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization		
C1	1.00	4040.00	0.24	40.59	41.00	40.00	104.75		
C2	1.00	3027.00	0.12	14.87	25.00	21.00	66.69		
C3	1.00	972.00	0.01	0.28	1.00	1.00	1.27		
C4	1.00	2113.00	0.17	14.54	25.00	20.00	63.34		
C5	1.00	1862.00	0.01	0.55	2.00	0.00	2.40		
C6	1.00	1038.00	0.26	11.25	25.00	19.00	49.98		
C7	1.00	2915.00	0.01	1.59	15.00	14.00	6.90		
C8	1.00	3917.00	0.14	23.02	39.00	39.00	62.67		
C8.1	1.00	3877.00	0.04	6.12	7.00	7.00	122.39		
C9	1.00	3869.00	0.04	6.30	15.00	6.00	5.39		
C10	1.00	3860.00	0.00	0.66	8.00	1.00	6.88		
C11	1.00	3858.00	0.04	5.78	9.00	6.00	5.26		
C11.1	1.00	3852.00	0.03	4.17	7.00	5.00	5.22		
C12	1.00	3530.00	0.13	18.75	35.00	16.00	57.62		
C13	1.00	2327.00	0.10	9.24	25.00	22.00	41.06		
C14	1.00	706.00	0.01	0.21	1.00	0.00	0.92		
C15	1.00	1300.00	0.38	20.39	25.00	25.00	90.60		
C16	1.00	1367.00	0.01	0.41	2.00	1.00	1.81		
C17	1.00	3459.00	0.01	1.30	6.00	3.00	4.52		
C18	1.00	1726.00	0.01	0.50	4.00	0.00	2.26		
C19	1.00	1728.00	0.01	0.86	3.00	2.00	2.27		
C20	1.00	1726.00	0.01	0.93	4.00	0.00	2.27		
C21	1.00	3452.00	0.00	0.67	4.00	2.00	7.46		
C22	1.00	3449.00	0.01	1.01	2.00	1.00	4.40		
C22.1	1.00	3448.00	0.00	0.43	1.00	0.00	4.02		
C22.2	1.00	3448.00	0.02	2.60	12.00	1.00	22.72		

Figura 4.29. Registro máximo de piezas antes de la restricción (General report. Location)
Fuente: ProModel, 2006

2. Explorar la restricción

Una vez que se conoce la restricción del sistema, se analiza que condiciones genera un tiempo de inactividad en el recurso, en este caso de un 3.26% y tratar de eliminarlo con el fin de que el recurso cumpla siempre con la demanda mensual del cliente 96,000 piezas al mes. Mediante la manipulación de variables y análisis del modelo en periodos cortos y la observación de las gráficas de series de tiempo arrojadas por el software, se identificó que el conveyor que se encuentra entre la maquina V1058 y el recurso cuello de botella se queda sin material en los periodos de 9:00am a 10:00am y de 11:00pm a 12:00pm, es decir en los horarios de descanso de media hora de los operarios 1 y 2 (ver Figura 4.30).

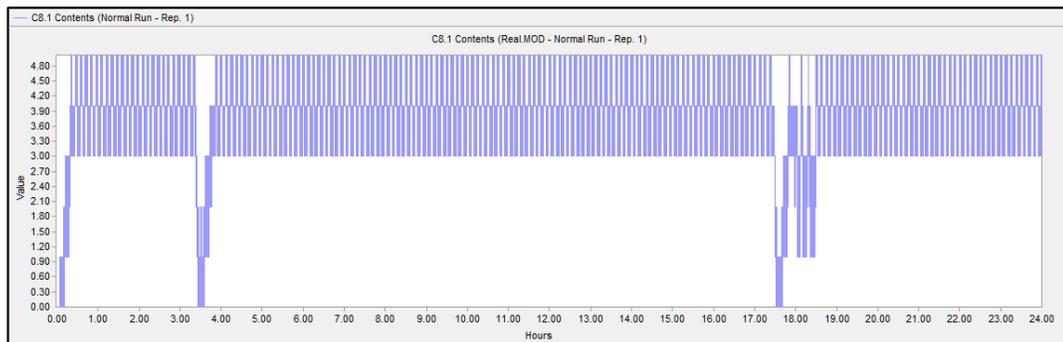


Figura 4.30. Diagrama de tiempo conveyor 8.1
Fuente: ProModel, 2006

El recurso restrictivo debe quedarse lo menos posible de tiempo sin material para procesar esto para aprovechar al máximo su capacidad, y mientras uno de los dos operarios se toma su descanso de media hora, el otro operario se encarga de manejar las cuatro máquinas (V998, V941, V999 y V1092), bajando con ello la productividad de la operación de torneado. Esto provoca que el recurso restrictivo se quede en espera de piezas por procesar.

Para evitar este periodo de una hora sin procesar al máximo la operación de torneado, se decidió modificar la salida de descanso del operario 2, aplazándolo media hora entre el horario del operario 1 y 1 operario 2. Por lo tanto, al operario 1 se le programaron sus descansos de media hora de 9:00am a 9:30am y de 9:00pm a 9:30pm, mientras que al operario 2 se le asignó el descanso de media hora, uno de 10:00am a 10:30am y el segundo de 10:00pm a 10:30pm. Simulando el proceso con dichos cambios, se obtuvo una mejora de en el aprovechamiento de la capacidad de 2.86%, mientras que el 0.40% restante corresponde al tiempo que tarda en pasar por primera vez del almacén de materia prima a la operación V1059 (ver Figura 4.31).

General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	Failed Arrivals	Entity Activity	Entity States	Variables
elevar.MOD (Normal Run - Rep. 1)									
Name	Scheduled Time (DAY)	% Operation	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down		
V998	1.00	85.03	0.00	8.88	5.52	0.00	0.57		
V941	1.00	71.52	0.00	26.10	1.93	0.23	0.22		
V999	1.00	84.50	0.00	9.95	5.08	0.18	0.29		
V1092	1.00	81.93	0.00	5.50	4.28	8.07	0.22		
V1058	1.00	66.53	0.00	0.66	0.00	32.81	0.00		
V1059	1.00	99.60	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00		
V861	1.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00		
V922.3	1.00	66.21	0.00	33.79	0.00	0.00	0.00		
V1048	1.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00		
V595	1.00	49.58	0.00	50.42	0.00	0.00	0.00		
V1072	1.00	71.26	0.00	21.39	5.16	1.85	0.34		
V1051	1.00	55.75	0.00	40.02	3.90	0.04	0.29		
V1050	1.00	73.92	0.00	20.05	4.29	1.29	0.45		
V1370	1.00	58.40	0.00	41.60	0.00	0.00	0.00		
V1329	1.00	43.80	0.00	56.20	0.00	0.00	0.00		
PY	1.00	14.60	0.00	73.75	5.16	6.49	0.00		
V1130	1.00	43.13	0.00	56.87	0.00	0.00	0.00		

Figura 4.31. % Operación de la restricción después de explotarla (General report. Location State Single)

Fuente: ProModel, 2006

3. Subordinar la restricción

Para subordinar la restricción se desarrollaron las siguientes tres etapas correspondientes a los componentes del sistema DBR:

a. Programar la restricción (Tambor)

La función del tambor es proteger las fechas de envío y como se puede analizar en la descripción del sistema, el cliente demanda de 96,000 unidades al mes del producto campana y el recurso restrictivo tiene capacidad de producir en promedio hasta 4,023 unidades de campanas al día, lo que cubre perfectamente con la demanda del cliente con las 22.5 horas de trabajo aun con los horarios de descanso de los operarios. Por lo tanto, se debe proteger la restricción de fluctuaciones en el sistema para cumplir siempre con la demanda. Para proteger la restricción será necesario incluir un amortiguador de tiempo como se muestra a continuación.

b. Determinar el tamaño del amortiguador (Amortiguador)

Se calculó el tamaño del amortiguador que protegerá a la restricción de fluctuaciones en el sistema como podría ser el retraso en la llegada de material a la máquina V1059. En la Figura 4.32 se representa el layout del modelo aplicando el amortiguador (Buffer_CB) con una capacidad de 50 piezas entre la llegada de la máquina V1058 y V1059.

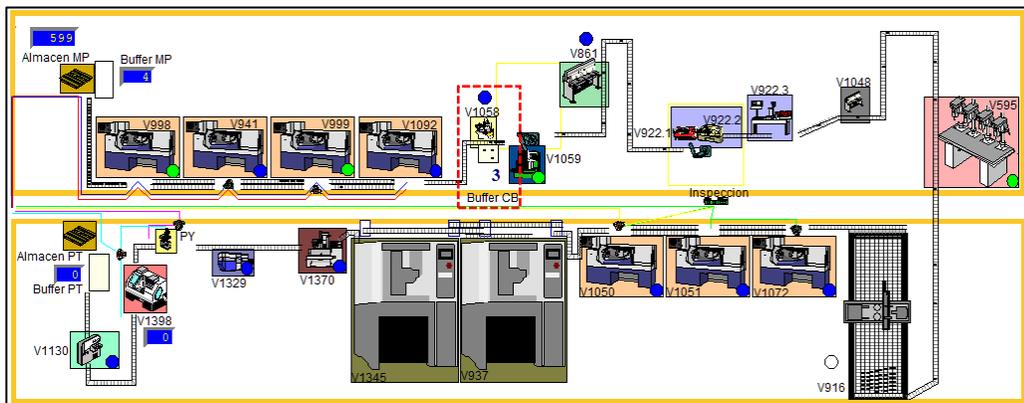


Figura 4. 32. Representación del layout del modelo aplicando el amortiguador al recurso restrictivo

Fuente: ProModel, 2006

El tamaño del amortiguador de la restricción se eligió haciendo uso del diagrama de tiempo del conveyor 8 (ver Figura 4.33), donde se puede apreciar que las piezas

necesarias para que la maquina V1059 trabaje a su máxima capacidad es necesario un amortiguador con una capacidad de 50 piezas para protegerla de fluctuaciones.

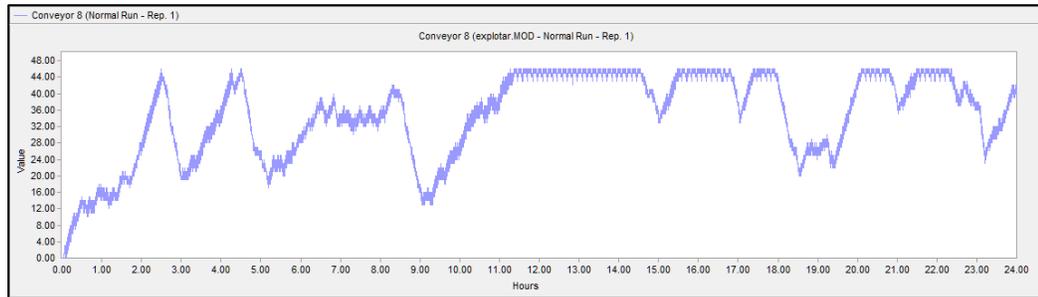


Figura 4.33. Diagrama de tiempo conveyor 8
Fuente: ProModel, 2006

c. Programar la liberación de material al ritmo de la restricción (Cuerda)

Después de establecer un amortiguador de protección es necesario modificar los arribos, esto es la cuerda del sistema, en función de la tasa de producción del recurso cuello de botella, por lo que, al manipular las variables de entrada del sistema se decidió programar la llegada de materia prima, en lotes de 200 unidades cada 55 minutos.

En la Figura 4.34 es posible apreciar el cambio de cada uno de los indicadores con la aplicación del sistema de programación DBR y las mejoras que se obtuvieron, logrando aumentar la cantidad de producto terminado y una reducción considerable en el WIP.

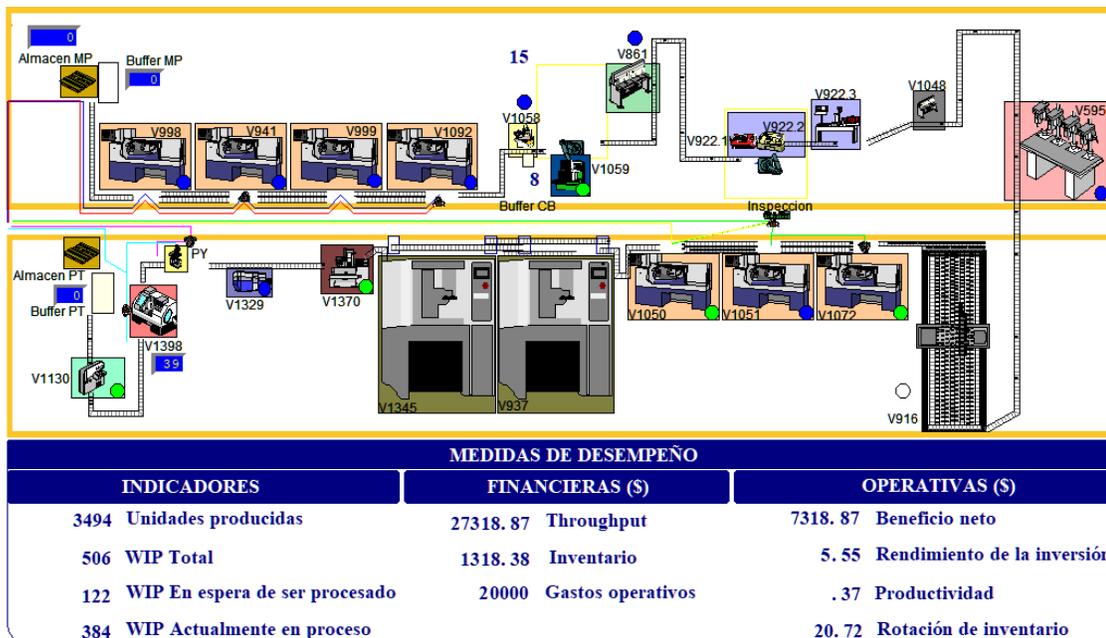


Figura 4.34. Representación del layout del modelo aplicando la metodología DBR
Fuente: ProModel, 2006

4. Elevar la restricción

En esta sección, se requiere una elevación del recurso restrictivo, es decir hacer una inversión inicial ya sea en maquinaria, en tiempo extra o en contratación de nuevo personal. Esto es necesario siempre y cuando la demanda sobrepasa la capacidad del recurso cuello de botella, puesto que, este no es el caso no es necesario invertir por el momento para elevar la capacidad de la línea ya que podría afectar la sobre producción de la línea.

4.2.7. Etapa 6. Documentación y presentación de resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al evaluar cada una de las medidas de desempeño establecidas, haciendo una comparación entre el estado actual del sistema y los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta basadas en los principios de la teoría de restricciones y simulación de eventos discretos.

Inventario en proceso (WIP)

En la Figura 4.35 se muestra una comparativa del comportamiento del inventario en proceso en cada una de las modificaciones que se le hicieron al sistema de manufactura

analizado. Se puede observar como en el sistema actual, la cantidad de piezas que se mantenían en el sistema al final del día era de 1,780 unidades, posteriormente fueron aplicados los principios de TOC y sistema DBR obteniendo una reducción en la cantidad de piezas en el sistema al final del día de 506 piezas.

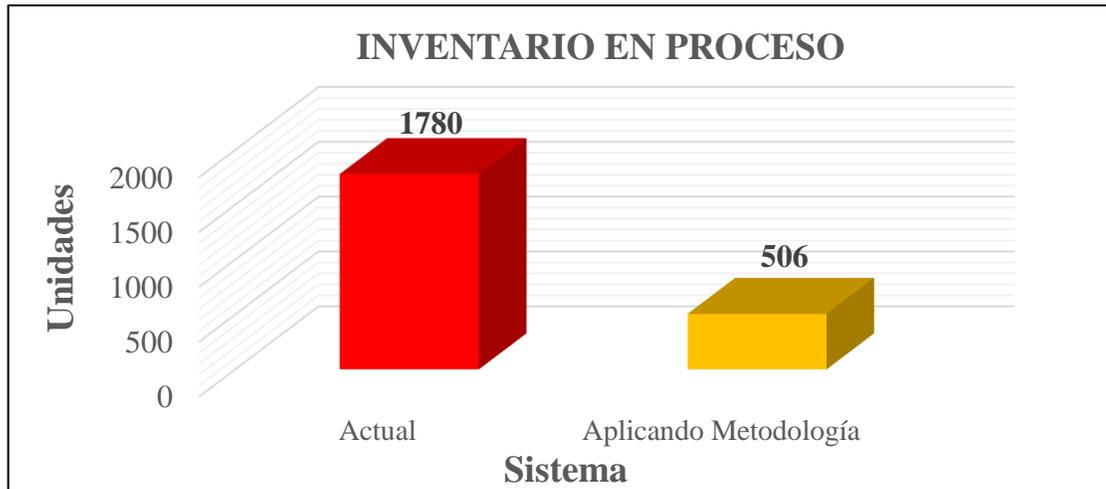


Figura 4.35. Resultados del inventario en proceso en cada uno de los sistemas analizados.

Unidades producidas (PT)

El sistema actual tenía la capacidad de producir en promedio 3,400 unidades diarias, al implementar la metodología propuesta se obtiene un total de 3,494 unidades (ver Figura 4.36). Esto es debido a que en el modelo que opera bajo la metodología desarrollada se considera un amortiguador de existencias inicial para que el recurso restrictivo, que es el que determina el número de piezas que salen del sistema empiece a su máxima capacidad.

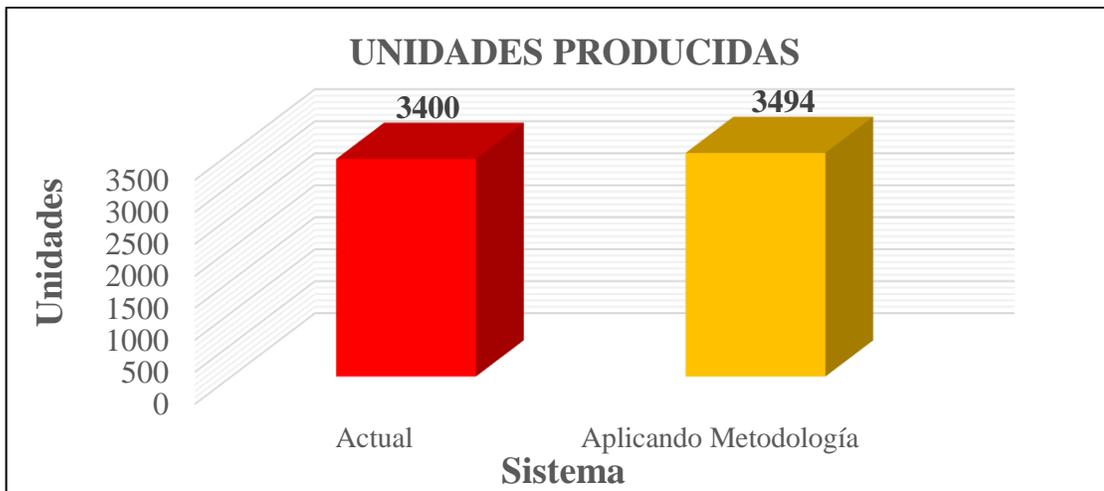


Figura 4.36. Resultado de las unidades producidas en cada uno de los sistemas analizados.

Inventario (I)

Los resultados del inventario para cada uno de los modelos se muestran en la Figura 4.37, donde se puede observar como el modelo actual muestra una inversión en materia prima de \$4,592.40 dólares diarios, el modelo desarrollado con la metodología muestra un nivel de inventario de \$1,318.38 dolares al día. Esto debido a que en el modelo operando bajo la metodología desarrollada, el material se libera de una forma controlada y esto conduce a que exista menor inventario en proceso y con ello una menor inversión de materia prima.

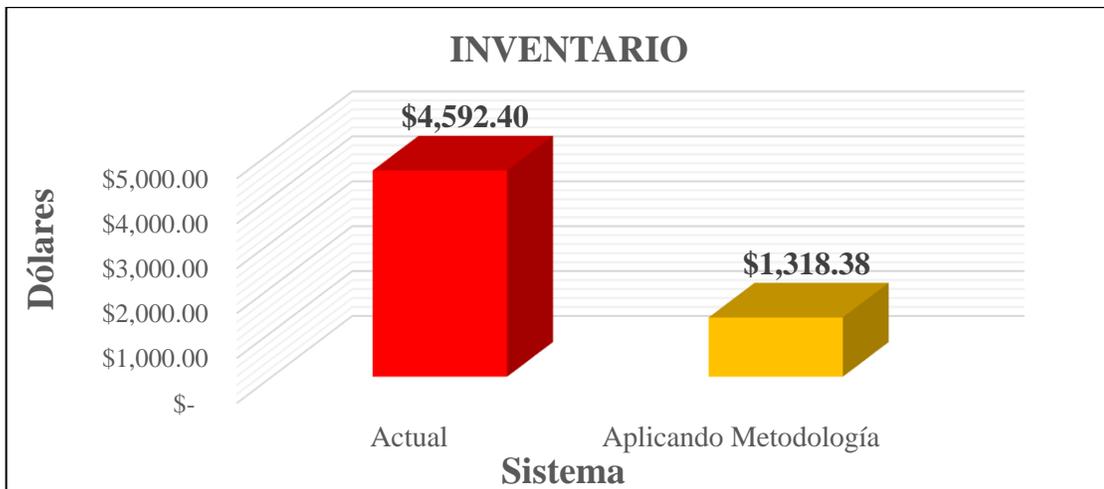


Figura 4. 37. Resultado de los costos de inventario en cada uno de los sistemas analizados

Throughput (TH)

En la Figura 4.38, se muestra como al implementar la metodología con base en los principios de TOC, el throughput del sistema aumenta obteniendo un resultado de hasta \$27,318.87 dólares, el modelo original trabajaba generaba un throughput de \$26,622.00 dólares diarios. Esto debido a que se producen más unidades, lo cual es una ventaja que posteriormente se verá representada en mayores ganancias.

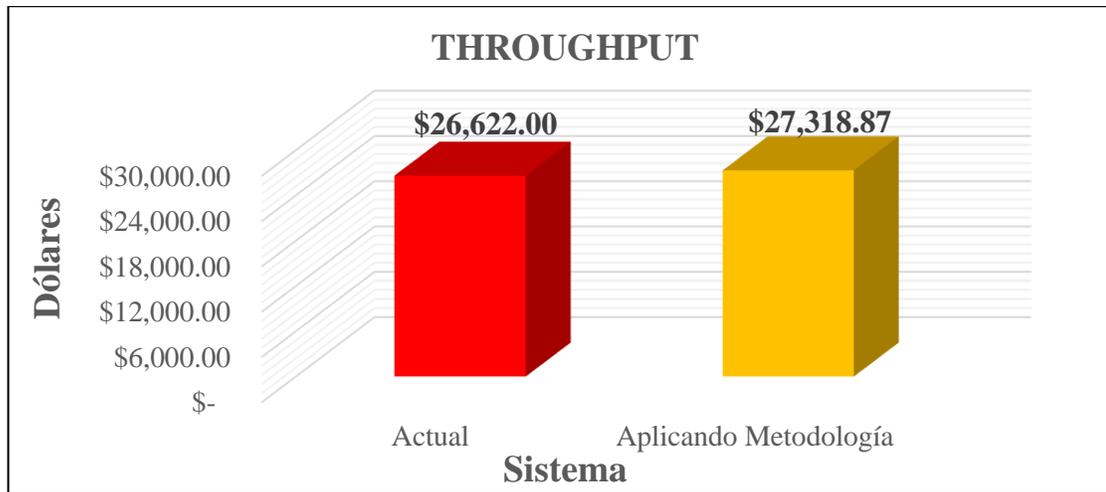


Figura 4.38. Resultado del throughput en cada uno de los sistemas analizados

Mediante el establecimiento de cada uno de los indicadores de desempeño evaluados anteriormente, en este apartado, se puede analizar cada una de las medidas de desempeño financieras detalladas en el capítulo 2, y los resultados fueron los siguientes:

El beneficio neto (ecuación 2.1) que presenta en el sistema actual es de \$6,622, posteriormente el sistema aplicando metodología genera un beneficio neto de \$7,318.87 dólares. Por otro lado, el rendimiento del sistema actual (ecuación 2.2) es 144%, posteriormente el sistema aplicando metodología genera un rendimiento de 555%.

La productividad (ecuación 2.3) también incremento considerablemente ya que en el sistema actual presentaba un porcentaje de productividad del 33%, mientras que el sistema aplicando metodología presenta un 37% de productividad. Por último, la rotación de inventario (ecuación 2.4) en el sistema actual es de 5.80 veces, mientras que el sistema aplicando metodología muestra una rotación de 20.72 veces.

Comparación de resultados en Caso 1 y Caso 2

En la Figura 4.39 se muestra una comparativa de porcentajes de mejora en cada indicador del caso 1 y caso 2. Como se puede observar, al hacer una reducción en el inventario en proceso, provoca un incremento en los niveles de Throughput y un aumento en la productividad en ambos modelos.

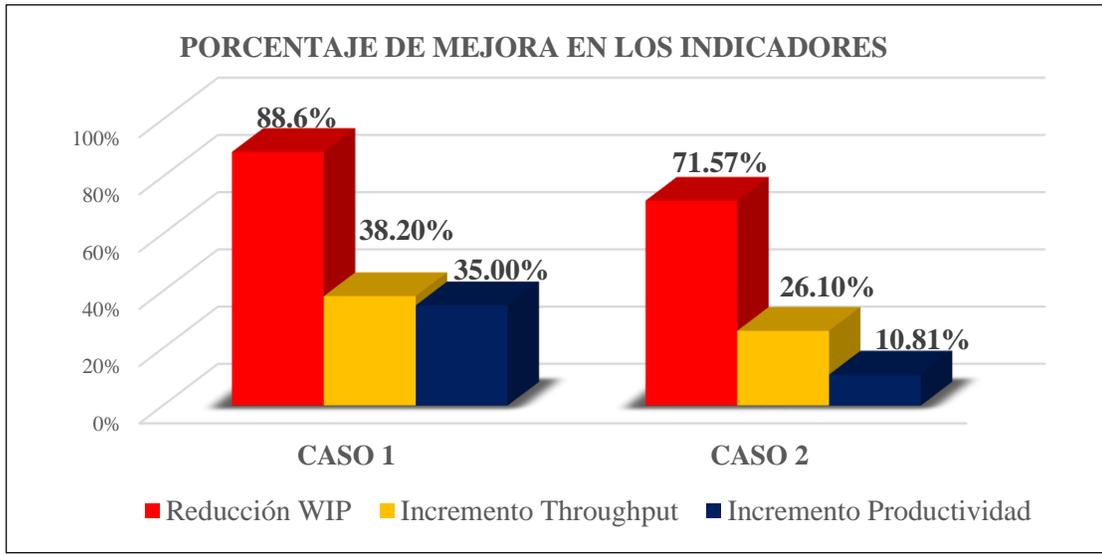


Figura 4.39. Porcentaje de mejora en caso 1 y caso 2

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló una propuesta metodológica con base en los principios de TOC y simulación de eventos discretos, para identificar la restricción, explotarla para maximizar la utilidad, armonizar los recursos no restrictivos del sistema a la restricción, aumentar la operación del cuello de botella mediante el uso del sistema de mejoramiento continuo DBR, todo mediante el uso del software ProModel®. La implementación de dichas estrategias logró aumentar la capacidad de la restricción en cada uno de los casos de estudio, aumentando la productividad en promedio de 23% y por lo tanto permitir el cumplimiento del 100% de la demanda tanto en cantidad como en tiempos de entrega.

Al analizar los resultados obtenidos además de la mejora productiva se logró reducir el inventario en proceso en promedio un 80.08%, lo cual generó una reducción de costos de inventario un 80.72% y un incremento en el Throughput de 32.15% provocando un aumento en el beneficio neto de \$1,278.43 dólares y un aumento en el rendimiento sobre la inversión de más del 100%. Esta metodología muestra una ventaja significativa en la disminución del inventario en proceso, este hecho ha sido afirmado por la simulación realizada utilizando el software ProModel® ya que, el software permite una mejor apreciación de las interacciones que se presentan entre las diferentes variables que componen el sistema definido.

Teniendo en cuenta los resultados de la investigación, se puede afirmar que no solamente la aplicación de los principios de la teoría de restricciones, sino, la implementación de herramientas de simulación, permiten a las empresas manufactureras apreciar un escenario más claro para la toma de decisiones en los procesos, generando una ventaja competitiva y ser más productivos, mientras incrementa las utilidades y el rendimiento sobre la inversión.

Recomendaciones

- En el momento de implementar el proyecto en un caso real, es importante que se tenga en cuenta el análisis financiero que brinda la TOC descrito en el desarrollo del proyecto.
- Estos resultados y análisis se deben comparar con los datos que se obtienen después de haber implementado la herramienta en el modelo de simulación, con el fin de demostrar su contribución o no al throughput.
- A partir de la implementación de TOC, así como, herramientas de simulación es posible encontrar en que punto del proceso es idóneo comenzar un proceso de mejora continua, ya que mediante sus herramientas ayuda a determinar cuáles son las principales áreas de oportunidad que se presenta el sistema analizado.
- Sus técnicas y el análisis mediante el software de simulación ProModel, puede alcanzar en muy poco tiempo resultados considerables sin realizar grandes inversiones de dinero, obteniendo resultados satisfactorios.
- TOC permite a las organizaciones tener un pensamiento sistémico, donde se aborde desde todas las perspectivas los diferentes problemas del proceso, permitiendo encontrar la restricción que impide que el sistema gane más dinero, además de dar soluciones eficaces que permitan eliminarla.
- TOC implementa acciones de manera efectiva debido a que su filosofía permite proporcionar soluciones prácticas y efectivas en la implementación, donde nos muestra una solución y beneficios que se pueden implementar con éxito gracias a la aplicación del sistema DBR.
- En general se recomienda la implementación de la metodología propuesta en un sistema de producción del mundo real que presente altos niveles de inventario en proceso.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Boyd, L., & Gupta, m. (2004). constrains management what is the theory? *International Journal of Operations & Production Management Vol. 24 N° 4*, 350-371.
- Breyfogle , F. (2014). *Quality Magazine*. Retrieved from <https://www.qualitymag.com/blogs/14-quality-blog/post/92258-five-techniques-for-reducing-manufacturing-wip-lean-six-sigma-project-opportunity>
- Chapman, S. N. (2006). *Planeación y control de la producción*. Edo. de México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Chase, R. B., & Jacobs, F. R. (2010). *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*. McGraw Hill México.
- Coss Bu, R. (2010). *Simulación Un enfoque práctico*. Limusa Noriega Editores.
- Ferrer, M., Moras, M., Fernández, D., & Álvarez, I. (2013). Aplicación de simulación para el ncremento de la prodctividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. *Revista de la Ingeniería Industrial, Vol. 7,*, 13-20.
- Flores, F., & Bernardi, B. (2006). 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. *Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas*, 18-22.
- García Dunna, E., García Reyes, H., & Cárdenas Barrón, L. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Estado de México: Pearson E ducación de M éxico, S. A. d e C.V.
- García, G., Vázquez, P., Albertón, E., & Jaime, J. (2010). Teoría de las restricciones aplicada en la planificación de la producción en una planta de terminación de cueros. *Tecnología del Cuero N° 74 vol. 22*, 30-37.

- García-Velázquez, A., Pineda-Domínguez, D., & Andrade-Vallejo, M. A. (2015). Las capacidades tecnológicas para la innovación en empresas de manufactura. *Universidad & Empresa, Bogotá*, 17(29), 257-278.
- Goldratt, E. M. (1990). *Theory of Constraints: What is this thing called the Theory of Constraints and how should it be implemented*. Croton-on-Hudson: North River, New York.
- Goldratt, E., & Cox, J. (1993). *La meta*. México: North Riverpress.
- Golmohammadi, D. (2014). A study of scheduling under the theory. *International Journal of Production Economics* 188.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Gundogar, E., Sari, M., & Kokcam, A. (2016). Dynamic bottleneck elimination in mattress manufacturing line using theory of constraints. *SpringerPlus*, 1-15.
- Harrell, C., Ghosh, B., & Bowden, R. (2000). *Simulation using ProModel*. United States of America: McGraw-Hill Education.
- Herrera, G. (2013). Mejora en el proceso de pruebas de metales en una empresa de servicio de inspección y laboratorio empleando simulación con ProModel. *TEKNOS*, 13(1), 39-54.
- Herrera-Vidal, G., Campo-Juvinao, J., Bernal-Hernandez, J., & Tilves-Martinez, R. (2018). Modelo de teoría de restricciones con consideraciones de optimización y simulación – Un caso de estudio. *Revista Espacios*, 39(3), 10-27.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2001). *Factory Physics*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Kissani, I., & Bouya, W. (2014). Analysis of WIP Inventory Control and Simulation of KANBAN System within Wiring Harness Company. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2489-2499.

- Law, A. M., & Kelton, D. W. (1991). *Simulation modeling and analysis*. United States: McGraw-Hill.
- Mohammadi, A., & Eneyo, E. S. (2012). Application of Drum-Buffer-Rope Methodology in Scheduling of Healthcare System. *POMS 23rd Annual Conference*. Chicago, Illinois, U.S.A.
- Ortiz, V., & Caicedo, A. (2015). Proceimiento para la programación y control de la producción de una pequeña empresa. *Revista Ingeniería Industrial*, 89-104.
- Palma, R. R., & Forradellas, R. (2009, mayo 15). *Propuesta para optimización de sistemas productivos modelados con simulación por eventos discretos*. Retrieved mayo 1, 2018, from <http://hdl.handle.net/10915/19694>
- Pandit, S. V., & Naik, G. R. (2009). Application Of Theory Of Constraints On Scheduling Of Drum-Buffer-Rope System. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 15-20.
- Pérez Martínez, L., Pérez Olguín, D., Fernández Gaxiola, M., & Zepeda Miranda, I. (2014). Reducción y control de inventarios. *Ingeniería de Procesos: Casos Prácticos*, 38-47.
- Pergher, I., & Roehle Vaccaro, G. L. (2014). Work in process level definition: a method based on computer simulation and electre tri. *Production*, 24(3), 536-547.
- Piera, M. A., Guasch, T., Casanovas, J., & Ramos, J. J. (2013). *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- ProModel. (2006). *ProModel Student (Versión 7.0.4.201) [Software]*. USA.
- Saraswat, P., Kumar, D., & Kumar Sain, M. (2015). Reduction of work in process inventory and production lead time in a bearing industry using value stream mapping tool. *International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC)*, 6(2), 27-35.

- Schragwneim, E., & Ronen, B. (1990). Drum-Buffer-Rope Shop floor control. *Production and Inventory Management Journal*(Third Quarter), 18-22.
- Stein, R. E. (2003). *Re-Engineering the Manufacturing System Applying the theory of Constraints*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Šukalová, V., & Ceniga, P. ((2015). Application of the Theory of Constraints instrument in the enterprise distribution system. *Procedia Economics and Finance* 23, 134 – 139.
- Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., & Qu, T. (2017). Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks:an assessment by simulation. *International Journal of Production Economics* 188, 116–127.
- Tompkins, J. A. (1992). *La producción exitosa*. Edo. de México: McGraw-Hill interamericana de méxico, S.A. de C.V.
- Villagómez, G., Viteri, J., & Medina, A. (2012). Teoría de restricciones para procesos de manufactura. *ENFOQUTE* 3, 14-28.
- Woepfel, M. J. (2001). *Manufacturer's Guide to Implementing the Theory of Constrains*. Florida: St. Lucie Press.

ANEXO

Anexo 1 Reduction of Work in Process in Manufacturing Systems by Means of a Theory of Constraints Approach and Discrete Event Simulation

Engineering and Technology Journal e-ISSN: 2456-3358

Volume 04

Issue 02 February 2019

Page No. 537-544

Reduction of Work in Process in Manufacturing Systems by Means of a Theory of Constraints Approach and Discrete Event Simulation

Mirna E. García-Garza¹, José Alfredo Jiménez-García², Salvador Hernández-González³, Edgar Augusto Ruelas-Santoyo⁴, Moisés Tapia-Esquívias⁵, Vicente Figueroa-Fernández⁶

^{1,2,3,5,6} Department of Industrial Engineer, Tecnológico Nacional de México en Celaya

⁴Department of Industrial Engineer, Tecnológico Nacional de México en Irapuato

Abstract: In the manufacturing companies, within their main requirements, it is considered the introduction of strategies and tools to improve the management of resources and production processes, in order to generate higher revenues, meet the needs of the client and increase their level of competitiveness. The high WIP and low income caused by inadequate management of its constraint resources are one of the situations that occur in companies that prevent its optimal development. This article proposes a methodology based on continuous improvement programming systems known as DBR and simulation of discrete events using ProModel® software. Through the application of these principles, we seek to reduce the level of WIP, applying mainly the technique for the development of successful simulation projects such as the authors Harrell, Ghosh, and Bowden, altering the variables of production and identifying constraint resources in the system. In this work it is possible to identify the constraints of a system, harmonizing each of the operations at the demanded rate by the bottleneck with the help of a simulation scenario, resulting in a reduction in the WIP, a reduction in the inventory costs and with it, an increase in throughput.

Keywords: Theory of constraints; Drum-Buffer-Rope System; Discrete event simulation; Work in process; Throughput; Bottleneck

I. INTRODUCTION

Manufacturing companies seek to achieve a good level of competition with their resources, in addition to maintaining and improving production plans and compliance levels, as well as reducing inventories of raw materials, work in process (WIP) and finished products[1].The mismanagement of the constraint (i.e., bottlenecks) is one of the causes that prevent manufacturing companies achieve their maximum performance and efficiency in their production systems. Theory of constraints (TOC) allow us to determine a better way to administer these constraints, which was developed by Goldratt in the early 1980s, was applied for the first time in planning and scheduling production to maximize the benefits and effectiveness of companies with respect to market requirements by identifying and exploiting constraint resources [2].

During the last decades, many methodologies were developed which were used to improve the quality and performance of any organization, some of these methodologies are Total Quality Management (TQM), Just in Time (JIT) and Theory of constraints. Each one of them deals with administrative philosophies with different characteristics, advantages, and disadvantages. Unlike these philosophies, the theory of constraints characterized by a focus on reducing and eliminating constraint resources that

prevent the organization reaches the goal is usually to make money [3].

Within the philosophy of TOC, there are some tools to solve this problem in manufacturing constraints once bottleneck resources are identified, one is the programming of the drum-buffer-rope (DBR) system. In [4]show that the DBR system is to release the material according to the requirement of lower productivity, if a resource generates lower output than that demand, this becomes the bottleneck of the system, which impacts mainly on control WIP, because if the synchronization of resources does not match the bottleneck, production time and increase WIP system. In addition, this method guarantees a constant inventory level between the constraint resource and the raw material selection process [5]. WIP reduction leads to increased liquidity, improved cash flow, better customer service, and lower commercial risks [6].

There are a large number of systems and tools applied to the management and reduction of the WIP. For example, [7]managed to control the level of WIP in a metal-mechanical company using simulation with the IRIS tool and the electreTRI method, likewise [8]WIP management was carried out using the Kanban system and simulation by means of the ProModel® software in a company dedicated to harnessing wiring. On the other hand, [9]they made use of the value stream mapping (VSM) tool, managing to reduce

“Reduction of Work in Process in Manufacturing Systems by Means of a Theory of Constraints Approach and Discrete Event Simulation”

- **Locations:** The system consists of three different machines, each with a unit capacity and a warehouse with unlimited capacity for each of the raw materials.
- **Entities:** Three different types of raw materials are declared RM_1, RM_2, and RM_3 plus two types of finished products Product M and Product N.
- **Arrivals:** Raw material 1 inscribe to the system one piece every 20 minutes, the raw material 2 arrives in the system one piece every 15 minutes and rawmaterial 3 enters the system one piece with a frequency of 75 minutes.
- **Process:** Each of the raw materials arrive at a warehouse destined for each one of them, later they start their transformation process in machine A and B with their corresponding processing times. Next they proceed to machine C, which is in charge of assembling the product M by means of a piece of raw material 1 with a piece of raw material 2, likewise the machine C assembles a piece of raw material 2, and one of raw material 3, to make a part of the product N. The pieces are transported from one machine to another at a time without transfer time.

The performance indicators established in [20] to determine the effectiveness of the proposed strategies are shown below, which were analyzed to detect how the WIP reduction affects each of them, these indicators can be calculated automatically by generating global variables provided by the ProModel® software.

- **Work on processes (WIP)** is partially completed goods of a company that awaits finalization and final sale.
- **Units produced (PT)** by means of this indicator will measure the production capacity.
- **Inventory (I)** is the money that the system has invested in buying material that it expects to sell.
- **Throughput (TH)** is the speed at which the system generates money through sales.

Stage 2. Collection and analysis of data

For this case, the data will be taken directly from the proposed problem, it will only be necessary to analyze them and check the results in the simulation model. The processing time of each machine per piece detailed in table 1:

TABLE 1. THE PROCESSING TIME OF EACH MACHINE PER PIECE.

Machine	Processing time
Machine A	20 minute / piece
Machine B	15 minute / piece
Machine C	15 minute / piece

Step 3. Build and verification model

Once the variables and data of the system were established, they were entered into the program to build the simulation

model that will reproduce the behavior of the current manufacturing system. The verification was carried out through the use of tracking provided by the ProModel® software, called Trace, which allowed analyzing the behavior of the system step by step and verifying that it operates as expected. The design of this system is shown in figure 3.



Figure 3. Representation of the current ProModel® system layout.

Stage 4. Validation of the model

In this stage a failure was caused to validate that the system worked as expected, small changes were made in the parameters in the arrivals of material, causing small changes in the results of the simulation which were expected. By introducing the faults into the model, the behavior of the model presents expected changes, thus demonstrating that the model adjusted to the proposed model.

Stage 5. Experimentation based on the philosophy of TOC

As mentioned in the previous section, in this stage the implementation of the TOC philosophy is carried out, obtaining the following results.

Identify the constraint

Table 2 shows the status of the resources obtained by the software where % Op refers to the percentage of time the location was in operation, % Setup is the percentage of time the location was in preparation, % Idle means the time that the location was idle due to lack of material, % Waiting is the percentage of time expected by an entity to assemble, % Blocked is the time that the entities remain blocked in the location and lastly % Down to the percentage of time for stoppages not programmed. In this table, you can identify the constraint as the operation that its percentage of use is elevated than the rest of the resources, in this case, the machine B wants 15 minutes to process the product M in addition to another 15 minutes to process the product N, obtaining as Result 85.83% of operation as shown in Table 2, which identifies it as the bottleneck resource.

TABLE 2. GENERAL REPORT. LOCATION STATES SINGLE (PROMODEL®).

Name	% Op.	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down
Mach A	76.04	0.00	0.00	0.00	23.96	0.00
Mach B	85.83	0.00	0.00	14.17	0.00	0.00
Mach C	70.83	0.00	14.79	14.38	0.00	0.00

Exploit the constraint

Table 2 shows that the constraint resource has an operating percentage of 85.83% and a waiting time of 14.17%. To attack this percentage of waiting time is analyzed that the raw material 2 that is processed remains to wait to be assembled while the machine C is kept assembling. Therefore, it proposed to change the number of pieces transferred from the machine B to the machine C, converting it to lots of transfer of 4 pieces, thus avoiding that the bottleneck is kept on hold. By making this change, a 100% utilization percentage was obtained in the bottleneck as shown in Table 3.

TABLE 3. GENERAL REPORT. LOCATION STATES SINGLE (PROMODEL®).

Name	% Op.	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down
Mach A	83.33	0.00	0.83	0.01	15.83	0.00
Mach B	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mach C	77.50	0.00	20.21	2.29	0.00	0.00

Subordinate the constraint

To subordinate the constraint the following three stages were developed:

Schedule the constraint: The bottleneck or constraint is the drum, which determines the performance of the system. The function of the drum is to protect the shipping dates and as can be analyzed in the description of the system, the customer demands 100 units of product M and 50 units of product N a week, but the system only has the capacity to produce only 100 units of product M and 30 units of product N with an availability of 40 hours per machine. Therefore, we can observe that the bottleneck resource does not have enough capacity even working with 100% of its capacity, to cover the weekly demand of the client.

Determine the size of the buffer: The size of the buffer that will protect the constraint of fluctuations in the system was calculated, such as the delay in the arrival of the raw material 2 to machine B. The size of the constraint buffer was chosen intuitively on the basis of several simulated initial executions made to give some kind of instinct since the initial decision must take into account that the size of the buffer must be quite long until it is realistic. The size of the buffer can be three times greater than the average time of the

constraint. So a buffer was placed before the constraint with a protection time of one hour for the raw material 2.

Schedule the release of material to the rhythm of the constraint: After establishing a protection buffer it is necessary to modify the arrivals, this is the system's rope. Depending on the production rate of the bottleneck resource, therefore, when manipulating the input variables of the system it was decided to schedule the arrival of raw material 2, in lots of 10 units every 3 hours and raw material 3, they will arrive 8 pieces every 12.25 hours.

Elevate the constraint

At this stage, it is necessary to increase the capacity of the resource through an economic investment. This is only done if steps 2 and 3 do not increase the restraint capacity in such a way that it does not meet the client's requirements, this decision will depend on the interests of each company. In this case, when analyzing the results of the system, even with 100% capacity in the constraint resource. So, a solution to be able to meet the client's demand could be to work overtime hours each week, but the company would raise operating expenses while maintaining this demand. Therefore, it will be advisable to invest in the purchase of a second B machine in which an initial investment would be made but the capacity to meet the current customer's demand would be increased, as well as having the capacity for more orders.

Stage 6. Documentation and presentation of results

Next, the results obtained are shown when evaluating each of the established performance measures, making a comparison between the current state of the system and the results obtained by applying the proposed methodology.

Work in process (WIP)

In Figure 4, a comparison of the WIP behavior is shown in each of the modifications made to the analyzed manufacturing system. It can be seen as in the current system, the number of pieces that were kept in the system at the end of the week was 66 units, were subsequently applied the principles of TOC and DBR system obtaining a reduction in the number of parts in the system at the end of the week of 16 pieces. Finally, it is observed that by applying each of the stages of the methodology and also making an investment when buying a second B machine, the WIP inventory was reduced to only 7 units in the system.

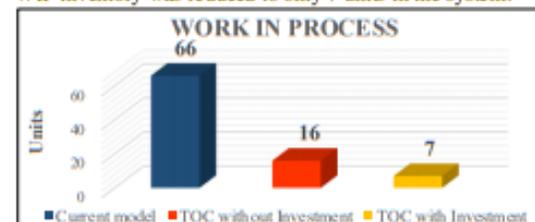


Figure 4. Results of the WIP in each of the systems analyzed.

"Reduction of Work in Process in Manufacturing Systems by Means of a Theory of Constraints Approach and Discrete Event Simulation"

Units produced (PT)

As mentioned in previous sections, the current system did not have sufficient capacity to satisfy the needs of the client, producing only 113 units, 90 parts of product M and 23 parts of product N, by implementing the proposed methodology a total of 128 units, 100 and 28 respectively. Finally, when carrying out the methodology and an initial investment, a total of 156 units is obtained, achieving that the system meets the demand needs as shown in figure 5, this is due to the fact that in the model that operates under the developed methodology is considered an initial stock buffer so that the restrictive resource, which is the one that determines the number of pieces that leave the system, start and maintain its maximum capacity.

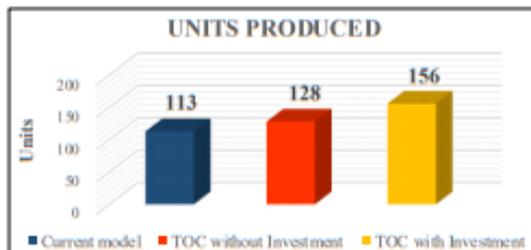


Figure 5. The result of the units produced in each of the systems analyzed.

Inventory (I)

This indicator is directly related to the amount of WIP. The results of the inventory for each of the models are shown in Figure 6, where you can see how the current model shows an investment in raw material of \$ 2,840 dollars, the model developed with the methodology shows an inventory level of \$ 640 and the Improvement model with initial investment shows a result of \$ 280 dollars of inventory. This is because in the model operating under the methodology developed, the material is released in a controlled manner and this leads to the generation of a smaller amount of WIP and with it a lower investment of raw material.

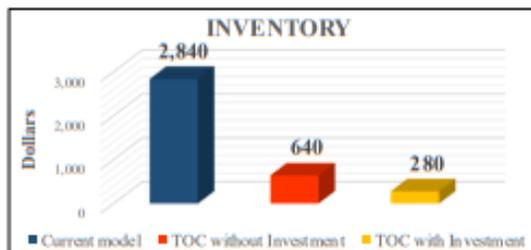


Figure 6. The result of inventory costs in each of the systems analyzed.

Throughput (TH)

In Figure 7, it shows how to implement the methodology based on the principles of TOC, the throughput of the

system increases obtaining a result of up to \$ 15,000 dollars, the original model worked making a throughput of \$ 10,860 dollars per week. This is due to the fact that more units produced, which is an advantage that is reflected in higher revenues.

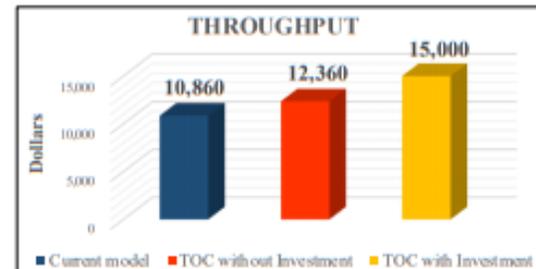


Figure 7. The result of the throughput in each of the systems analyzed.

By establishing each of the performance indicators previously evaluated, figure 8 shows the percentage of improvement in each of them, in addition to this section, it can analyze the net income (1) and the return on weekly investment (2) what the system generates before and after the methodology.

$$\text{Net income} = \text{Throughput} - \text{Operating expenses}(1)$$

$$\text{Performance} = \frac{\text{Net income}}{\text{Inventory}}(2)$$

The net profit that it presents in the current system does not satisfy the customer's demand with a total loss of \$ 1,140 dollars per week, later the TOC system without investment makes a net profit of \$ 360 dollars and finally the TOC model with investment makes a net profit of \$ 3,000. On the other hand, the performance of the current system is 40%, then the TOC system without investment produces a yield of 56% and finally the TOC model with investment generates 107.1% yield.

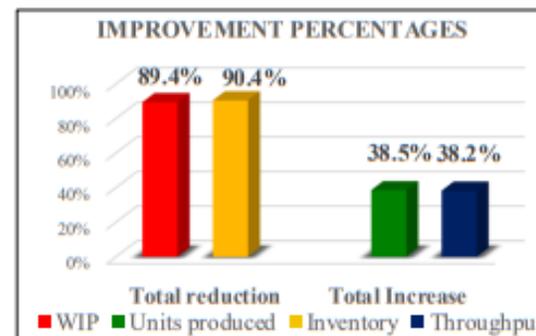


Figure 8. Percentages of improvement in each of the indicators.

V. CONCLUSIONS

In this research a methodological proposal was developed based on the principles of TOC and simulation of discrete

events, to identify the constraint, exploit it to maximize the utility, harmonize the non-restrictive resources of the system to the constraint, increase the operation of the bottleneck by using the DBR continuous improvement system, making use of ProModel® software. The implementation of these strategies managed to improve the capacity of the constraint, increasing the production in the system by 38.05% and therefore allow compliance with 100% of the demand both in quantity and delivery times.

When analyzing the results obtained in addition to the productive improvement, the WIP was reduced by 89.4%, which generated a reduction in inventory costs by 90.14% and an increase in the Throughput of 38.12%, causing an increase in the net profit of \$ 1,860 dollars weekly and an improvement in return on investment of more than 100%. This methodology shows a significant advantage in the decrease of the WIP, this fact has been confirmed by the simulation carried out using the ProModel software.

Taking into account the results of the research, it can be said that not only the application of the principles of the theory of constraint but the implementation of simulation tools, allow manufacturing companies to appreciate a clearer scenario for decision making in processes, generating a competitive advantage and being more productive, while increasing profits and return on investment. The implementation of the proposed methodology in a real-world production system and the documentation of results is purposed as future work.

REFERENCES

1. Breyfogle III, F. W., 2003. Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods, John Wiley & Sons.
2. Chase, R. B., and Jacobs, F. R., 2010. Administración de operaciones: producción y cadena de suministros, McGraw Hill México.
3. Cox, J., and Goldratt, E. M., 2005. La Meta, North Riverpress México.
4. García Dunna, E., García Reyes, H., and Cárdenas Barrón, L. E., 2013. Simulación y análisis de sistemas con ProModel, Estado de México: Pearson Educación de México, S. A. de C.V.
5. García, G., Vázquez, P., Albertón, E., and Jaime, J., 2010. Teoría de las restricciones aplicada en la planificación de la producción en una planta de terminación de cueros, Tecnología del Cuero N° 74 vol. 22, 30-37.
6. García-Velázquez, A., Pineda-Domínguez, D., and Andrade-Vallejo, M. A., 2015. Las capacidades tecnológicas para la innovación en empresas de manufactura, Universidad & Empresa, Bogotá, 17(29), 257-278.
7. Goldratt, E. M., 1990. Theory of Constraints: What is this thing called the Theory of Constraints and how should it be implemented, Croton-on-Hudson: North River, New York.
8. Golmohammadi, D., 2015. A study of scheduling under the theory of constraints. International Journal of Production Economics, 165, 38-50.
9. Harrell, C., Ghosh, B., and Bowden, R., 2000. Simulation using ProModel, United States of America: McGraw-Hill Education.
10. Herrera, O. J., and Becerra, L. A., 2014. Diseño General de las Etapas de Simulación de Procesos con Énfasis en el Análisis de Entrada, Obtenido de <http://www.laccei.org/LACCEI2014Guayaquil/RefereedPapers/RP152.pdf>.
11. Herrera-Vidal, G., Campo-Juvinao, J., Bernal-Hernandez, J., and Tilves-Martinez, R., 2018. Modelo de teoría de restricciones con consideraciones de optimización y simulación – Un caso de estudio, Revista Espacios, 39(3), 10-27.
12. Kissani, I., and Bouya, W., 2014. Analysis of WIP Inventory Control and Simulation of KANBAN System within Wiring Harness Company, International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2489-2499.
13. Mohammadi, A., and Eneyo, E. S., 2012. Application of Drum-Buffer-Rope Methodology in Scheduling of Healthcare System. POMS 23rd Annual Conference. Chicago, Illinois, U.S.A.
14. Palma, R. R., and Forradellas, R., 15 de mayo 2009. Propuesta para optimización de sistemas productivos modelados con simulación por eventos discretos, Recuperado el 1 de mayo de 2018, de <http://hdl.handle.net/10915/19694>.
15. Pergher, I., and Roche Vaccaro, G. L., 2014. Work in process level definition: a method based on computer simulation and electre tri, Production, 24(3), 536-547.
16. Saraswat, P., Kumar, D., and Kumar Sain, M., 2015. Reduction of work in process inventory and production lead time in a bearing industry using value stream mapping tool, International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC), 6(2), 27-35.
17. Schragwneim, E., and Ronen, B., 1990. Drum-Buffer-Rope Shop floor control, Production and inventory Management Journal(Third Quarter), 18-22.
18. Steele, D. C., Philipoom, P. R., Malhotra, M. K., and Fry, T. D., 2005. Comparisons between drum-buffer-rope and material requirements planning: a case study, International Journal of Production Research, 3181-3208.
19. Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., and Qu, T., 2017. Drum-buffer-rope and workload control

“Reduction of Work in Process in Manufacturing Systems by Means of a Theory of Constraints Approach and Discrete Event Simulation”

in High-variety flow and job shops with bottlenecks: an assessment by simulation, *International Journal of Production Economics* 188, 116–127.

20. Watson, K. J., and Patti, A., 2008. A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime, *International Journal of Production Research*, Vol. 46(No. 7), 1869–1885.

