

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**“COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE
SIMULACIÓN DE PROCESOS BASADOS EN SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN ESBELTOS”**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS

ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

ING. JUAN ANTONIO MEJIA PEDRAZA

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2004

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros de este comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Juan Antonio Mejía Pedraza sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

Comité de Tesis:

Dr. José Luis González Velarde

Asesor

Dr. Jorge Limón Robles

Sinodal

M. S. Ing. Antonio Elizondo Solana

Sinodal

Aprobado

Dr. Federico Viramontes Brown

Director del Programa de Graduados en Ingeniería

Diciembre del 2004

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Introducción.	2
1.2 Antecedentes.	3
1.3 Descripción del Problema.	4
1.4 Justificación.	5
1.5 Objetivo.	6
1.6 Hipótesis.	6
1.7 Alcances y Limitaciones.	6
1.8 Literatura Consultada.	8
1.9 Contenido de la Investigación.	10
II. MARCO TEÓRICO.	12
2.1 Principios del Sistema de Producción Toyota.	13
2.2 Fundamentos de Manufactura Esbelta.	20
2.2.1 El Pensamiento Esbelto.	22
2.2.2 Aprender a Observar.	27
2.2.2.1 Mapa de la Cadena de Valor.	28
2.2.2.2 Mapa de la Cadena de Valor del Estado Futuro o Ideal.	33
2.2.2.3 Mapa de la Cadena de Valor desde un Enfoque Físico.	34
2.2.3 La Manufactura Esbelta y la Física de la Fábrica.	40
2.3 La Física de la Fábrica.	41
2.3.1 Definición de un Sistema de Manufactura.	42
2.3.2 Definiciones y Parámetros de un Sistema de Manufactura.	44
2.3.3 Relaciones Simples entre Parámetros.	48

2.3.3.1 Desarrollo del Mejor Caso.	48
2.3.3.2 Desarrollo del Peor Caso.	49
2.3.3.3 Desarrollo del Peor Caso Práctico.	49
2.3.4 Principios Básicos de la Variabilidad.	52
2.3.4.1 Causas de la Variabilidad.	54
2.3.4.2 El Flujo de la Variabilidad.	59
2.3.4.3 Interacción de la Variabilidad en Colas.	62
2.3.4.3.1 Sistema de Cola Markoviano M/M/1.	66
2.3.4.3.2 Sistema de Cola General G/G/1.	67
2.3.4.3.3 Máquinas en Paralelo.	69
2.3.4.3.4 Efectos de Bloqueo.	70
2.3.5 Sistemas de Producción Empujar y Jalar.	73
2.3.5.1 Principios del Sistema de Producción Jalar.	74
2.3.5.2 Principios del Sistema CONWIP.	75
2.4 Producción en Masa.	79
2.5 Producción en Masa Vs. Manufactura Esbelta.	81
2.6 Beneficios de la Manufactura Esbelta.	86
III. METODOLOGÍA.	88
3.1 Metodología de Trabajo.	89
3.2 Definición del Problema.	90
3.3 Identificación de Variables y Parámetros.	90
3.4 Sistema Abierto o Sistema Cerrado.	92
3.5 Simulación de Procesos de Producción.	92
3.6 Comparación de Resultados.	94
3.7 Conclusiones Finales.	95
IV. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.	96
4.1 Distribución Continua.	97
4.2 Experimentación con un Sistema Abierto.	103

4.2.1 Definición del Problema.	103
4.2.2 Identificación de Variables y Parámetros.	103
4.2.3 Sistema Abierto.	106
4.2.4 Simulación de los Sistemas Abiertos.	107
4.2.5 Resultado de las Simulaciones de Sistemas Abiertos.	112
4.3 Aplicación de la Metodología a un Sistema Cerrado.	119
4.3.1 Definición del Problema.	120
4.3.2 Identificación de Variables y Parámetros.	120
4.3.3 Simulación de Sistemas Cerrados.	122
4.3.4 Resultado de las Simulaciones de los Procesos Cerrados.	125
V. CONCLUSIONES Y EXTENSIONES.	129
5.1 Conclusiones.	130
5.2 Extensiones para Futuras Investigaciones.	136
VI. BIBLIOGRAFÍA.	137
VII. ANEXOS.	142
7.1 Mapa de Cadena de Valor de un Estado Actual.	143
7.2 Mapa de Cadena de Valor de un Estado Futuro o Ideal.	145

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1</i> Etapas iniciales del trazo del mapa de una cadena de valor [Rother & Shook, 1998].	30
<i>Figura 2.2</i> El problema del exceso de producción [Rother & Shook, 1998].	32
<i>Figura 2.3</i> Objetivos de un Sistema de Manufactura [Hopp & Spearman, 2001].	43
<i>Figura 2.4</i> Gráfica del comportamiento de un Sistema de Manufactura TH Vs. WIP [Hopp & Spearman, 2001].	51
<i>Figura 2.5</i> Gráfica del comportamiento de un Sistema de Manufactura CT Vs. WIP [Hopp & Spearman, 2001].	52
<i>Figura 2.6</i> Resumen de formulas para obtener el tiempo efectivo de proceso [Hopp & Spearman, 2001].	58
<i>Figura 2.7</i> Propagación de la variabilidad entre estaciones de trabajo en serie [Hopp & Spearman, 2001].	61
<i>Figura 2.8</i> Esquema de una línea de producción bajo un sistema CONWIP [Hopp & Spearman, 2001].	77
<i>Figura 3.1</i> Modelo de la Metodología de Trabajo.	90
<i>Figura 4.1</i> Función de densidad de la distribución gamma con diversos parámetros de forma [Law, 1991]	99
<i>Figura 4.2</i> Típica forma de la función gamma experimentada en procesos reales [Law, 1991]	102
<i>Figura 4.3</i> Datos de VUT Calculator con variabilidad media y utilización del 50% Sin Detractores [Hopp & Spearman, 2001].	107
<i>Figura 4.4</i> Resultados de VUT Calculator con variabilidad media y utilización del 50% Sin Detractores [Hopp & Spearman, 2001].	108

<i>Figura 4.5</i> Hoja de cálculo VUT Calculator para un sistema con fallas Preemptive, utilización del 50% y variabilidad media [Hopp & Spearman, 2001].	109
<i>Figura 4.6</i> Simulación en Arena Sistema Abierto.	111
<i>Figura 4.7</i> Variables de entrada para un sistema cerrado de 5 estaciones en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	122
<i>Figura 4.8</i> Valores críticos del sistema CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	123
<i>Figura 4.9</i> Resultados de un Sistema Cerrado Sin Detractores en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	123
<i>Figura 4.10</i> Sistema Cerrado Con Detractores en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	124
<i>Figura 4.11</i> Simulación en Arena de un Sistema Cerrado tipo CONWIP.	125

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1</i> Fases principales del concepto SMED	16
<i>Tabla 2.2</i> Clases de Variabilidad [Hopp & Spearman].	53
<i>Tabla 2.3</i> Comparación de características organizacionales generales de Manufactura Esbelta y Producción en Masa.	83
<i>Tabla 2.4</i> Comparación de métodos de manufactura entre Producción en Masa y Manufactura Esbelta.	85
<i>Tabla 4.1</i> Parámetros importantes de la Distribución Gamma.	100
<i>Tabla 4.2</i> Diversos valores del tiempo natural de proceso para cada utilización sin detractores.	105
<i>Tabla 4.3</i> Valores del coeficiente cuadrado de variación natural.	105

<i>Figura 4.5</i> Hoja de cálculo VUT Calculator para un sistema con fallas Preemptive, utilización del 50% y variabilidad media [Hopp & Spearman, 2001].	109
<i>Figura 4.6</i> Simulación en Arena Sistema Abierto.	111
<i>Figura 4.7</i> Variables de entrada para un sistema cerrado de 5 estaciones en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	122
<i>Figura 4.8</i> Valores críticos del sistema CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	123
<i>Figura 4.9</i> Resultados de un Sistema Cerrado Sin Detractores en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	123
<i>Figura 4.10</i> Sistema Cerrado Con Detractores en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].	124
<i>Figura 4.11</i> Simulación en Arena de un Sistema Cerrado tipo CONWIP.	125

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1</i> Fases principales del concepto SMED	16
<i>Tabla 2.2</i> Clases de Variabilidad [Hopp & Spearman].	53
<i>Tabla 2.3</i> Comparación de características organizacionales generales de Manufactura Esbelta y Producción en Masa.	83
<i>Tabla 2.4</i> Comparación de métodos de manufactura entre Producción en Masa y Manufactura Esbelta.	85
<i>Tabla 4.1</i> Parámetros importantes de la Distribución Gamma.	100
<i>Tabla 4.2</i> Diversos valores del tiempo natural de proceso para cada utilización sin detractores.	105
<i>Tabla 4.3</i> Valores del coeficiente cuadrado de variación natural.	105

<i>Tabla 4.4</i> Tiempo natural de procesamiento par aun sistema con fallas aleatorias.	106
<i>Tabla 4.5</i> Comparación de Throughput para Sistemas Abiertos Sin Detractores.	113
<i>Tabla 4.6</i> Comparación de Tiempo de Ciclo para Sistemas Abiertos Sin Detractores.	113
<i>Tabla 4.7</i> Comparación del Inventario en Proceso para Sistemas Abiertos Sin Detractores.	114
<i>Tabla 4.8</i> Tabla de Resultados de un Sistema Abierto en diversos escenarios.	115
<i>Tabla 4.9</i> Resultados del Throughput de las simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.	116
<i>Tabla 4.10</i> Resultados del Tiempo de Ciclo Total de las simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.	117
<i>Tabla 4.11</i> Resultados del Inventario en Proceso Total de las Simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.	118
<i>Tabla 4.12</i> Tabla de Resultados de un Sistema Abierto Con Detractores en diversos escenarios.	119
<i>Tabla 4.13</i> Parámetros del tipo de falla wait.	121
<i>Tabla 4.14</i> Resultados de un Sistema Cerrado Sin Detractores.	126
<i>Tabla 4.15</i> Resultados de un Sistema Cerrado Con Detractores.	127

I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción.

Hoy en día, ante una inminente globalización, las empresas mexicanas enfrentan una grave situación, ya que muchas de las pequeñas y medianas empresas no son competidoras para las Organizaciones de Clase Mundial, las cuales han adoptado filosofías que las han llevado a una búsqueda de la constante perfección.

Gran parte de las pequeñas y medianas empresas de un país en vías de desarrollo comienzan a poner en práctica metodologías que las conviertan en competidoras de un mercado internacional, sin embargo el cambio de paradigma se ha dado paulatinamente y cuando se intenta poner en práctica conceptos nuevos, éstos ya han sido mejorados y modificados por las compañías que van a la punta de este movimiento.

Una de las principales metodologías que han puesto en práctica las Organizaciones de Clase Mundial es la filosofía de Manufactura Esbelta, la cual desarrolla diferentes conceptos que se enfocan hacia la transformación de dichas empresas en Organizaciones de Clase Mundial. La meta de la Manufactura Esbelta se basa en satisfacer al cliente reduciendo el tiempo de ciclo de un producto mediante la eliminación de desperdicio [Womack, 1991].

Los sistemas de Manufactura Esbelta tienden a producir con una alta calidad una variedad de productos con tiempos de respuesta cortos, donde se genera una disminución de costos y se simplifican los procesos. Como consecuencia de este sistema, se presenta la satisfacción del cliente y por ende la competitividad y la permanencia en un mercado mundial [Gallego, 2000].

Parte importante de esta investigación se basa en la solución de problemas mediante la simulación de los procesos. Se busca que con ayuda de las

herramientas computacionales se pueda llegar a una solución óptima que ahorre recursos y evite que se generen desperdicios. Es por ello que esta investigación tiene como objetivo utilizar un lenguaje de simulación común dentro de los sistemas de producción para simular procesos que se basen en la filosofía de la Manufactura Esbelta.

1.2 Antecedentes.

Después de la Segunda Guerra Mundial, las empresas Japonesas se vieron envueltas en complicaciones del tipo humano, materiales y recursos financieros. Los problemas que enfrentaban eran completamente diferentes al panorama que su contraparte del oeste tenía en ese entonces. Estas circunstancias llevaron a las empresas a desarrollar nuevas prácticas de manufactura de bajo costo. Los propulsores de este nuevo concepto fueron los ejecutivos de Toyota Motor Co. Eiji Toyoda, Taiichi Ohno y Shigeo Shingo quienes desarrollaron un sistema de producción conocido como el Sistema de Producción Toyota, el cual es un sistema de producción que elimina absolutamente el desperdicio. Dicho sistema se tradujo en la Manufactura Esbelta [Shingo, 1990].

En el año de 1990 se publica el libro "The machine that change the World" en donde los autores, James Womack, Daniel Jones y Daniel Roos, fueron los primeros en utilizar el término Manufactura Esbelta. Dicha publicación surge a raíz de la investigación que realizaron los autores del libro antes mencionado coordinados por el Instituto de Tecnología de Massachussets en 1985, formando parte del Programa Internacional de Vehículos Motorizados, en la cual su objetivo era investigar las mejores prácticas de manufactura en la industria automotriz alrededor del mundo. De esta forma, el libro presentado es la recopilación final de todos los datos e información colectados durante los cinco años que se llevó la investigación [Womack, 1991].

Posteriormente se han ido publicando diversos libros y artículos que hacen referencia al tema de Manufactura Esbelta. La mayoría de estos artículos se basan en sistemas de producción del ramo automotriz y pocas han sido las publicaciones que se enfoquen a una búsqueda de la solución de problemas de sistemas de manufactura que se adecuen a la manufactura de cualquier producto en general. Es por ello que mediante una investigación que se enfoque a la solución de problemas de un sistema de manufactura general se puedan atacar y resolver problemas sin la necesidad de utilizar recursos que nos lleven a un desperdicio mayor.

1.3 Descripción del Problema.

En la actualidad, la pequeña y mediana empresa no ha logrado mantener una homogeneidad entre sus procesos, calidad, niveles de producción, costos tiempos de entrega, niveles de desperdicio, capacitación del personal y satisfacción del cliente. Algunas de estas empresas no saben lo que el cliente desea y cómo lo desea, de allí ya tienen problemas para definir el valor que pueden y deben agregar a sus productos [Gallego, 2000].

Desgraciadamente muchas de las empresas han tenido que cerrar las puertas de sus fábricas debido a problemas de rentabilidad en sus operaciones. Puede entonces notarse claramente que sus esfuerzos han dejado fuera un elemento de suma importancia para la supervivencia de los negocios, la productividad. Toyota en Japón ha sabido conjugar de manera inteligente todos los requerimientos que el cliente requiere y ha dado al mundo industrial una nueva filosofía de trabajo [González, 1998].

La problemática de la pequeña y mediana empresa no es fácil de definir pero los analistas han detectado algunos problemas comunes que deterioran la actividad de las mismas, como lo son: recursos limitados, desconocimiento de la capacidad

instalada, personal sin conocimiento de la misión y visión de la empresa, condiciones de trabajo poco funcionales, altos costos de producción, carencia de personal capacitado, ausencia de cultura de calidad, altos niveles de inventarios, compras mayores a las necesarias reales, desconocimiento de lo que el cliente realmente desea, solo por citar algunos de los problemas [Villareal, 1999].

1.4 Justificación.

Las operaciones de las empresas en la actualidad han obligado al desarrollo de sistemas organizacionales complejos cuyo análisis requiere métodos de modelado sofisticados. Por lo cual se busca representar la operación de los sistemas ya sea en forma determinística o probabilística, permitiendo modelarlos con la finalidad de entender, analizar y optimizar sus medidas de desempeño. Gracias al desarrollo de la computación, el modelo ha tenido una evolución creciente en los últimos tiempos, y en estos días es común observar a las personas creando modelos computacionales en su escritorio en hojas de cálculo. Modelos que si bien la mayoría de las veces son de tipo determinístico y estáticos, representan el primer paso dentro del modelado [Azarang y García, 1996].

Debido a los tiempos de austeridad que el país vive, aunado a una desaceleración económica de los Estados Unidos, la cual ha traído como consecuencia una absoluta abstinencia de inversiones en el ramo de la tecnología por parte de las empresas mexicanas. De hecho estos tiempos difíciles han provocado que muchas de ellas cierren sus puertas o cambien el giro de la empresa. Pensar en la adquisición de una licencia de un paquete computacional para simular procesos de manufactura es una idea tal vez alejada para las compañías que sobreviven y que luchan por su existencia.

De esta manera se justifica la intención de buscar alternativas de bajo costo que les lleven a las empresas mexicanas a obtener una herramienta útil en la

simulación de sus procesos de producción. La simulación de procesos determinísticos y estáticos se puede realizar en hojas de cálculo que son programadas para controlar los parámetros de una producción esbelta.

1.5 Objetivo.

El objetivo de la presente investigación es el de comparar un paquete computacional de simulación de procesos de manufactura más utilizados por la industria con los modelos computacionales determinísticos y estocásticos realizados en hojas de cálculo. Esto para resaltar la funcionalidad de estos modelos y proporcionar a los ingenieros mexicanos una alternativa de solución de problemas, de control y de planeación de una producción esbelta a bajo costo y sin la utilización innecesaria de recursos.

1.6 Hipótesis.

El uso de modelos determinísticos y estocásticos realizados en hojas de cálculo para simular procesos de manufactura basados en la filosofía de Manufactura Esbelta, son utilizados para controlar los parámetros de producción esbelta como tiempo de ciclo, inventario en proceso y capacidad de producción de la misma manera que se utilizan los paquetes computacionales de simulación. Obteniendo de los modelos determinísticos la misma confiabilidad y versatilidad que se obtiene en paquetes computacionales de simulación pero a un bajo costo.

1.7 Alcances y limitaciones.

Para realizar una comparación equitativa de los paquetes de simulación, se simularán procesos de manufactura basados en Manufactura Esbelta que puedan ser aplicados tanto en los modelos determinísticos realizados en hojas de cálculo como en dichos paquetes, por lo que algunas actividades como el transporte

entre estaciones no serán tomadas en cuenta. De esta forma se busca que las condiciones de los procesos de manufactura a simular sean las mismas para todas las alternativas que se presenten dentro de esta comparación.

Los procesos de manufactura que se utilicen para su simulación serán procesos que se enfoquen en plantas industriales de la pequeña y mediana empresa con sistemas de manufactura enfocadas al producto. Este tipo de sistema de manufactura está diseñado para un producto específico donde el flujo avanza a través de una línea de producción. La materia prima entra en la primera estación y el flujo comienza entre las demás estaciones hasta terminar en la última estación como un producto terminado [Askin, 1993].

Los procesos a simular se realizarán bajo ciertas condiciones específicas, como lo son definiendo el flujo de la variabilidad de un sistema de manufactura y en condiciones de sistemas con trabajo en proceso constante. Se harán simulaciones bajo las técnicas de las ecuaciones Kingman y el modelo del Análisis del Valor Medio (MVA), los cuales se definen dentro de la metodología de la Física de la Fábrica. Estos modelos se analizarán paso a paso en el contenido del siguiente capítulo, donde se desarrolla el Marco Teórico que fundamenta esta investigación.

No se utilizarán procesos a simular de empresas de servicios o en plantas industriales donde se utilice un sistema de producción de posición fija, donde todas las partes y procesos son llevados al producto, los cuales son productos grandes como barcos, aviones, edificios, etc. [Askin, 1993].

1.8 Literatura Consultada.

En la realización de esta investigación se revisaron diversas publicaciones referentes al tema de la Manufactura Esbelta, tomando como inicio el Sistema de Producción Toyota, así como publicaciones donde se establecen metodologías alternas a la Manufactura Esbelta, como lo es La Física de la Fábrica.

Una de las publicaciones que por su contenido es muy similar a lo que esta investigación plantea, es la publicación de Whitt titulada "An Interpolation Approximation for the Mean Worload in a G/G/1 Queue", publicada en Operations Research en Diciembre de 1989 [Whitt, 1998].

Esta publicación desarrolla una aproximación para calcular el tiempo medio de la carga de trabajo en un proceso en estado estable y el tiempo de espera en un sistema con llegadas y procesos que siguen una distribución general. La aproximación se obtiene considerando una utilización ligera o pesada en el comportamiento de dicho sistema de producción. Esencialmente Whitt ocupa la fórmula Brumell para describir el comportamiento del tiempo de ciclo y la fórmula Marshall para definir el tiempo de espera del sistema de producción planteado.

La aproximación se realiza enfocándose en un sistema con una sola estación de trabajo considerando un tiempo de espera indefinido, utilizando los tiempos entre llegadas y de procesos provenientes de variables aleatorias independientes siguiendo una distribución idéntica para ambos casos. Este punto da una clave importante al utilizar un solo servidor de manera de observar el comportamiento de éste en diversos escenarios a lo largo de un tiempo determinado.

Utilizando las formulas de Brumell y Marshall, Whitt realiza diversas interpolaciones y derivaciones de manera que busca la mejor forma de definir el

comportamiento del sistema planteado. Las interpolaciones se realizan utilizando funciones que describen diversos casos tanto para una utilización elevada y una utilización baja. Estas funciones se comparan con los límites de los polígonos que describen cada escenario que se plantea en diversos casos, y así observar si en cada escenario si las aproximaciones se encuentran dentro de los límites establecidos.

La investigación que realiza Whitt ocupa un gran número de referencias, por lo que es una lectura extremadamente técnica y de difícil comprensión para personas que no estén involucradas en el tema, más aún nos da un indicio que investigaciones como la que se está desarrollando en esta Tesis, han sido tomadas en cuenta en la búsqueda de soluciones óptimas que lleven a obtener mejoras dentro de los sistemas de producción.

De las referencias consultadas, sobresalen las publicaciones de Womack quien es el precursor del concepto de la Manufactura Esbelta, tanto en su libro "The Machine that Change the World" como su libro siguiente "The Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in your Corporation" donde mencionan los pasos más importantes para desarrollar una Empresa Esbelta.

Es necesario mencionar las publicaciones de Hopp y Spearman, y muy importante el libro titulado "Factory Physics" en el cual se establecen los conceptos básicos que esta investigación toma como punto de partida para realizar la comparación de un paquete computacional con una rutina de hoja de cálculo, donde se cuantifican los parámetros que definen el comportamiento de un sistema de producción esbelto.

Durante esta investigación se adoptó La Física de la Fábrica como una metodología paralela a la Manufactura Esbelta, donde su principal objetivo es reducir el tiempo de ciclo eliminando la variabilidad dentro de un sistema de

producción, similar al planteamiento del objetivo de la Manufactura Esbelta. Por este motivo se obtiene una conjunción de estas metodologías dando lugar a una metodología denominada "Lean Physics".

1.9 Contenido de la Investigación.

Esta investigación está organizada en cinco capítulos donde se desarrollan diversos temas referentes al objetivo planteado.

En el Capítulo I se define la Introducción, los Antecedentes, la Descripción del Problema, la Justificación, el Objetivo, la Hipótesis, los Alcances y Limitaciones, así como la Literatura Consultada. Este capítulo presenta los temas principales que dan lugar al desarrollo de la investigación y se define el porqué se realizó una investigación de esta clase.

El Capítulo II establece el Marco Teórico, es aquí donde se explica la metodología de la Manufactura Esbelta, desde sus inicios como el Sistema de Producción Toyota, así como el Pensamiento Esbelto que define los cinco pasos esenciales para establecer un sistema apegado a la Manufactura Esbelta. Es en este capítulo donde se establece la metodología de la Física de la Fábrica, se explican los principios básicos y conceptos así como el desarrollo de las ecuaciones que llevan a definir los parámetros que cuantifican y que califican a un sistema esbelto. De igual forma se apoya este capítulo en la comparación de un sistema esbelto con un sistema obeso de manera en que se pueda observar las ventajas y desventajas que un sistema esbelto ofrece.

El Capítulo III explica el Modelo que se establece para definir la investigación, es en este capítulo donde parte la metodología que se sigue para realizar la experimentación con los diferentes escenarios que se establecen.

El Capítulo IV define la Experimentación y los Resultados, habiendo establecido el modelo a desarrollar, el siguiente paso es llevar a cabo las actividades que el modelo menciona. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la experimentación con los diversos escenarios definidos por el modelo.

El Capítulo V se mencionan las Conclusiones a las cuales se ha llegado al culminar con la investigación además de definir posibles líneas de investigación que llevarán a complementar este trabajo de Tesis y que servirán como referencia para otros estudiantes al tomar una decisión sobre el desarrollo de su propia investigación.

Los siguientes capítulos establecen tanto la Bibliografía donde se mencionan las referencias consultadas que dan lugar a la base de esta investigación, así como los anexos que esta investigación utiliza como complemento de lo que se ha descrito en el cuerpo de la tesis.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Principios del Sistema de Producción Toyota.

El Sistema de Producción Toyota no es considerado un sistema de producción Kanban como muchas personas lo dirían en primera instancia, en sí el Sistema de Producción Toyota es un sistema para eliminar absolutamente el desperdicio. No es posible implementar un sistema de producción Kanban en una empresa que no ha comenzado acciones para convertirse en una empresa esbelta. Kanban es solo una técnica que sirve como medio para alcanzar un sistema Justo a Tiempo [Shingo, 1990].

Los principios del Sistema de Producción Toyota se basan en la necesidad de producir una gran variedad de vehículos para un mercado relativamente pequeño, sin disponibilidad de espacio ni de dinero para integrar una gran cantidad de inventario [Arellano, 2001]. A continuación se presentan los principios básicos del Sistema de Producción Toyota citados por Shigeo Shingo en su libro "*El Sistema de Producción Toyota desde un punto de vista de la Ingeniería*" los cuales dieron lugar al surgimiento de la Manufactura Esbelta.

1.- Reducción de los costos.

Es el primer concepto que se desarrolla el cual depende del precio de venta del producto. El precio de venta del producto es obtenido gracias a la adición del costo de producción más el beneficio que la empresa busca. Es difícil modificar el precio de venta del producto buscando elevar el beneficio de la empresa, una estrategia de este tipo es una estrategia sin sentido que llevará a la empresa a perder lugar en el mercado. Por lo que el único concepto que se puede variar de dicha ecuación es reducir el costo de producción del producto. Al disminuir los costos sin modificar el precio de venta del producto, se elevan los beneficios para la empresa.

Parte importante de reducir los costos significa la forma en la que se está produciendo. Un claro ejemplo es la sobreproducción, la cual significa un despilfarro para la empresa. Existen dos tipos de sobreproducción, la cuantitativa y la anticipada. La sobreproducción cuantitativa se refiere al hecho de hacer más productos de los que se necesitan. Es decir, se producen 100 piezas más de las que están programadas ya que se tiene el temor de encontrar piezas defectuosas. La sobreproducción anticipada es aquella que se efectúa cuando se ha llegado a la meta de producción con varios días de anticipación. Por lo que la mayoría de los Gerentes opinan que las máquinas no pueden estar paradas y comienzan a producir más de las piezas pedidas, con la idea de guardarlas en inventario para un nuevo pedido que aún no ha llegado.

2- Cero inventarios.

La necesidad de tener grandes inventarios llevaba a las empresas a sentirse seguras con respecto a un cambio de demanda o con la idea de que estaban preparadas para pedidos grandes. Estos grandes inventarios son producto de una producción en grandes lotes o una producción en masa. El efecto de grandes inventarios se combatió con un sistema de producción basado en pedidos como una mejora para responder a una demanda específica, la cual trajo consigo una producción en pequeños lotes y la disminución dramática de los tiempos de ciclo de producción.

Trabajar en un sistema de producción de cero inventarios o inventarios mínimos, generó la técnica Justo a Tiempo, donde se busca que cada proceso debe ser provisto con los ítems requeridos con la cantidad requerida y en el tiempo requerido sin generar una acumulación innecesaria de material.

3.- Operaciones en flujo.

Este punto hace referencia a tener todos los procesos conectados con los cuales se genere un flujo de producción. Este concepto resalta que las operaciones en flujo son más efectivas si los procesos primeros se conectan con la línea de montaje para así obtener operaciones en flujo comprensivo e integrado.

4.- Tiempos de preparación cortos.

Un sistema de producción basado en pedidos tiene que considerar una alta diversidad de productos con lotes pequeños, por lo que los cambios de herramientas o la preparación de las máquinas son más constantes y si el tiempo ocupado para realizar estas operaciones es largo equivaldría a tener un tiempo de entrega muy basto para poder completar la meta de producción. En respuesta a esta necesidad se desarrollo un concepto que revolucionó los sistemas de producción, Cambio de Herramienta en un Minutos de un Solo Dígito, esta técnica se le conoce como SMED por sus siglas en ingles "Single Minute Exchange of Die".

El concepto de SMED permite que cualquier preparación de las máquinas pueda realizarse en menos de diez minutos, por lo cual si una preparación tarda algunas horas en llevarse acabo, el aplicar SMED permitirá hacer la preparación en unos cuantos minutos. Para mencionar el concepto SMED, es necesario mencionar que existen dos tipos de trabajos de preparación de máquinas, los cuales se dividen en preparación interna y preparación externa. La preparación interna son aquellos procedimientos que se realizan solamente cuando la máquina está parada. La preparación externa son aquellos procedimientos que se pueden realizar cuando la máquina está en operación. Existen cuatro fases principales que componen el concepto SMED, las cuales se explican en la siguiente tabla.

Fase Preliminar	Fase 1	Fase 2	Fase 3
No se distingue diferencias entre las preparaciones externas de las internas.	Se separan las preparaciones externas de las internas.	Se convierten las preparaciones internas en externas.	Se normalizan todos los aspectos de la operación de preparación.

Tabla 2.1. Fases principales del concepto SMED.

El concepto SMED es una técnica muy eficiente que permite reducir las preparaciones a menos de una vigésima parte del tiempo que se utiliza normalmente. Algunas de las mejoras que ofrece este concepto son:

- Una clara separación entre preparación interna y externa.
- Amplia conversión de preparación interna a externa.
- Eliminación de ajustes.
- Fijación sin tornillos.

El sistema SMED es un concepto muy complejo que requiere de tiempo de estudio y de una amplia explicación para su comprensión. Por lo que se necesitaría una investigación completa para desarrollar este sistema. En este caso solo se menciona el sistema SMED como pilar de la aportación del Sistema de Producción Toyota a la manufactura de clase mundial.

5.- Eliminación de averías y defectos.

Cualquier tipo de avería o desperfecto en las máquinas causa una inestabilidad de la producción, de hecho los inventarios en proceso son una necesidad utilizada en caso de que una máquina sufra una avería para de ese modo seguir produciendo. Utilizar un sistema de inventarios mínimo genera una alta prioridad a eliminar este tipo de desperfectos en las máquinas por lo que es necesario

implementar programas de mantenimiento preventivo que disminuyan este tipo de averías o defectos en las máquinas.

6.- Nivelación de procesos de producción.

El utilizar un sistema de producción con inventarios mínimos lleva a una fluctuación de la carga de producción, resultando más frecuentes las esperas y las ampliaciones de los tiempos de operación. La carga de producción se refiere al volumen de trabajo que se necesita realizar en una estación o en un proceso. Este proceso de nivelación se refiere a equilibrar la carga de producción con la capacidad de la máquina, mediante este equilibrio se puede deducir si la máquina puede producir la carga requerida, de lo contrario se tiene que modificar la capacidad para poder cumplir con la meta destinada.

7.- Operaciones en flujo integrado y comprensivo.

En este caso para ejecutar un sistema de operaciones en flujo integrado y comprensivo, el Sistema de Producción Toyota ha desarrollado el sistema Nagara, el cual facilita el flujo de las piezas a través de la simultaneidad de dos acciones. En este caso la sincronización de las actividades es parte fundamental del proceso, no la velocidad con la que se efectúan. El flujo coherente pieza a pieza trasciende las divisiones de talleres para seguir el proceso de producción.

8.- Reducción de costos de personal.

La reducción de personal ayuda de gran forma a eliminar el desperdicio de la empresa, ya que mejora los movimientos de trabajo de los empleados, combina las tareas marginales permitidas y transfiere los movimientos humanos a las máquinas. Esencialmente transforma los procesos manuales en mecánicos más no hace a las máquinas completamente independientes a menos de que se

utilicen procesos de automatización que paren el proceso cuando haya terminado. La creación de mecanismos de paro automático condujo a la adopción de operaciones con manejo de múltiples máquinas.

9.- De la mecanización a la automatización.

Al transformar los procesos manuales en mecánicos aún no ha sido eliminada la intervención del trabajador, ya que se requiere a un trabajador que este cerca de la máquina para que realice diversas funciones como paros en caso de haber desperfectos o tomar decisiones rápidas para solucionar problemas sin que se afecte la producción. Lo que se necesita es una transferencia de alto nivel de funciones inteligentes a las máquinas, por lo cual las máquinas se ocuparon con mecanismos que no solo detectaban las situaciones anormales, sino que también paraban las máquinas cuando ocurrían anomalías. De esta manera se recurre a la automatización de procesos para de esta forma reducir la variabilidad de los procesos y hacerlos más eficientes.

10.- Desarrollo y mantenimiento de las operaciones estandarizadas.

De las mejoras en las operaciones se determinan los estándares a seguir en cada proceso. Las desviaciones respecto a un estándar particular se verifican en orden de mantener el nivel de calidad de dichas operaciones. Las operaciones estandarizadas se ponen por escrito imprimiendo así las hojas de operación estándares, para facilitar así la continuidad de las mejoras y el progreso de la empresa.

En la mayoría de las empresas actuales se utilizan hojas de instrucciones para cada proceso, esto se hace con el fin de tener por escrito paso a paso el proceso que se debe de seguir para realizar una operación dentro del proceso de producción. De esta forma se busca que los procesos queden estandarizados

mediante las hojas de instrucciones y que los operarios conozcan paso a paso la forma correcta de realizar las operaciones.

11.- Hacia un sistema Kanban.

El sistema Kanban se diseñó como una necesidad para mantener el nivel de mejora, ya que éste sistema es una herramienta efectiva para apoyar las operaciones del sistema de producción en su conjunto. El sistema Kanban es un sistema simplificado de control visual, auto regulativo y centrado en la producción, lo cual hace posible responder de una manera rápida y simple a los cambios en la producción. Adicionalmente, provee un excelente medio para promover las mejoras ya que debido a la restricción del número de kanbanes en circulación es muy fácil detectar las áreas de mejora en el proceso.

El sistema Kanban está inspirado en el sistema que se ocupa en los supermercados donde en vez de utilizar un sistema de reaprovisionamiento según lo estimado, se reaprovisiona solamente lo que se ha vendido, reduciendo de esta forma los inventarios no deseables. Es decir que en un sistema Kanban se produce solamente lo que se ha vendido, o lo que se está seguro de que se va a vender. Para realizar esto el mejor método es tener órdenes o pedidos por anticipado y producir solo lo que se ha vendido.

En general, el Sistema de Producción Toyota tiene como objetivo principal reducir los tiempos de ciclo a través de la eliminación del desperdicio. La idea fundamental de este concepto es mantener el flujo continuo de productos de manera flexible para adaptarse a los cambios de producción que origina la demanda de dichos productos. Como resultado de el Sistema de Producción Toyota se obtienen la disminución de los niveles de inventarios y la mejor utilización de la fuerza de trabajo, incrementando así la productividad y disminuyendo los costos de producción [Hernández, 2002].

2.2 Fundamentos de Manufactura Esbelta.

El Sistema de Producción Toyota fue nombrado en 1990 con el término Manufactura Esbelta. Este término se le adjudicó en la publicación realizada por James Womack, Daniel Jones y Daniel Roos en el libro "The machine that change the world". Dicha publicación asume que Manufactura Esbelta es una metodología que tiene como objetivo alinear la estrategia organizacional hacia una meta única: "Satisfacer al cliente, reduciendo el tiempo de ciclo del producto mediante la eliminación del desperdicio para reducir los costos en todo el proceso de producción y en la utilización de la mano de obra" [Womack, 1991].

Esta metodología reduce los tiempos de la línea de producción desde que el cliente hace su requerimiento hasta que este le es embarcado eliminando siempre el desperdicio. Esto no significa el mantener una gran cantidad de inventario en un almacén para ser embarcado inmediatamente cuando el cliente lo requiera. Más bien significa que se va a producir únicamente lo que el cliente ordene tan pronto como sea posible después de que ha sido requerido y que el tiempo de ciclo se tan corto como sea posible. En cualquier momento que un producto esté esperando, en cualquier lugar, esto es desperdicio [Arellano 2001].

La Manufactura Esbelta es nombrada de este modo ya que utiliza menos recursos comparada con la producción en masa; menos esfuerzo del recurso humano, menos espacio en la planta, menos inversión en herramientas, menos proveedores, menos horas de ingeniería para desarrollar nuevos productos, menos inventario, produciendo mayor variedad de productos y disminuyendo los costos de producción, entregándole al cliente lo que realmente desea. Siendo la Manufactura Esbelta una colección de técnicas relativamente independientes específicas para las operaciones del piso de trabajo. Estas prácticas eliminan las actividades que no agregan valor al producto deseado por el cliente,

manteniendo la utilización plena de recursos y creando un ambiente organizacional favorable a la mejora continua [Gallego, 2000].

De la publicación "The machine that change the World", se deduce que mediante la metodología de Manufactura Esbelta las compañías son capaces de desarrollar, producir y distribuir productos con menos esfuerzo humano, espacio, herramientas, tiempo y gasto en general, además de incrementar su flexibilidad y respuesta a un mercado cambiante. Los pasos básicos para lograr este cometido son:

- Eliminación de los procesos que no agregan valor al producto.
- Desarrollo de todos los procesos en flujo continuo.
- Integración de la mano de obra en equipos multifuncionales.
- Impulso de estos equipos a la mejora continua.

Según Womack y Jones en su artículo "From the Lean Production to the Lean Enterprise", no es solo aplicar los principios esbeltos en actividades discretas, sino agregar todas las actividades de la compañía a la cadena de valor que diseña, vende y brinda servicio para lograr un incremento en el desempeño de la empresa en su conjunto. Para lograr el objetivo de encadenar todas las actividades que agregan valor se necesita un modelo organizacional denominado La Empresa Esbelta.

La Empresa Esbelta se define como un conjunto de individuos, funciones y compañías separadas legalmente, pero operando sincronizadamente. Lo que verdaderamente define a la empresa esbelta es la noción de una cadena de valor que fluya en la empresa. Donde desde el diseño y producción, hasta ventas y mantenimiento, deben desarrollar actividades que se enfoquen en proveer al cliente un valor adicional [Womack, 1994].

2.2.1 El Pensamiento Esbelto.

Después de la publicación "The machine that change the World" los gerentes de las compañías preguntaban cómo llegar a ser una Empresa Esbelta, los autores James Womack y Daniel Jones decidieron realizar una segunda publicación que sirviera como una guía para implementar la Manufactura Esbelta en sus compañías, de esta publicación surge el libro "Lean Thinking, Banish Waste and Create Wealth in your Corporation", en donde expresan los cinco principios básicos para llegar a ser una Empresa Esbelta [Womack, 1996].

Es importante recalcar que el desperdicio es el principal antagonista en el camino a la transformación en una Empresa Esbelta. En Japonés, la palabra desperdicio se conoce como *Muda* lo que significa cualquier actividad humana que absorbe recursos pero no crea valor. Los ejemplos más comunes de *Muda* son:

- Errores que requieren rectificación.
- Producción de artículos que nadie ha requerido y son almacenados en pilas de inventario de producto terminado.
- Realizar procesos que no son necesarios.
- Movimiento de empleados y herramientas de un lugar a otro sin ningún propósito.
- Grupo de personas esperando a que las piezas sean liberadas de una actividad anterior.
- Bienes y servicios que no conocen las necesidades del cliente.

Todos estos tipos de errores son comunes en todas las empresas regulares que aún no han implementado la Manufactura Esbelta, por lo que podemos concluir que el desperdicio se encuentra en todos lados. Afortunadamente existe un antídoto para controlar el desperdicio o *Muda* y es un Pensamiento Esbelto.

El Pensamiento Esbelto provee una manera de especificar el valor, alinear las acciones de creación de valor en la mejor secuencia, conducir estas actividades sin interrupciones cuando alguien las solicite y desempeñarlas más y más efectivamente. En resumen, el Pensamiento Esbelto es esbelto porque provee una manera de hacer más con menos, menor esfuerzo humano, menor equipo, menor tiempo, menos espacio, mientras las operaciones se acercan más a proveer lo que los clientes requieren exactamente [Womack, 1996].

La Manufactura Esbelta es implementada a través de cinco principios básicos, los cuales están enfocados hacia el cliente. Los cinco principios se definen a continuación:

1.- Definir Valor: Es el paso más crítico ya que es el punto de inicio. El valor solo puede ser definido por el cliente o usuario final del bien o servicio ofrecido y en términos de satisfacer sus necesidades a un precio y tiempo determinado. Es el cliente quien decide que es lo que vale en un producto, ya que de otra forma se estará produciendo artículos que el cliente no desea y por ende no se venderán y se considerarán como desperdicio. Al definir el valor se busca ofrecer el producto especificado, con los requerimientos que el cliente solicita a un precio específico. Lo anterior se logra a través de un dialogo directo con el cliente, donde lo que se busca es alinear la estrategia empresarial para satisfacer sus requerimientos. Es decir, se trabaja para entender y entregar lo que el cliente desea comprar y por ende se elimina el desperdicio de aquellas operaciones que generar valor [Moore, 1998].

2.- Identificar la Cadena de Valor: El primer punto indica que se debe conocer lo que el cliente realmente quiere de un producto, cual es el verdadero valor para el cliente, el siguiente paso es conocer aquellos proceso que agregan o no valor al producto, siendo que las actividades que no agregan valor no son parte de una cadena de valor. La cadena de valor es el conjunto de actividades

específicas requeridas para llevar un producto a las tres tareas administrativas esenciales de cualquier negocio: *la solución de problemas* desde el concepto inicial, el diseño detallado y la ingeniería, hasta la producción del producto, *la administración de la información* desde la toma de órdenes de clientes hasta la programación detallada y la entrega, y *la transformación física* iniciando desde que se tiene la materia prima hasta que el producto final se encuentra en las manos del cliente. Es importante resaltar las actividades de las cuales se define la cadena de valor:

- Actividades que agregan valor: Actividades que para el cliente hacen de un producto o servicio más valioso.
- Actividades que no agregan valor pero son inevitables: Actividades que son necesarias para que el producto sea satisfactorio para el cliente aunque no agreguen valor al producto, estas actividades son conocidas como desperdicio Tipo I. Un ejemplo de estas actividades es la inspección.
- Actividades que no agregan valor y pueden ser eliminadas inmediatamente: Actividades que no hacen el producto más valioso para el cliente final y son innecesarias, por lo cual se pueden eliminar inmediatamente o a corto plazo, se conocen como desperdicio Tipo II.

3.- Definir el flujo: Ya que se ha definido el valor que los clientes desean de los productos y que se han detectado aquellas actividades que no agregan valor y se ha definido una cadena de valor, es necesario hacer que las actividades de la cadena de valor fluyan ininterrumpidamente. Para lograr la continuidad del flujo es necesario cambiar los esquemas administrativos tradicionales orientados a la administración por funciones, hacia una nueva administración por procesos, asegurando así la creación continua del valor. La eliminación del desperdicio radica en hacer lotes pequeños de productos, lo ideal es tener lotes de tamaño uno, que fluyan constantemente por procesos de producción. El efecto de esto es provocar que los tiempos se acorten continuamente.

Una herramienta japonesa que contribuye a que exista el flujo de los productos dentro de la cadena de valor son las "5 S". Esta herramienta es considerada un "housekeeping" o limpieza en el área de trabajo. El objetivo de las 5 S es eliminar el desperdicio asociado con la desorganización y la falta de limpieza a través de una secuencia de pasos, los cuales se mencionan a continuación:

- *Seiri*: Separar lo necesario de lo innecesario. Es decir, mantener lo necesario y eliminar lo innecesario, no producir desperdicios o consumir más recursos de los necesarios. Desarrollar medidas para prevenir la acumulación de recursos innecesarios.
- *Seiton*: Asignar un lugar para cada cosa y colocar cada cosa en su lugar. Se determina una ubicación y se identifican las partes.
- *Seiso*: Limpieza continúa del área de trabajo. Se busca mantener el lugar de trabajo limpio, se elimina la basura, el polvo, el aceite, el desperdicio y cualquier material que provoque suciedad en el lugar de trabajo. Se integra un programa de limpieza dentro de las actividades cotidianas del lugar de trabajo.
- *Seiketsu*: Estandarizar todo lo que sea posible. Se hacen estándares visibles de manera que cualquier anomalía sea fácilmente detectable.
- *Shitsuke*: Crear un hábito entre los trabajadores para seguir los procedimientos correctos.

Estas herramientas sirven como una mejora continua, donde lo que se busca es que se defina y se regule el flujo de la creación de valor para que de esta forma se reduzcan considerablemente los tiempos de ciclo.

4.- Jalar: Una vez que se ha identificado el valor que el cliente requiere en el producto, y que se ha distinguido la cadena de valor, y que las partes fluyen por el sistema, por consiguiente se ha reducido drásticamente el tiempo de ciclo. Al tener un tiempo de ciclo y de respuesta corto, es necesario comenzar a producir

lo que el cliente realmente demanda, haciendo que sea él mismo quien jale el gatillo de producción, en vez de continuar empujando la producción y generando grandes inventarios que representan desperdicio puro. Dentro de la Manufactura Esbelta, el inventario es considerado un desperdicio, ya que se produjo lo que el cliente no deseaba, es por ello que es necesario que sea el propio cliente quien jale la producción de lo que realmente necesita.

Producir con un sistema de manufactura de empuje basado en pronósticos genera grandes cantidades de inventario, ya que muchos de estos productos son productos que no se vendieron y que se quedan almacenados por largos periodos de tiempo. El tener un gran almacén de productos terminados no te da la seguridad de enfrentar a una variación de la demanda, en cambio es considerado como dinero muerto que no genera ninguna utilidad y que está costando a la empresa mantenerlo ahí guardado.

Las técnicas más comúnmente utilizadas para desarrollar un sistema de producción jalar son: *Kanban* y *takt time*. El *takt time* es utilizado para asegurar que el tiempo que se necesita para producir un artículo corresponde al tiempo necesario para satisfacer la demanda del cliente, asegurando así una sincronización entre la producción y las necesidades del cliente. El *Kanban* como se mencionó anteriormente, es un sistema de producción donde se utilizan tarjetas con códigos de barras o apoyos visuales que informan a las estaciones anteriores de algún proceso el momento indicado para producir una determinada pieza. De esta forma se logra tener el material correcto, en la cantidad correcta, en el momento correcto, en la posición correcta y con las características necesarias para el siguiente proceso en el sistema de producción [Shingo, 1990].

De esta forma, mediante un sistema de producción jalar se evita que se produzcan artículos que no son demandados por el cliente, y solo se produce lo que el cliente desea, eliminando así los inventarios de producto final.

5.- Perfección: Al utilizar los cuatro primeros principios, todos los involucrados en la empresa se dan cuenta de que no existe un final para seguir reduciendo esfuerzos, tiempo, espacio, costo y errores; y que el producto que se ofrece satisface cada vez más las necesidades y expectativas reales del cliente. Por lo que el conseguir la perfección en las operaciones se convierte en el trabajo cotidiano de todos los empleados y la reducción continua del desperdicio es un objetivo permanente. Lo que procura este punto es crear una cultura donde la mejora continua forme parte de la rutina diaria de trabajo en todos los niveles de la empresa y de esta manera se llegue a una madurez corporativa [De León, 2001].

Estos cinco principios básicos son los que describe James Womack para implementar la Manufactura Esbelta dentro de una empresa en su libro "Lean Thinking, Banish Waste and Create Wealth in your Corporation" donde expone estas ideas después de haber concordado que era necesaria una guía que sirviera como estrella del norte para los ingenieros y gerentes que preguntaban constantemente la manera de llegar a convertirse en una empresa esbelta [Womack, 1996].

2.2.2 Aprender a Observar.

Aprender a Observar, es un manual publicado por Rother y Shook, avalados por Womack y Jones, quienes son los propulsores de la Metodología de la Manufactura Esbelta, en el cual describen las características fundamentales de los primeros pasos del *Pensamiento Esbelto*, en el manual se analizan diversos pasos a considerar para hacer un mapa de la cadena de valor y la forma en la cual éste es mejorado hacia un estado futuro donde se eliminan aquellas actividades que no agregan valor y por lo tanto se elimina la "muda" existente en el sistema.

Este manual surge como una continuación del libro "*Lean Thinking*" ya que en la mayoría de los casos, el trazar un mapa de la cadena de valor no era una tarea fácil de realizar, y muchas de las compañías que comenzaban el cambio esbelto omitían este paso restándole importancia, ya que no sabían de que forma efectuarlo. Es por ello que se publica este manual para hacerles ver la importancia que tiene el dibujar un mapa de la cadena de valor y partir de éste para diseñar un estado futuro habiendo eliminado las actividades que no agregan valor al producto.

Según Womack, las empresas decidían realizar campañas relámpago en busca de la eliminación de muda sin antes conocer su estado original y sin tener una visión correcta hacia donde quieren llegar. Estas grandes campañas servían de alguna forma haciendo que el flujo fluyera más fácilmente por la cadena de valor, pero dicho flujo se pierde en las profundidades de los inventarios sin continuar por la cadena al siguiente paso. El resultado es que los ahorros en los costos no son significativos, no hay mejoras en el servicio ni en la calidad, no hay beneficios para el proveedor, la sostenibilidad es limitada a medida que las normas que causan los desperdicios de la cadena de valor entera se apoderan del valor puro y se produce una frustración generalizada [Rother & Shook, 1998].

El mapa de la cadena de valor se utiliza para mostrar estados actuales y futuros, en el proceso de formulación de planes de ejecución para instalar sistemas de Manufactura Esbeltos. Un mapa de cadena de valor contribuye de manera importante a establecer un flujo, eliminar el desperdicio y añadir valor en cualquier tipo de sistema de producción.

2.2.2.1 Mapa de la Cadena de Valor.

Una cadena de valor es el conjunto de acciones, tanto de las que agregan valor como las que no lo agregan, que se necesitan actualmente para mover un

producto a través de los principales flujos esenciales, como lo son: el flujo de producción, desde la materia prima hasta que el producto llega a las manos del cliente, y el flujo de diseño, desde el concepto hasta el lanzamiento del producto.

El flujo de producción va desde la demanda del consumidor hacia atrás, hasta la materia prima que se requiere. Adoptar una perspectiva de cadena de valor significa trabajar en conjunto, no solo optimizar pequeñas partes o estaciones por separado, sino optimizar toda la línea de producción como un todo.

Para crear un flujo que agregue valor se necesita una visión del mismo, se debe de trazar un mapa de la cadena del estado actual y enfocarse en el flujo con una visión de un estado ideal o mejorado, por lo que antes de hacer modificaciones o cambios en el sistema primeramente se debe trazar el mapa de la cadena de valor del estado actual y después hacer las modificaciones necesarias para trazar el mapa del estado futuro o ideal y de ahí partir hacia un plan de implementación de dicho estado ideal.

El mapa de la cadena de valor puede ser una herramienta de comunicación, de planificación comercial y también una herramienta para gestionar su proceso de cambio. El dibujar el estado futuro tiene como meta diseñar e introducir una cadena de valor esbelta. Un estado actual sin un estado futuro no es útil, por lo que el mapa del estado futuro o ideal es sumamente importante.

El primer paso es dibujar el estado actual, lo cual se hace recopilando información de la planta. Esto aporta la información que usted necesita para desarrollar un estado futuro. En la Figura 2.1 se denota que las flechas van en ambos sentidos, del estado actual y el estado futuro, indicando que el desarrollo de ambos estados son esfuerzos que se superponen. A medida que se traza el estado actual irán surgiendo ideas sobre el estado futuro, asimismo cuando se dibuja el estado futuro se aporta información importante acerca del estado actual.

El paso final es preparar y comenzar a usar activamente un plan de ejecución que describa cómo se piensa lograr el estado futuro. A medida que el estado futuro se va convirtiendo en una realidad, se deberá dibujar un nuevo mapa de estado futuro. Esto significa mejoramiento continuo en el nivel de la cadena de valor; siempre debe haber un mapa de estado futuro.

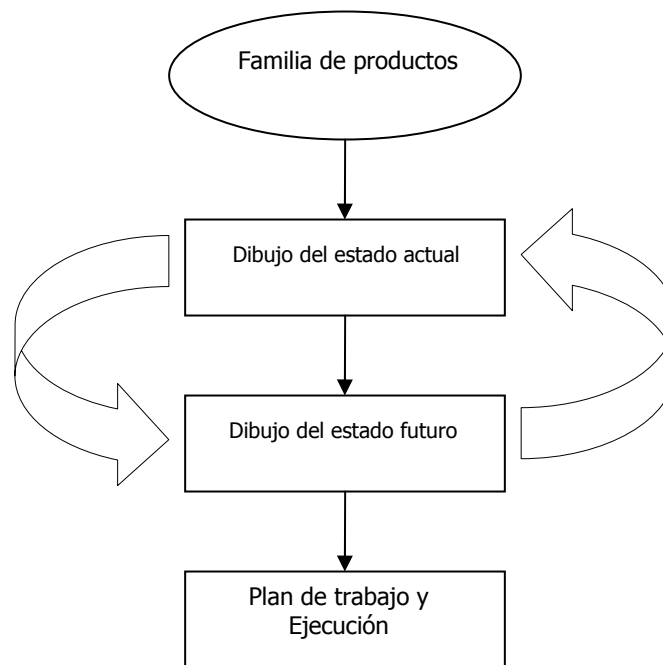


Figura 2.1 Etapas iniciales del trazo del mapa de una cadena de valor [Rother & Shook, 1998].

El esfuerzo de dibujar un mapa del estado actual de la cadena de valor se considera muda pura si no se desarrolla y se pone en práctica un mapa de la cadena de valor del estado futuro o ideal, en el que se eliminen las fuentes de desperdicio y aumente el valor para el cliente.

Habiendo recopilado toda la información requerida para realizar el mapa de la cadena de valor del estado actual, esta se puede complementar con cierta información que indica el estado del proceso actual. El mapa de la cadena de valor actual, se complementa con las leyes de la *Física de la Fábrica*,

primeramente es necesario hacer un benchmarking interno donde se pueda ver la situación del estado actual, este benchmarking se realiza al graficar los estados del sistema, comparando el mejor caso, el peor caso, el peor caso práctico y estado actual.

Sería inútil no hacer esta comparación antes de hacer alguna modificación al sistema, ya que mediante esta comparación se proporciona una idea de cómo está operando el sistema actual. La comparación se puede hacer graficando el throughput contra el trabajo en proceso y el tiempo de ciclo contra el trabajo en proceso, en ambas gráficas es necesario obtener el tiempo promedio primo del sistema o lo que se conoce como el tiempo que agrega valor, y la tasa del cuello de botella. Estos datos son fáciles de obtener del sistema ya que se han plasmado en la cadena de valor toda esta información.

De esta forma se conoce si el sistema está muy alejado de un panorama esbelto o está próximo a un panorama similar al peor caso práctico, el cual es la frontera entre el estado esbelto y un estado obeso. Esta comparación proporciona una idea clara de las oportunidades de mejora que hay en el sistema para así emprender el camino hacia un mapa de la cadena de valor del estado ideal.

La mayor parte de los procesos que no son esbeltos funcionan como una isla aislada, que produce un lote y lo empuja hacia delante conforme a la programación del programa maestro de producción, sin tener en cuenta las verdaderas necesidades del proceso situado más adelante o proceso cliente, por lo que los productos procesados que no son pedidos, se van acumulando y se van almacenando ocupando espacio y desperdiciando recursos, originando un desperdicio puro. Además que los defectos quedan escondidos en el inventario hasta que aparecen de repente cuando el proceso de adelante utiliza las piezas acumuladas, la mayor parte del tiempo que tarda un producto en atravesar todo el proceso de producción es muy largo originado por tiempos de espera.

En un proceso es muy importante ser consciente del desperdicio, pero es más importante conocer las causas de dicho desperdicio, de manera que al trazar el mapa de la cadena de valor del estado futuro o ideal, estas causas sean eliminadas de raíz. Es necesario atacar las causas de los problemas de desperdicio, no los síntomas que se presentan.

La fuente más importante de desperdicio es el exceso de producción, producir más, más rápido y más pronto de lo que exige el proceso de adelante. El exceso de producción según Rother y Shook es el origen de todo tipo de pérdidas, aparte de los excedentes de inventario y por consiguiente de los recursos utilizados. La sobre producción se almacena, exige espacio y recursos para manipularla, por lo que conlleva a una prolongación de tiempos de entrega limitando la flexibilidad de atender la demanda del cliente.



Figura 2.2 El problema del exceso de producción [Rother & Shook, 1998].

La finalidad de una cadena de valor esbelta es configurar dicha cadena de tal manera que cada proceso fabrique solamente lo que necesita el proceso de adelante y cuando éste lo necesita, conectando los procesos desde el cliente hasta la materia prima a lo largo de un flujo uniforme y recto que favorezca plazos de entrega cortos, una mejor calidad y un costo mínimo.

2.2.2.2 Mapa de la Cadena de Valor del Estado Futuro o Ideal.

La finalidad del mapa de la cadena de valor es poner en relieve las fuentes de desperdicio y eliminarlas poniendo en marcha en un plazo breve una cadena de valor basada en el mapa del estado futuro. El objetivo del ejercicio es crear una cadena de producción en la que los procesos estén encadenados a uno o varios clientes mediante un flujo continuo o estableciendo un sistema de flujo jalado y que cada proceso fabrique en la medida de lo posible, solamente lo que sus clientes necesitan y cuando lo necesitan.

En una cadena de valor, el desperdicio es resultado de la producción excesiva, la utilización de maquinaria y de la realización a distancia ciertas actividades. Estas características del estado actual no se pueden cambiar de inmediato, a menos que se trate del lanzamiento de un nuevo producto, en la primera versión del mapa del estado futuro de la cadena de valor se debe tener en cuenta los diseños de los productos, las tecnologías de los procesos y la ubicación física de los procesos en la planta, y eliminar de inmediato las fuentes de desperdicio ajenas a estas características.

Una cadena de valor de un estado futuro o ideal con características esbeltas debe considerar ciertos criterios para poder fungir como una cadena de valor esbelta. Estos criterios están basados en la Manufactura Esbelta, teniendo como objetivo primordial reducir los desperdicios para de esta forma reducir el tiempo de ciclo de los procesos. Los criterios que se mencionan son:

- Adaptar el Takt Time como un ritmo de producción.
- Crear un flujo continuo entre estaciones.
- Utilizar un sistema Kanban para controlar la producción.
- Insertar la programación del cliente en una solo proceso de producción.
- Nivelar la producción por día.

- Nivelar el volumen de producción en pequeñas cantidades.
- Realizar las mejoras necesarias a los procesos para garantizar un flujo efectivo en la cadena de valor.

Estos criterios solo se mencionan en este caso ya que no depende de esta investigación desarrollar cada uno de ellos, para ampliar esta información y tener un mayor entendimiento de estos criterios se recomienda la lectura del manual "Aprender a Observar" de Rother y Shook.

2.2.2.3 El Mapa de la Cadena de Valor desde un Enfoque Físico.

El mapa de la cadena de valor tanto del estado actual como del estado futuro o ideal, es una herramienta útil para comenzar el proceso esbelto, como lo describe Womack dentro del *Pensamiento Esbelto*, el segundo punto de este pensamiento se refiere a deducir la cadena de valor, pero de éste se relacionan los siguientes pasos, definir el flujo, jalar la producción y buscar la perfección. Por lo cual el mapa de la cadena de valor es el punto clave para comenzar un proceso de producción esbelto.

Más aún este proceso no es un proceso sencillo, se debe conocer a fondo el proceso de producción actual para poder identificar las causas originales de desperdicio, para así atacarlas y eliminarlas, de lo contrario se estarán haciendo esfuerzos para eliminar síntomas más no causas.

Teniendo un mapa de la cadena de valor del estado actual, se pueden realizar los cambios pertinentes según el proceso de una cadena de valor esbelta, para obtener una cadena de valor de un estado ideal.

Esta actividad de plasmar el proceso de producción en un mapa de una cadena de valor, es un proceso al cual se puede enriquecer si se utilizan conceptos de

otras metodologías, de manera de obtener un mapa de la cadena de valor mejorado y fundamentado. Es decir, si se complementa lo descrito por Womack, Jones, Rother y Shook, con los conceptos de Hopp y Spearman de la *Física de la Fábrica*, se puede generar un proceso de transformación muy basto que llevará a un estado esbelto fortalecido y sustentado en bases sólidas, el cual será una conjunción de conocimientos e ideas que reflejan un objetivo común, eliminar el desperdicio.

El proceso de generación de un mapa de la cadena de valor del estado actual, sería un proceso subutilizado si no se realiza un benchmarking interno del sistema, es decir, al obtener los datos necesarios para trazar un mapa del estado actual de la cadena valor, estos datos se pueden ocupar para desarrollar los escenarios del sistema, resaltando el escenario del mejor caso, el peor caso y el peor caso práctico contra el estado actual del sistema.

Este primer punto nos da una idea de la situación actual del sistema destacando las oportunidades de mejora que se tienen, si el sistema actual está por debajo del peor caso práctico se tiene un sistema con amplias oportunidades de mejora, de lo contrario el sistema radica en un estado no muy complicado por lo que cualquier variación positiva en el proceso nos dará un resultado positivo. Este benchmarking interno proporciona una idea del funcionamiento del proceso más no indica la manera de cómo mejorarlo, para eso se utilizan los conceptos de una cadena de valor esbelta, así como las leyes de la *Física de la Fábrica* que ayudarán a eliminar el desperdicio causante de los problemas dentro de la planta.

Un concepto del cual no soy partícipe es el que se afirme que el exceso de producción es el causante de todo el desperdicio generando en la línea de producción. La sobre producción no es la única culpable de todos los problemas de la planta, como lo manejan Rother y Shook, más aún existen situaciones internas del proceso que causan, conjunto con la sobreproducción, el desperdicio

del cual se está tratando de eliminar del proceso. Cabe señalar que en ningún momento del manual *Learning to See* se maneja el término de la variabilidad intrínseca en cualquier proceso de manufactura. La variabilidad de los procesos es cualquier cosa que causa que dichos procesos se salgan del comportamiento regular que se ha predicho.

El hecho de reconocer que existe una variabilidad natural de los proceso da pie a buscar la variabilidad efectiva de estos, la cual es la mayor causante de los retrasos en los tiempos de entrega, la acumulación de material y las largas colas que se apilan en algunas estaciones de trabajo. El medir y controlar esta variabilidad proporciona una herramienta eficaz para obtener un menor tiempo de procesamiento y controlar de esta forma el sistema de producción.

De igual forma es necesario reconocer que existen procesos abiertos y cerrados de los cuales sus parámetros varían en la forma de medición y control, las propuestas que se hacen para el trazo de una cadena de valor esbelta pueden variar según la configuración del proceso, así como reconocer el tipo de fallas que se originan en las estaciones de trabajo, de esta forma se pueden manejar de una manera más objetiva y más profunda para poder atacarlas y solucionarlas al momento de planear y trazar el mapa de la cadena de valor de un estado futuro o ideal.

Un concepto del cual no se profundizo dentro de la metodología de Rother y Shook es el concepto de la utilización de las estaciones de trabajo, el cual está directamente relacionado con el tiempo efectivo del proceso y la tasa de llegadas de las piezas a la estación. De este concepto de utilización parten muchos otros parámetros que son cuantificables y útiles para el desarrollo de los sistemas, como lo es el caso del tiempo de ciclo, el tiempo en cola y el número de piezas esperando en cola.

De hecho un punto del cual si se estableció como un causante de los tiempos prolongados de la entrega de productos, y que concuerda con la *Física de la Fábrica*, es el hecho que la mayor parte de los tiempos de entrega es causado por el largo tiempo que las piezas esperan en cola para ser procesados. Cabe señalar que el tiempo que agrega valor a los productos representa de un 5 a un 10% del tiempo total del plazo de entrega, el otro 90% es ocupado en el tiempo en espera que las piezas hacen durante toda la cadena de valor. Este punto es un hecho tangible y es por el cual se debe controlar el tiempo que las piezas esperan en cola para poder hacer una disminución de éste parámetro que representa un punto clave de una cadena de valor esbelta.

Se considera necesario que al utilizar estos parámetros dentro de la cadena de valor, se pueda utilizar la Ecuación Kingman para procesos abiertos o el algoritmo del Análisis del Valor Medio para procesos cerrados y de esta forma calcular el tiempo de procesamiento efectivo de las piezas producidas de una línea en la planta. Así se complementa la cadena de valor tanto para el estado actual como para el estado futuro con datos basados en ecuaciones concretas que proporcionan cierta seguridad en las mejoras aplicadas.

Manejar el Takt Time como una referencia es un buen punto, más aún es indispensable conocer el tiempo total efectivo de los procesos, de hecho es congruente adaptar el ritmo de producción según lo indica el Takt Time ya que de esta forma se está tomando en cuenta las necesidades del cliente sobre cualquier otra cosa, ya que es el cliente quien debe dar el disparo de la producción para fabricar solo lo que el cliente desea, a la hora que el cliente desea y en la cantidad que el cliente necesite.

Para los procesos con un sistema Kanban es necesario conocer el efecto del bloqueo que afectan a los procesos anteriores, ya que cuando el buffer se ha llenado y el proceso de adelante no ha tomado ninguna pieza del buffer, el

proceso anterior tiene que detener la producción esperando que se origine una tarjeta Kanban de producción para poder reiniciar las operaciones.

La nivelación de la producción, la cual marcan Rother y Shook como una pieza clave para desarrollar una cadena de valor esbelta, es una característica muy importante de la cadena de valor, esta nivelación se debe efectuar en todos los sistemas de producción, para de este modo trabajar en lotes pequeños los cuales son más fáciles de manejar y de controlar. Esta nivelación propuesta en la cadena de valor, de igual forma es complementada si se analiza el tamaño de lote mínimo, el cual depende directamente de la tasa de llegadas y del tiempo de procesamiento de una pieza. De esta forma se obtiene una base sustentada para reducir el tamaño de lotes a un número dado dentro de la cadena de valor.

Al conjuntar todos estos conceptos en una cadena de valor enriquecida, el resultado claramente vislumbra una cadena de valor con un proceso de producción esbelto, en el cual se ha eliminado las causas del desperdicio y por consiguiente las causas de una sobreproducción, por lo que los tiempos de entrega se reducen considerablemente.

Se propone firmemente que antes de hacer algún cambio al estado actual, éste haya sido simulado en paquetes computacionales o en hojas de cálculo de manera de comprobar que el comportamiento del sistema es el que se refleja en la simulación, y realizar los cambios propuestos en la cadena de valor del estado futuro primeramente en la simulación de un estado futuro, mediante esta actividad se puede tener una cierta idea de los resultados de las mejoras que se implementaron en el nuevo mapa de la cadena de valor.

Al tener resultados positivos de una simulación del estado futuro, basados en una cadena de valor de un estado ideal esbelto y fundamentados en las leyes de la Física de la Fábrica resulta una propuesta más sólida tanto para convencer a

los empleados del cambio que se va a implementar como a la alta gerencia quienes son los responsables de observar toda la cadena de valor con una visión mejorada y esbelta para continuar mejorándola en lo futuro.

En conclusión se debe reconocer que para ser competitiva la cadena de valor tiene que fluir de tal manera que sirva al cliente con el menor tiempo de entrega posible, el menor costo, la más alta calidad y la expedición más fiable. No obstante al hacer los cambios técnicos, surgirá también la necesidad de que los responsables de la cadena de valor evolucionen en conjunto con la búsqueda de la perfección.

En la parte de Anexos de esta tesis se encuentra un ejemplo de la cadena de valor del estado actual y su transformación al estado futuro, este ejemplo lo proporcionó Rother y Shook dentro del manual *Learning to See* para dar una idea de lo que es un mapa de la cadena de valor.

Las cadenas de valor esbeltas deben desarrollarse conservando el respeto por la gente. Pero el respeto por la gente no debe confundirse con el respeto por las costumbres antiguas y obsoletas. Establecer una cadena de valor esbelta es un trabajo difícil, que a menudo consiste en dar un paso hacia atrás por dos que se han dado hacia delante. El desarrollo de una cadena de valor esbelta expone las causas de desperdicio, lo que significa que la gente en todas las funciones de la empresa tal vez tenga que cambiar sus hábitos.

Todas las personas involucradas en la cadena de valor, tanto los empleados como la alta gerencia, tienen una función que desempeñar en la puesta en práctica de una cadena de valor esbelta y todos deben comprender que este cambio es un cambio necesario para beneficio de todos los involucrados en la planta. Estos beneficios pueden presentarse en varias formas, como una mayor competitividad de la empresa en el mercado, tanto nacional como internacional, un mejor

ambiente de trabajo, mayor confianza entre la gerencia y los empleados y lo que no es menos importante, la sensación de saber que se ha cumplido con las necesidades del cliente y que se han rebasado las expectativas de éste.

Siempre que hay un producto para un cliente, hay una cadena de valor, el desafío consiste en verla y mejorarla cada día.

2.2.3 La Manufactura Esbelta y la Física de la Fábrica.

Las empresas manufactureras tienen un objetivo común, como lo describe Eliyahu Goldratt en su libro "*La Meta*", hacer dinero es lo primordial en todas las corporaciones, para lograr este objetivo existen medidas de desarrollo potencial como lo son throughput, inventario, servicio al cliente y calidad. La Física de la Fábrica y la Manufactura Esbelta están basadas en el mejoramiento de estas mediciones, la Manufactura Esbelta desarrolla una mejora global de toda la compañía, mientras que la Física de la Fábrica plantea sus objetivos en la parte central de la producción, en las estaciones de trabajo y las líneas de producción. Es ahí donde radica que ambas metodologías se complementan para lograr un objetivo común, el cual puede ser el de eliminar el desperdicio o también reducir la variabilidad de los procesos, y en este caso se considera la variabilidad como una fuente de desperdicio.

Cuando no se tiene un verdadero conocimiento de las relaciones entre inventario, tiempo de ciclo y variabilidad, las cuales gobiernan todas las operaciones de negocios en una compañía, los resultados pueden ser desastrosos. Tratando de reducir el tiempo de ciclo se aumenta la utilización, reduciendo el inventario en proceso se incrementa el throughput causando serios problemas en el funcionamiento de la planta. Cuando se comprenden estas relaciones se puede obtener un alto throughput con un nivel de inventario bajo, una alta utilización y un alto nivel de servicio al cliente con tiempos de ciclo cortos, siendo estos

objetivos las metas que se plantean al desarrollar un sistema *Lean Physics* [Spearman, 2002].

2.3 La Física de la Fábrica.

La Física de la Fábrica, es un sistema desarrollado en *Northwestern University* por Hopp y Spearman [Hopp & Spearman, 2001], como una descripción comprensiva de las relaciones que gobiernan el ambiente de las operaciones en las empresas manufactureras. La Física de la Fábrica se refiere a una descripción sistemática que subraya el comportamiento de los sistemas de manufactura. El comprender el funcionamiento de este sistema, proporciona a los gerentes e ingenieros la facilidad de trabajar con las tendencias naturales de los sistemas de manufactura, ayudándolos a identificar oportunidades de mejora, diseñando nuevos y efectivos sistemas y haciendo los cambios necesarios para coordinar las áreas fuera de control [Página Web 3].

Dentro de la Física de la Fábrica se establecen relaciones fundamentales entre inventario, tiempo de ciclo, capacidad y variabilidad que gobiernan la manera de operar de las empresas. Muy a menudo, las decisiones que son tomadas sin entender estas relaciones provocan resultados completamente diferentes a los deseados, tratar de disminuir el tiempo de ciclo mientras se incrementa la utilización de las máquinas puede resultar en un desastre. Reducir los niveles de inventario en proceso tratando de incrementar la razón de producción (throughput) puede causar un serio problema de desempeño. Al mismo tiempo, el efecto de la variabilidad sobre la capacidad es típicamente no muy bien comprendido, por lo tanto la mayoría de los ingenieros están de acuerdo que una alta ganancia es buena a pesar de todos los procesos que se pierdan tratando de obtener una alta utilidad.

2.3.1 Definición de un Sistema de Manufactura.

Un Sistema de Manufactura es una red de procesos con un objetivo orientado a través del cual las piezas fluyen. Generalmente todos los Sistemas de Manufactura tienen un objetivo, éste puede ser el de ganar dinero, lo cual es completamente aceptable y comprensible, pero definir un objetivo requiere de cierto cuidado y profundidad, no solo proponer sueños sin ningún fundamento. El Sistema de Manufactura se compone de procesos ya sea cortado, maquinado, torneado, etc. Así como procesos que soportan la dirección de la manufactura como las órdenes de entrada, embarque, mantenimiento, etc. Dentro de los Sistemas de Manufactura fluyen entidades, las cuales no solo son piezas, sino también información utilizada para el control del sistema. El flujo de las entidades a través del sistema describe la manera en la que los materiales y la información son procesados. De esta forma es importante reconocer que un Sistema de Manufactura es una red de partes interactuando.

Todo Sistema de Manufactura se basa en la búsqueda de altas utilidades, para alcanzar esta meta se requieren ya sea bajos costos o una alta capacidad de producción que también se puede denominar como ventas altas. Tener un bajo costo requiere un costo bajo de unidad, el cual necesita una alta capacidad de producción, una alta utilización de las máquinas y un bajo nivel de inventario. Es necesario contar con una muy baja variabilidad de producción para desarrollar la alta capacidad de producción y el bajo nivel de inventario. La otra alternativa de alcanzar utilidades altas es con ventas altas, las cuales requieren de un alto índice calidad en los productos así como un alto nivel de servicio al cliente, de manera que el cliente se encuentre satisfecho con dicho producto. El utilizar un alto nivel de servicio a cliente requiere de respuestas rápidas y una gran variedad de productos, cualquier cosa que el cliente desee. Para una respuesta rápida es necesario un tiempo de ciclo corto, baja utilización del equipo y un alto nivel de inventario. Una alta calidad en el producto necesita de una variabilidad

muy baja en el proceso y de un tiempo de ciclo corto que sirva para localizar defectos cuando éstos ocurran. En la figura 2.3 se muestra el objetivo de un Sistema de Manufactura de una forma esquemática.

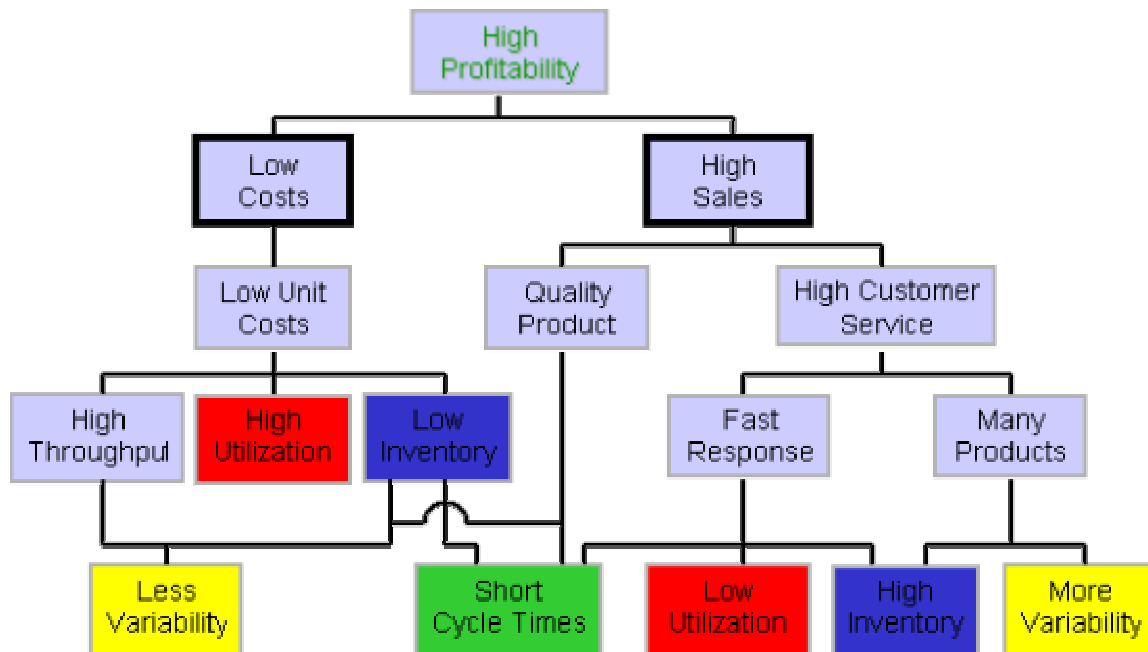


Figura 2.3 Objetivos de un Sistema de Manufactura [Hopp & Spearman 2001].

De aquí se puede observar que existen varios conflictos, se requiere de un alto inventario para respuestas rápidas, pero se necesita un inventario bajo para obtener bajos costos. Se necesita una alta utilización para mantener un costo bajo, pero se necesita de una utilización baja para un buen nivel de respuesta rápida. Se quiere más variabilidad para una gran variedad de productos, pero se quiere que esta variabilidad sea baja para mantener un nivel de inventario bajo y una capacidad de producción alta. En estos sistemas no hay muchas opciones, siempre se tiene que sacrificar algo para resolver un cierto conflicto. Lo único que podemos rescatar de este análisis es que para ambos casos un tiempo de ciclo corto es fundamental.

Para poder alcanzar los objetivos en un Sistema de Manufactura, es importante contar con un amplio sistema de control de manera de que se puedan orquestar todos los elementos para orientarlos hacia dicho objetivo. El diseño del producto, el diseño de las facilidades, el mantenimiento del equipo, el horario de trabajo, la programación de la producción, las políticas del personal y muchas otras áreas donde se presenta la oportunidad de controlar el Sistema de Manufactura.

Una forma de controlar un Sistema de Manufactura obteniendo un buen y estable regreso sobre la inversión es manejando tres aspectos básicos: información, control e inventarios. La información envuelve lo que es conocido acerca del sistema, el control maneja las políticas de operación que afectan el comportamiento del sistema y el inventario se basa en una protección contra la variabilidad que pueda afectar al sistema. Estos tres componentes deben ser administrados juntos para obtener un efectivo funcionamiento del sistema en general. En caso de que uno de estos componentes falle, éste debe ser compensado por una combinación de los otros dos componentes, como lo es un mayor control en la asignación de entregas o un inventario de seguridad de mayor capacidad que no afecte al sistema, solo por mencionar un ejemplo de dicha combinación.

2.3.2 Definiciones y Parámetros de un Sistema de Manufactura.

En el método científico se requiere de una cierta terminología, por lo cual es necesario dejar en claro los términos que comúnmente se emplean en los Sistemas de Manufactura, de manera que no existan problemas de comunicación entre ingenieros y gerentes de una misma empresa o de empresas diferentes, así mismo que no haya lugar a discrepancias entre los términos que ocupan los diferentes autores.

En este caso nos estamos enfocando en el comportamiento de líneas de producción ya que éstas son las ligas entre los procesos individuales y la empresa en su totalidad. Las definiciones que se ocuparán son las que abajo se mencionan:

Estación de Trabajo: Es una colección de una o más máquinas o de trabajos manuales que desarrollan funciones idénticas. En layouts orientados al proceso, las estaciones de trabajo están organizadas de acuerdo a la función que desempeñan, a diferencia de los layouts orientados a proceso donde éstas están organizadas en líneas de producción que trabajan en un producto específico.

Parte: Se refiere a una pieza de materia prima, un componente, un subensamble o un ensamble que es trabajado en una estación de trabajo dentro de una planta. La materia prima son partes compradas por empresas externas. Los componentes se refieren a piezas individuales que se ensamblan en productos complejos.

Producto Terminado: Parte que es vendida directamente al cliente.

Consumible: Materiales ocupados en el proceso de transformación de la materia prima en un producto terminado sin formar parte de éste.

Ruta: Secuencia de estaciones de trabajo necesarias para formar una parte.

Orden: Requerimiento de un cliente por un número particular de partes, en una cierta cantidad y en una fecha establecida.

Throughput (TH): Se refiere a la cantidad promedio de partes buenas que se producen por unidad de tiempo. Throughput es también definido como la producción por unidad de tiempo que es vendida.

Capacidad: Es el límite superior del Throughput de un proceso de producción. Utilizar una capacidad igual o mayor a uno provoca un sistema inestable.

Trabajo en Proceso (WIP): Inventario existente entre el punto de inicio y el punto final de una ruta de un producto.

Tiempo de Ciclo (CT): Tiempo promedio entre la liberación de un trabajo a la ruta y el final de ésta ya cuando termina como producto terminado.

Tiempo de Entrega: Tiempo asignado para la producción de una parte en una ruta o línea de producción.

Utilización: La utilización de una estación de trabajo es la fracción de tiempo que no esta ociosa, esta incluye el tiempo en el que la estación esta trabajando en una parte o esta inhabilitada debido a una falla, un set up, u otro detractor y tiene trabajo en cola. La utilización se define como la razón de la tasa de llegadas sobre la tasa efectiva de producción.

Los parámetros son descripciones numéricas de los procesos de manufactura y por lo tanto varían dependiendo de la empresa. Los parámetros que se ocupan para definir el comportamiento de la línea son:

Tasa de Cuello de Botella (r_b): Se refiere a la tasa en partes por unidad de tiempo de la estación que tiene la mayor utilización, o la estación con menor capacidad de producción.

Tiempo de Proceso Neto (T_o): Es la suma de los tiempos promedios de proceso de cada estación en una línea. También se puede considerar al tiempo promedio que le toma a una pieza pasar por toda la línea de producción sin tener que hacer esperas en cola.

WIP Crítico (W_o): El nivel de WIP de una línea de producción con ciertos valores de tasa de cuello de botella y de tiempo de proceso neto. Esta es una relación en la que se obtiene el trabajo en proceso crítico con el máximo throughput y con el mínimo tiempo de ciclo representados de la siguiente forma:

$$W_o = r_b T_o$$

Ley de Little: Esta es una interesante y fundamental relación entre WIP, CT y TH donde para cada nivel de WIP, éste es igual al producto del throughput y el tiempo de ciclo. Esta relación fue demostrada matemáticamente por John D.C. Little y es la base fundamental de la Física de la Fábrica.

$$WIP = TH \times CT$$

La Ley de Little puede ser aplicada para una cierta estación, una línea de producción o para una planta en su totalidad. Esta relación puede ser utilizada para diferentes situaciones como lo son:

- Cálculo de la longitud de la cola para una estación individual.
- Reducción del tiempo de ciclo, al reducir el tiempo de ciclo se reduce el WIP siempre y cuando TH permanezca constante, este concepto es aplicable cuando se tienen colas largas en las estaciones de trabajo.
- Medición del tiempo de ciclo, despejando de la Ley de Little se puede conocer el tiempo de ciclo de un proceso si se cuenta con el WIP y el TH.
- Planeación de inventario, en ciertos casos donde las ordenes se terminan antes de la fecha de entrega, los clientes se niegan a recibirlas por lo que hay que guardarlas en el inventario de productos terminados.

2.3.3 Relaciones Simples entre Parámetros.

En el siguiente tema se identifican los posibles comportamientos de los procesos de manufactura. Esto ayuda a pulir una intuición sobre cómo las líneas están trabajando y así poder tener una base para comparar los procesos con otros procesos similares, ya sea internos o externos a la compañía. Un problema del cual se caracterizan estas relaciones simples es que en un sistema real tanto el WIP como el TH tienden a variar simultáneamente.

Las siguientes relaciones sirven para identificar el cómo se desenvuelven los sistemas de manufactura, existen tres formas de referencia de los sistemas, los cuales se describen a continuación.

2.3.3.1 Desarrollo del Mejor Caso.

En el Mejor Caso de un sistema de manufactura, se aplica la Ley de Little como una relación básica entre el WIP y el tiempo de ciclo donde se indica el máximo throughput y el mínimo tiempo de ciclo para un nivel de WIP dado utilizando los parámetros de tasa de cuello de botella y tiempo de procesamiento neto. Por lo que para el tiempo mínimo de ciclo se define como:

$$CT_{mejor} = \begin{cases} T_o \rightarrow w \leq W_o \\ \frac{w}{r_b} \rightarrow \text{En otro caso} \end{cases}$$

Para el máximo throughput con un nivel de WIP dado, la relación resulta por:

$$TH_{mejor} = \begin{cases} \frac{w}{T_o} \rightarrow w \leq W_o \\ r_b \rightarrow \text{En otro caso} \end{cases}$$

2.3.3.2 Desarrollo del Peor Caso.

Ya se consideró el mejor caso de comportamiento que puede ocurrir en una línea de producción, el siguiente paso es considerar el peor caso de esta misma línea buscando un máximo de tiempo ciclo y un mínimo de throughput considerando los parámetros de tasa de cuello de botella y tiempo neto de procesamiento.

Cabe señalar que si una línea de producción está más cerca del peor caso que del mejor caso, entonces existen muchas oportunidades de mejora al tener un gran número de problemas, dependiendo de la perspectiva con la cual se quiera analizar el caso.

Para realizar el comportamiento del peor caso de de una línea de producción se utilizó tiempo de espera en cada estación, por lo que siempre existía un trabajo en proceso y varios trabajos esperando en cola. El resultado del peor caso para el tiempo de ciclo con un nivel de WIP dado es:

$$CT_{peor} = w \times T_o$$

El throughput en el peor caso para un nivel de WIP dado es:

$$TH_{peor} = \frac{1}{T_o}.$$

2.3.3.3 Desarrollo del Peor Caso Práctico (PWC).

En un proceso real, es muy difícil encontrar comportamientos como el del mejor caso y del peor caso, por lo tanto se ha considerado un caso intermedio de entre estos dos, denotando así el peor caso práctico. Se expresó de esta forma este

caso ya que virtualmente si un sistema real desarrolla un comportamiento por debajo del peor caso práctico tiene muchas oportunidades de mejora.

Para entender cómo el peor caso práctico trabaja se supone una línea de producción donde existen un N número de estaciones de trabajo, cada una con un tiempo de proceso promedio t y un nivel constante de trabajos en la línea w . Por lo que para este caso el tiempo neto de procesamiento está definido por $T_o = Nt$ y la tasa de cuello de botella es $r_b = 1/t$.

Por lo tanto, el tiempo promedio de una estación será el tiempo para complementar el proceso de los otros trabajos más el tiempo para procesar el trabajo en turno.

De esta forma se define que para el tiempo de ciclo del peor caso práctico de un nivel de WIP dado es:

$$CT_{PWC} = T_o + \frac{w-1}{r_b}$$

El throughput del peor caso práctico para un nivel de WIP dado es:

$$TH_{PWC} = \frac{w}{W_o + w - 1} r_b$$

El comportamiento de este caso es razonable para ambos extremos, niveles bajos y altos de WIP. En un extremo, cuando solo existe un trabajo en el sistema, $w = 1$, el tiempo de ciclo se convierte en el tiempo de proceso neto, y en el otro extremo cuando los niveles de WIP tienden a infinito, el throughput se aproxima a la capacidad del cuello de botella, mientras que el tiempo de ciclo se incrementa sin ningún obstáculo. Es por ello que el throughput y el tiempo de

ciclo del peor caso práctico siempre están entre el mejor y el peor caso, y así se provee un punto medio que se aproxima al comportamiento de un sistema real.

Para ejemplificar mejor los casos que definen el comportamiento de un sistema, se utilizan gráficas para ciertos niveles de WIP. Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran dichas gráficas, la primera muestra la gráfica del comportamiento del throughput con un nivel de WIP dado, la segunda muestra el tiempo de ciclo versus el nivel de WIP.

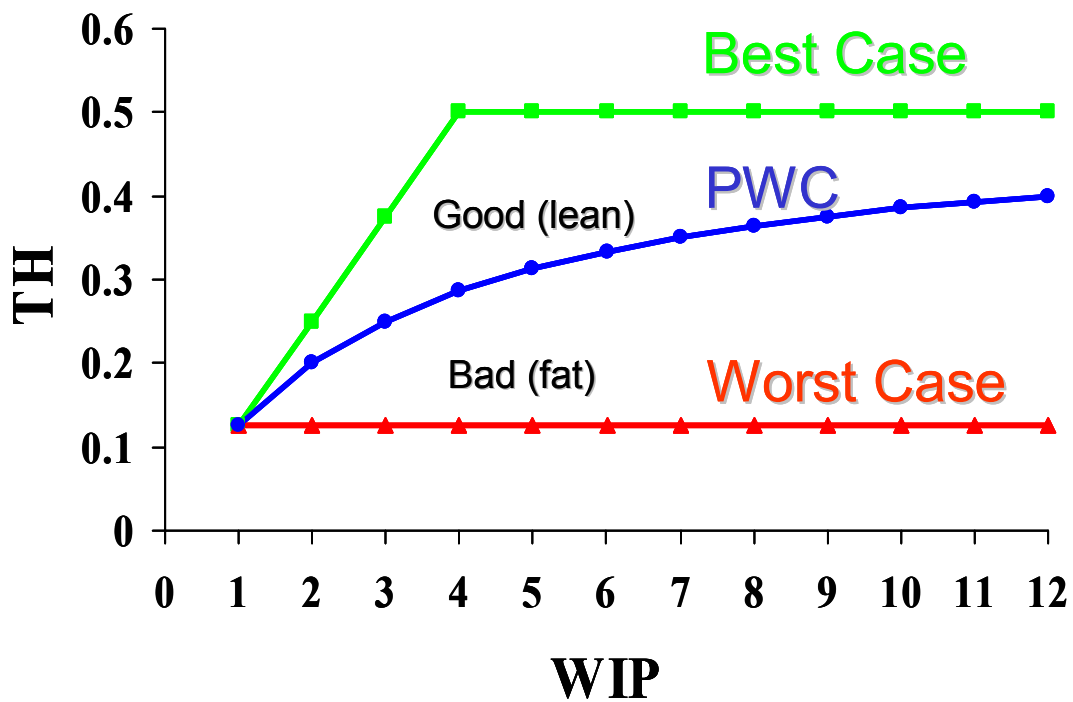


Figura 2.4 Gráfica del comportamiento de un Sistema de Manufactura TH Vs WIP [Hopp & Spearman 2001].

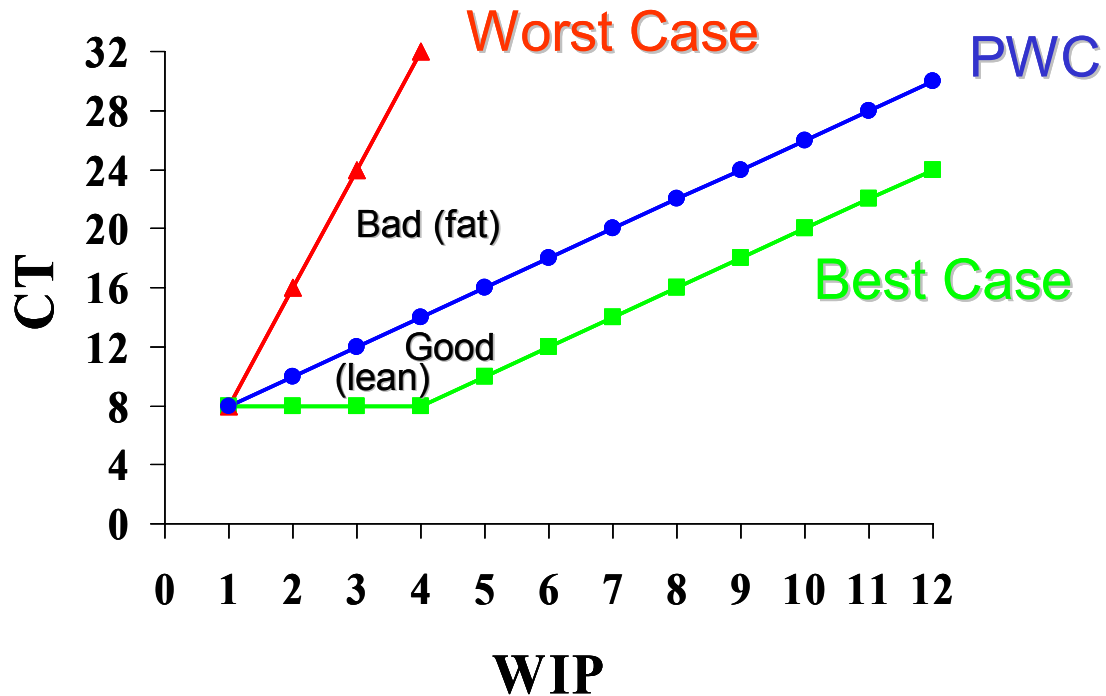


Figura 2.5 Gráfica del comportamiento de un Sistema de Manufactura CT Vs. WIP
[Hopp & Spearman 2001].

De estas gráficas podemos denotar ciertas regiones especificadas, donde los sistemas con un mejor desempeño que el Peor Caso Práctico, con un alto nivel de throughput y mínimo tiempo de ciclo son sistemas buenos considerados esbeltos, aquellos que recaen sobre la región mala o que tienen un comportamiento peor al PWC son considerados sistemas con un gran nivel de oportunidades de mejora.

2.3.4 Principios Básicos de la Variabilidad.

Como se mencionó anteriormente, la ley de Little ($TH=CT/WIP$) implica que es posible obtener el mismo nivel de throughput con largos tiempos de ciclo y grandes niveles de WIP, o con cortos tiempos de ciclo y pequeños niveles de inventario en proceso. Claro que es preferible manejar tiempos de ciclo corto con pequeños niveles de inventario en proceso, pero ¿en donde radica la diferencia

ante estas dos situaciones?, la respuesta es simple, en la variabilidad de los procesos.

La variabilidad existe en todos los sistemas de producción y tiene un gran impacto en el desarrollo de dichos sistemas; variabilidad se define como la calidad de disparidad de una clase de productos, aunque también se define como cualquier cosa que cause que el sistema de producción salga del comportamiento regular predicho. Es por ello que entender, medir, y manejar la variabilidad es una actividad crítica para una efectiva administración de la manufactura.

Para hacer un análisis efectivo de la variabilidad es necesario cuantificarla mediante mediciones estadísticas estándar que definen una cierta clase de variabilidad. La varianza (σ^2) es una medida de variabilidad absoluta, así como lo es la desviación estándar, la raíz cuadrada de la varianza. Una medida razonable y relativa de la variabilidad de una variable cualquiera es la desviación estándar dividida por la media, la cual se conoce como coeficiente de variación (CV). En este caso podemos citar a la media como t ya que las variables que se están considerando son variables de tiempo.

$$c = \frac{\sigma}{t}$$

En la mayoría de los casos este coeficiente también es conocido como coeficiente cuadrado de variación (SCV) siempre y cuando todos sus parámetros sean elevados al cuadrado. Una variable aleatoria tiene una baja variabilidad cuando su coeficiente de variación es menor a 0.75, se considera de variabilidad moderada o media, cuando su coeficiente de variación oscila entre 0.75 y 1.33, y es de alta variabilidad cuando dicho coeficiente es mayor a 1.33, como lo indica la siguiente tabla.

Clase de Variabilidad	Coefficiente de Variación	Situación Típica
Variabilidad Baja	$c < 0.75$	Tiempo de proceso sin fallas.
Variabilidad Moderada	$0.75 \leq c \leq 1.33$	Tiempo de proceso con ajustes cortos (Set up).
Variabilidad Alta	$c \geq 1.33$	Tiempo de proceso con largos tiempos de falla.

Tabla 2.2 Clases de Variabilidad [Hopp & Spearman 2001].

Cabe señalar, que mientras más grande sea la variabilidad de un tiempo efectivo de proceso, mayor será el promedio del tiempo en cola o del número de piezas en cola. Conociendo la Ley de Little implica que con mayor variabilidad, mucho mayor será el tiempo de ciclo.

2.3.4.1 Causas de la Variabilidad.

Para identificar las estrategias más óptimas de controlar la variabilidad de los sistemas de producción es importante primeramente conocer que causa dicha variabilidad. Las causas más comunes de variabilidad son:

- Variabilidad Natural, aquella que incluye la menor de las fluctuaciones en el proceso debido a diferencias en el operador, maquina o material.
- Paros aleatorios del sistema de producción.
- Tiempo de preparación o cambios de herramienta.
- Disponibilidad del operador.
- Retrabajo.
- Fallas de máquinas.
- Manejo de material.
- Variedad de productos.

La variabilidad natural, es la variabilidad inherente en el tiempo de proceso natural, el cual excluye paros aleatorios, tiempos de preparación, o cualquier otra causa externa. Se denomina t_o y σ_o como la media y la desviación estándar natural de cualquier proceso. Por lo tanto se puede expresar el coeficiente de variación natural como:

$$c_o = \frac{\sigma_o}{t_o}$$

En la mayoría de los sistemas el tiempo de proceso natural es considerado como una baja variabilidad, por lo que $c_o < 0.75$. En un sistema de producción real, las estaciones de trabajo están sujetas a varios detractores, incluyendo el tiempo muerto de las máquinas, tiempo de preparación, indisponibilidad del operador, etc. Estos detractores sirven para inflar la media y la desviación estándar del tiempo efectivo de procesamiento.

Existen fallas (Preemptive Outages) que suceden cuando no se esperan, fallas que afectan el desempeño de los procesos y son dependientes del tiempo, estas fallas suceden cuando ocurre un error en el sistema de producción y éste tiene que detenerse, estas fallas ocurren aleatoriamente se quieran o no, estos tipos de fallas son por ejemplo: caídas del sistema eléctrico, cuando el operario sale de emergencia a una llamada, o cuando los consumibles se agotaron y es necesario recargarlos para continuar con el proceso.

La mayoría de las herramientas para definir la capacidad planeada utilizada en la industria dependen de la disponibilidad de las máquinas o estaciones de trabajo, esta disponibilidad está definida por tiempo medio entre fallas (MTTF) m_f y el tiempo medio entre reparaciones (MTTR) m_r de la siguiente forma:

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r}$$

Para conocer el tiempo medio de proceso efectivo, es necesario dividir el tiempo de proceso natural entre la disponibilidad calculada.

$$t_e = \frac{t_o}{A}$$

La capacidad efectiva de una estación de trabajo está definida por la división del número de máquinas en la estación (m) sobre el tiempo medio de proceso efectivo.

$$r_e = \frac{m}{t_e} = A \frac{m}{t_o}$$

El coeficiente cuadrado de variación del tiempo efectivo de procesamiento depende del tiempo medio de proceso y de la disponibilidad, así como de la desviación estándar del tiempo de reparación σ_r , por lo que $c_r = \sigma_r/m_r$ es decir:

$$\sigma_e^2 = \left(\frac{\sigma_o}{A}\right)^2 + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_o}{Am_r}$$

$$c_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2} = c_o^2 + (1 + c_r^2)A(1-A)\frac{m_r}{t_o}$$

El primer término de la ecuación del coeficiente cuadrado de variación es debido a la variación natural del proceso, el segundo se refiere a los paros aleatorios que tiene el sistema de producción y de la variabilidad de los tiempos de reparación. Largos tiempos de reparación inducen a mayor variabilidad.

Este análisis nos lleva a la conclusión que una máquina con frecuentes pero cortos paros es preferible a una máquina con infrecuentes y largos paros, a pesar que en ambos casos la disponibilidad es la misma.

Otro tipo de falla (Nonpreemptive Outages) es la que es originada por la variabilidad dependiente del número de partes producidas, los paros del sistema se realizan bajo control exactamente cuando se necesitan. En contraste con el anterior tipo de fallas, las cuales causaban fallas catastróficas que provocaban un paro del sistema mientras se procesaba un trabajo. Un ejemplo de fallas dependientes del número de partes producidas ocurre cuando una herramienta comienza gastarse y es necesario reemplazarla por una nueva. En situaciones así se puede esperar a que se termine la pieza que se está procesando para hacer el reemplazo sin tener que parar la producción.

Los tiempos de preparación o cambio de herramientas son considerados como fallas dependientes del número de piezas producidas cuando estos ocurren en cambios del proceso de producción que no tienen que ver con cambios en el producto. Un análisis de capacidad promedio indica que tiempos de preparación cortos son mejores que tiempos de preparación largos, esta indicación se refiere a la herramienta SMED diseñada por el Dr. Shingo en el Sistema de Producción Toyota. Otro tipo de fallas similares a esta son considerados los mantenimientos preventivos, descansos de operarios, juntas, cambios de turnos, etc. Estos cambios o situaciones ocurren entre trabajos, no durante los trabajos.

Los parámetros utilizados para medir la variabilidad dependiente de la cantidad de piezas producidas o debido a tiempos de preparación se basan principalmente en el promedio de las partes procesadas entre tiempos de preparación N_s , donde el tiempo utilizado durante el Set Up es t_s y el coeficiente de variación c_s . Los parámetros presentados son tiempo efectivo de procesamiento, varianza efectiva y el coeficiente cuadrado de procesamiento.

$$t_e = t_o + \frac{t_s}{N_s}$$

$$\sigma_e^2 = \sigma_o^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2$$

$$c_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2}$$

Una mayor fuente de variabilidad en sistemas de manufactura es debida a problemas de calidad cuando se realiza retrabajo en una estación de trabajo. Esto sucede cuando una simple estación de trabajo realiza una tarea y esta es revisada si fue realizada correctamente, si no, la pieza es repetida y se retrabaja. Mayor retrabajo implica mayor variabilidad, más variabilidad causa más congestión, mayor WIP y un mayor tiempo de ciclo. Es por ello que reducir los paros del sistema, el tiempo de Set Up y los retrabajos son actividades necesarias para reducir el desperdicio y poder alcanzar una Manufactura Esbelta.

Situation	Natural	Preemptive	Nonpreemptive
Examples	Reliable Machine	Random Failures	Setups; Rework
Parameters	t_0, c_0^2 (basic)	Basic plus m_f, m_r, c_r^2	Basic plus N_s, t_s, c_s^2
t_e	t_0	$\frac{t_0}{A}, A = \frac{m_f}{m_f + m_r}$	$t_0 + \frac{t_s}{N_s}$
σ_e^2	$t_0^2 c_0^2$	$\frac{\sigma_0^2}{A^2} + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1 - A)t_0}{A m_r}$	$\sigma_0^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2$
c_e^2	c_0^2	$c_0^2 + (1 + c_r^2)A(1 - A) \frac{m_r}{t_0}$	$\frac{\sigma_e^2}{t_e^2}$

Figura 2.6 Resumen de formulas para obtener el tiempo efectivo de proceso, [Hopp & Spearman 2001].

En la Figura 2.6 se resumen las causas posibles de variabilidad y se definen sus parámetros y las formulas para calcular el tiempo efectivo de proceso. En un sistema real en el cual estas causas de variabilidad se combinen en diferentes estaciones de trabajo, se tienen que combinar también estas formulas de manera que se adapten al sistema que se está estudiando.

2.3.4.2 El Flujo de la Variabilidad.

Todos los conceptos discutidos anteriormente se enfocan solamente a estaciones de trabajo individuales, pero la variabilidad de una estación puede afectar el comportamiento de todas las demás estaciones en la línea de producción, esto significa que existe un flujo de la variabilidad. Al mencionar un flujo, se refiere a la transferencia de piezas o trabajos a través del sistema. Es decir si una estación de trabajo tiene una alta variabilidad, las piezas que alimente a otra estación de trabajo presentará también una variabilidad elevada y así se propagará por toda la línea de producción, de este modo la variabilidad fluye a lo largo de todo el sistema.

El punto de inicio del flujo de la variabilidad son las llegadas que tienen las piezas a las estaciones de trabajo, en estaciones subsecuentes en una línea de producción, las salidas de una estación son las llegadas a la otra estación. Por lo consiguiente, si se describe la variabilidad de las llegadas a una estación de trabajo y se determina cómo ésta afecta las salidas de piezas, se puede caracterizar el flujo de la variabilidad en toda la línea.

El primer parámetro que describe las llegadas es la tasa de arribos, el cual es medible en piezas por unidad de tiempo, por lo tanto, las unidades de la tasa de llegadas son las mismas a la de la capacidad del proceso. La tasa promedio de llegadas r_a es caracterizada por el tiempo medio entre arribos t_a , de donde se

denota que $r_a = 1/ t_a$, es decir que el inverso del tiempo entre arribos es la capacidad promedio de llegadas, así como sucede en la capacidad efectiva de proceso. Es importante señalar que para que una estación de trabajo sea capaz de mantener una tasa elevada de llegadas, es necesario que su capacidad de proceso sea mayor a la tasa de llegadas, para de esta forma no saturar la estación de trabajo y tener una sobrecarga.

La variabilidad entre llegadas es cuantificable de la misma forma que se cuantifica el coeficiente cuadrado de variación del proceso. Si σ_a es la desviación estándar del tiempo entre arribos, entonces el coeficiente de variación entre arribos es:

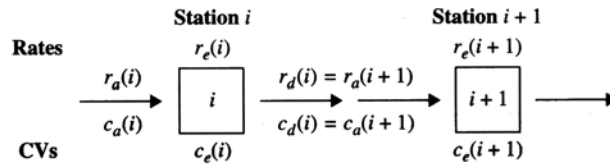
$$c_a = \frac{\sigma_a}{t_a}$$

El siguiente paso es caracterizar las salidas de la estación de trabajo, el tiempo medio entre salidas se denota como t_d y la tasa de salidas es $r_d = 1/ t_d$, de la misma forma que las llegadas el coeficiente de variación entre salidas es c_d . En una línea de producción en serie las salidas de la estación i se convierten en las llegadas a la estación $i+1$, por lo que la tasa de salidas de i debe ser igual a la tasa de arribos de $i+1$, entonces:

$$t_a(i+1) = t_d(i)$$

En una línea de producción en serie sin retrabajo y sin detractores, la tasa de llegadas a cada estación es igual al throughput, así como las salidas de i se convierten en las llegadas a $i+1$, el coeficiente de variación de salidas de la estación i , es el mismo que el coeficiente de variación de arribos de la estación

$i+1$, así como se había mencionado anteriormente. En la siguiente Figura 2.7 se detalla la propagación de la variabilidad para un mejor entendimiento.



*Figura 2.7. Propagación de la variabilidad entre estaciones de trabajo en serie
[Hopp & Spearman 2001].*

La variabilidad de las salidas de una estación de trabajo es el resultado tanto de la variabilidad de llegada así como de la variabilidad del proceso, la real contribución de estos factores depende de la utilización de la estación de trabajo. La utilización u se refiere a la fracción de tiempo en la cual la estación está ocupada a lo largo de una corrida, ésta depende del número de máquinas idénticas en la estación de trabajo.

$$u = \frac{r_a t_e}{m}$$

Se observa que la utilización se incrementa conforme aumentan la tasa de llegadas como el tiempo de proceso efectivo. El límite superior de la utilización de una estación de trabajo es uno, lo equivalente al 100% de utilización, lo cual implica que el tiempo de proceso efectivo debe ser menor a la razón de m/r_a . Si la utilización es cercana a uno, entonces la estación está casi siempre ocupada, por lo que en estas condiciones, los tiempos entre salidas de la estación deben ser esencialmente idénticos al tiempo de proceso, así como el coeficiente de variación de las salidas debe ser igual al coeficiente de variación del proceso.

En otro extremo si la utilización es cercana a cero, la estación de trabajo permanece ociosa gran parte del tiempo, cada vez que un trabajo es terminado, se tiene que esperar un largo tiempo a que otro trabajo llegue a dicha estación. Debido a que el tiempo de proceso es una pequeña fracción entre salidas, el tiempo entre salidas debe ser igual al tiempo de llegadas, por lo que el coeficiente de variación de las llegadas es igual al de las salidas. Para que se cumplan las condiciones mencionadas para ambos extremos se tiene que:

$$c_d^2 = u^2 c_e^2 + (1 - u^2) c_a^2$$

Bajo estas circunstancias, si $u = 1$, entonces $c_d^2 = c_e^2$. De igual forma si $u = 0$ entonces $c_d^2 = c_a^2$. En caso de que se esté trabajando con más de una máquina en la estación de trabajo ($m > 1$), se tiene que:

$$c_d^2 = 1 + (1 - u^2)(c_a^2 - 1) + \frac{u^2}{\sqrt{m}}(c_e^2 - 1)$$

Mediante estas condiciones se establece un flujo de variabilidad a lo largo de toda la línea de producción, ya que como se mencionó anteriormente, la variabilidad de una estación afecta a todas las demás, y de cada estación depende de su variabilidad a las llegadas, en el proceso y en las salidas, por lo que el flujo de dicha variabilidad es un tema muy importante dentro de una corporación.

2.3.4.3 Interacción de la Variabilidad en Colas.

Se ha discutido sobre la variabilidad de tiempo de proceso y del flujo de la variabilidad, ahora se analizará una línea de producción con sus parámetros como lo son WIP, tiempo de ciclo y throughput. El tiempo actual de

procesamiento con sus tiempos de preparación y tiempos muertos representa solo una fracción del tiempo total de ciclo, que puede ser de un 5 o un 10%, la mayor parte del tiempo total de ciclo, se consume en tiempos de espera para varios recursos, como lo pueden ser una estación de trabajo, un transporte, o un operador.

La ciencia de los tiempos de espera en líneas es llamada *Teoría de Colas*, en un sistema de colas se combinan todos los componentes, como lo son: el proceso de llegadas, el proceso de producción o servicio y el tiempo de espera en cola. El proceso de llegadas puede ser individual de pieza por pieza o se puede considerar en llegadas por lotes, las llegadas pueden ser constantes o aleatorias. Las estaciones de trabajo pueden ser de maquinas sencillas o varias máquinas trabajando en paralelo, de las cuales sus tiempos de procesamiento pueden ser constantes o aleatorios. El criterio que se ocupa en una línea de espera puede ser primeras entradas – primeras salidas (FCFS), ultimas entradas – primeras salidas (LCFS), fecha de entrega pronta (EDD) y tiempo de proceso corto (SPT). El espacio disponible para las piezas en cola se puede manejar como finito o infinito, aunque en procesos reales no existe un espacio infinito.

Para utilizar un sistema de líneas de esperas o *Teoría de Colas* y describir el funcionamiento de una estación de trabajo se deben seguir los siguientes parámetros:

r_a = Tasa de llegadas de piezas a una estación de trabajo por unidad de tiempo. En una línea de producción sin pérdidas o retrabajo, la tasa de llegadas es igual al throughput de cada estación.

$t_a = 1/ r_a$ = Tiempo promedio entre llegadas.

c_a = Coeficiente de variación de llegadas.

m = Número de máquinas en paralelo de cada estación.

b = Tamaño de buffer.

t_e = Tiempo efectivo de proceso. La tasa de producción de una estación de trabajo se define $r_e = m/t_e$.

c_e = Coeficiente de variación efectivo de tiempo de procesamiento.

p_n = Probabilidad de que hay n trabajos en una estación.

CT_q = Tiempo de espera en cola.

CT = Tiempo de ciclo total por estación.

WIP = Piezas en proceso promedio por estación.

WIP_q = Piezas en espera en cola.

Una clasificación parcial para una simple estación de trabajo, en un sistema de colas se denomina *Notación Kendall's* la cual caracteriza la línea de espera de una estación de trabajo mediante cuatro parámetros:

$$A / B / m / b$$

Donde A describe la distribución de los tiempos entre llegadas, B describe la distribución del tiempo de procesamiento, m se refiere al número de máquinas por estación y b es el número máximo de trabajos dentro del sistema. Los valores típicos para A y B en sus interpretaciones son:

D : Distribución constante (Determinística).

M : Distribución exponencial (Markovianos).

G : Distribución general (Normal, Uniforme, etc.).

Inicialmente se analizarán sistemas M/M/1 y M/M/ m debido a que este tipo de sistemas son una base antes de analizar los sistemas generales. Posteriormente se analizarán los sistemas G/G/1 y G/G/ m ya que estos sistemas modelan de la mejor forma estaciones de trabajo reales. Finalmente se analizan estos modelos con un límite de capacidad en buffer.

Es necesario considerar algunas relaciones fundamentales en este tema antes de analizar dichos sistemas. La utilización como primera expresión, la cual es la probabilidad que la estación esté desocupada, esta dada por:

$$u = \frac{r_a}{r_e} = \frac{r_a t_e}{m}$$

La segunda relación se da entre el tiempo efectivo de procesamiento y el tiempo de espera en cola.

$$CT = CT_q + t_e$$

La tercera relación aplica la Ley de Little a una estación de trabajo, permitiendo la relación entre WIP, CT y la tasa de llegadas como throughput.

$$WIP = TH \times CT$$

Aplicando la Ley de Little en la cola se obtiene la relación entre las piezas que esperan en cola, el tiempo de espera en cola y la tasa de llegadas.

$$WIP_q = r_a \times CT_q$$

Obteniendo estos parámetros, se pueden obtener los demás parámetros restantes mediante las relaciones antes mencionadas.

2.3.4.3.1 Sistema de Cola Markoviano M/M/1.

Es el sistema de cola más simple de analizar, en este modelo se asumen tiempos de llegadas exponenciales, una máquina sencilla con tiempo de proceso exponencial, utilizando un protocolo de primeras llegadas – primeras salidas y espacio ilimitado para las piezas en espera en cola. La clave para analizar este sistema es la propiedad de pérdida de memoria de la distribución exponencial.

Para comenzar a analizar dicho sistema se requiere información del tiempo entre llegadas y del tiempo de procesamiento, debido a que se asumen exponenciales, lo único que se necesita conocer son las medias, ya que la desviación estándar es igual a la media en una distribución exponencial, es necesario conocer de igual forma cuantas piezas o trabajos hay dentro el sistema.

Para computar el trabajo en proceso de un sistema M/M/1, se sigue la siguiente ecuación:

$$WIP(M / M / 1) = \frac{u}{1 - u}$$

Usando la Ley de Little se puede obtener el tiempo de ciclo de este sistema.

$$CT(M / M / 1) = \frac{WIP(M / M / 1)}{r_a} = \frac{t_e}{1 - u}$$

El tiempo de ciclo en cola.

$$CT_q(M / M / 1) = CT(M / M / 1) - t_e = \frac{u}{1 - u} t_e$$

Para computar el trabajo en proceso en cola se ocupa nuevamente la Ley de Little como sigue:

$$WIP_q(M/M/1) = r_a \times CT_q(M/M/1) = \frac{u^2}{1-u}$$

Tanto WIP como CT, CT_q , y WIP_q incrementan si se incrementa la utilización, por lo que sistemas muy utilizados muestran mucha más congestión que aquellos que están poco utilizados. Para una utilización definida, el tiempo de ciclo y el tiempo de ciclo en cola incrementan según se incremente el tiempo neto de procesamiento, por lo que máquinas muy lentas causan mayor tiempo de espera en cola.

Cabe señalar que debido a que el término $1-u$ se encuentra en el denominador en la mayoría de las ecuaciones, éstas tienden a ser indefinidas si la utilización se acerca a uno, lo que significa que los niveles de trabajo en proceso y tiempo de ciclo incrementarán rápidamente si la utilización es del 100%.

2.3.4.3.2 Sistema de Cola General G/G/1.

La mayoría de los sistemas de manufactura reales, no satisfacen las asunciones de los sistemas de colas Markovianos M/M/1, ya que no siempre los procesos siguen una distribución exponencial. Para analizar un sistema que no tenga procesos con distribución exponencial es necesario utilizar un sistema de cola General G/G/1.

Sin embargo, sin la propiedad de pérdida de memoria que caracteriza a la distribución exponencial, no se puede calcular un desarrollo exacto del comportamiento de un sistema G/G/1. Pero se puede estimar una aproximación en la cual se usa la media y la desviación estándar o el Coeficiente de Variación

de las distribuciones que siguen las llegadas y los procesos. Esta aproximación es la base de la mayoría de los paquetes computacionales de análisis de colas.

El primer paso es desarrollar la expresión para calcular el tiempo de ciclo en cola y poder obtener los demás parámetros de medición. La aproximación del CT_q fue desarrollada por *Kingman* en 1961 y esta dada por:

$$CT_q(G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e$$

Esta aproximación es sumamente funcional, ya que cuando el coeficiente de variación de llegadas y el coeficiente de variación de procesos son iguales a uno, el primer término es uno y los términos restantes son el tiempo de espera en cola para un sistema Markoviano. Esta ecuación se puede separar en tres términos, el primer término es adimensional y es referente a la *Variabilidad*, el segundo término es referente a la *Utilización*, y el tercer término es referente al *Tiempo*, por lo que esta ecuación se puede mencionar de la siguiente forma:

$$CT_q(G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e$$

$V \quad U \quad T$

$$CT_q = V U T$$

Esta expresión es conocida como *Ecuación Kingman* o *Ecuación VUT*. Analizando la ecuación se puede deducir que si el factor V es menor que uno, entonces el tiempo en cola y los demás parámetros de congestión para un sistema de cola $G/G/1$ serán menores que los del sistema de cola $M/M/1$. De manera contraria si el término V es mayor a uno, los parámetros de congestión en el sistema General serán mayores que los parámetros en el sistema Markoviano. Cabe mencionar

que la *Ecuación VUT* para estaciones de trabajo con una o varias máquinas tiene en el denominador el término $1-u$, por lo que mientras la utilización se aproxime a uno el tiempo de ciclo se eleva de manera significativa, si el término llega a ser igual a uno puede aproximar el tiempo de ciclo a infinito.

2.3.4.3.3 Máquinas en Paralelo.

La ecuación VUT es una herramienta práctica para analizar estaciones de trabajo consistentes de una sola máquina. Sin embargo en el mundo real, las estaciones de trabajo se conforman de varias máquinas trabajando en paralelo, ya que en algunas ocasiones se necesita más de una máquina para alcanzar la capacidad deseada de la estación de trabajo.

El tipo de estación de trabajo más sencillo es el caso donde las llegadas son exponenciales ($c_a = 1$) con procesos de igual forma siguen una distribución exponencial ($c_e = 1$), lo cual corresponde a un tipo de sistema de cola M/M/m. En este modelo todos los trabajos esperan en una misma cola y son distribuidos a la máquina que esté disponible. Para conocer el tiempo de espera en cola en máquinas en paralelo con características Markovianas, se diseñó un modelo propuesto por Sakasegawa en 1977, el cual indica que:

$$CT_q(M/M/m) = \frac{u^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-u)} t_e$$

Cabe señalar que para el caso donde $m=1$, la ecuación anterior es exactamente igual a la ecuación para obtener el tiempo de espera en cola del sistema M/M/1. Los siguientes parámetros a calcular como lo son $CT(M/M/m)$, $WIP(M/M/m)$ y $WIP_q(M/M/m)$ se obtienen con las relaciones fundamentales descritas anteriormente.

En el caso que se tenga una estación de trabajo con varias máquinas en paralelo y con procesos no exponenciales o procesos generales como lo sería el sistema $G/G/m$ se sigue la siguiente aproximación:

$$CT_q(G/G/m) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-u)} \right) t_e$$

La expresión anterior es la versión de la ecuación VUT de un modelo general con máquinas en paralelo en una estación de trabajo. Los términos de variabilidad y tiempo son idénticos a los términos de la ecuación VUT para una estación sencilla, el término que cambia es el de la utilización donde afecta el número de máquinas en la estación que se está analizando.

2.3.4.3.4 Efectos de Bloqueo.

Hasta ahora se han considerado sistemas en los cuales las piezas que esperan en cola pueden ser tan numerosas como se ha deseado, en todos los sistemas que se han mencionado, tanto el tiempo de ciclo como la cola crecen infinitamente cuando la utilización se acerca al 100%, pero en sistemas reales, las colas no crecen hasta infinito. En un sistema real se tienen limitaciones de espacio, tiempo o políticas de la empresa que rigen el tamaño de la cola, por lo que un tema importante a analizar es el comportamiento del sistema cuando existe un espacio definido para las piezas en espera en cola.

Considerando el caso en el cual los tiempos de arribo como de proceso son exponenciales con una máquina sencilla por estación, el caso $M/M/1$, pero solo se tiene espacio para b piezas en cola, como lo indica la notación Kendall la cual corresponde a mencionar un sistema del tipo $M/M/1/b$. Este sistema se comporta

de manera muy similar al sistema que no tiene restricciones de espacio, solo que cuando el sistema se ha llenado las llegadas cesan, cuando esto sucede se indica que el sistema o la máquina están bloqueados, ya que no hay lugar donde ubicar las piezas siguientes. Este tipo de configuración es muy común de hecho este sistema es utilizado en todos los procesos que cuentan con Kanban.

En un modelo con bloqueo de características $M/M/1/b$, la tasa de llegadas r_a toma un significado diferente, ya que en este caso se vuelve una tasa de llegadas potenciales, asumiendo que el sistema no está lleno. Por lo que la utilización ya no es la probabilidad de que la máquina esté ocupada, en este caso representa la utilización que existe en el sistema cuando no se han registrado llegadas, es por ello que es muy común obtener valores mayores a uno al calcular dicha utilización.

En el caso de líneas no balanceadas donde $u \neq 1$, el trabajo promedio en proceso y el throughput son:

$$WIP(M/M/1/b) = \frac{u}{1-u} - \frac{(b+1)u^{b+1}}{1-u^{b+1}}$$

$$TH(M/M/1/b) = \frac{1-u^b}{1-u^{b+1}} r_a$$

En el caso de líneas balanceadas donde $u = 1$, el trabajo promedio en proceso y el throughput son:

$$WIP(M/M/1/b) = \frac{b}{2}$$

$$TH(M/M/1/b) = \frac{b}{b+1} r_a = \frac{b}{b+1} r_e$$

Para cualquier caso se utiliza la Ley de Little para obtener los demás parámetros como lo son tiempo de ciclo, tiempo en cola y la longitud de la cola de la siguiente forma:

$$CT(M/M/1/b) = \frac{WIP(M/M/1/b)}{TH(M/M/1/b)}$$

$$CT_q(M/M/1/b) = CT(M/M/1/b) - t_e$$

$$WIP_q(M/M/1/b) = TH(M/M/1/b) \times CT_q(M/M/1/b)$$

Este sistema se interpreta fácilmente al utilizar dos estaciones de trabajo en serie, la primera estación tiene suficiente materia prima para no quedarse hambrienta y la segunda estación tiene suficiente espacio para sacar todas las piezas que sean procesadas, por lo que nunca se encuentra bloqueada. Entre las dos estaciones existe un buffer que es igual a B . Si las dos estaciones de trabajo con máquinas sencillas cada una tienen procesos exponenciales, entonces $b = B + 2$, los dos espacios extra en buffer son los trabajos que se procesan en las dos máquinas de las estaciones de trabajo.

Cabe señalar que el trabajo en proceso para el sistema de cola $M/M/1/b$ será menor que el trabajo en proceso del sistema $M/M/1$, esto ya que la segunda máquina bloquea a la primera y permite que el nivel de WIP no sea mayor que b . De esta forma los sistemas Kanban funcionan como un buffer finito y prevén que el WIP no crezca sin control. Sin embargo, controlar el WIP tiene un precio, se pierde capacidad de throughput; mientras más pequeño sea el tamaño de buffer b mayor será la reducción en throughput.

2.3.5 Sistemas de Producción Empujar y Jalar.

La mayoría de las descripciones que se han hecho sobre el sistema Justo a Tiempo hacen referencia a los sistemas de producción empujar y jalar. El mentor del sistema Justo a Tiempo, Taiichi Ohno, definió el sistema de producción jalar afirmando que las empresas manufactureras y las estaciones de trabajo no pueden basar la producción en planes de escritorio, para luego distribuirlas o empujarlas al mercado, ya que son los clientes quienes jalar los productos que necesitan en la cantidad y el tiempo que ellos establecen.

Otros textos afirman que el sistema de producción jalar se desenvuelve en la necesidad de los consumidores por ciertos productos, de esta forma se refiere al sistema de producción jalar como un sinónimo de un sistema Kanban. Sin embargo esta comparación no es benéfica para el significado real de un sistema jalar ya que se relacionan un concepto con una herramienta de implementación como lo es el Kanban.

Lo que distingue de un sistema empujar a un sistema jalar es el mecanismo en el cual se mueve el trabajo en el sistema. Un sistema empujar organiza el horario de la liberación de trabajo al piso basándose en la demanda, mientras que un sistema jalar autoriza la liberación de los trabajos al piso basándose en el estatus del sistema.

En un sistema de producción empujar, los trabajos son liberados al piso según lo que va dictando un horario y una programación de la producción basada en pronósticos, un sistema jalar libera trabajos al piso cuando una señal generada por un cambio en el estatus de la línea lo libera, en el sistema Kanban de Toyota, este tipo de señales de autorización son el resultado de la complementación del trabajo en algún punto de la línea.

Otra distinción entre los sistemas empujar y jalar es que el sistema empujar está relacionado con el sistema hacer dependiendo de la orden (*make-to-order*) y el sistema jalar está relacionado con el sistema hacer para inventario (*make-to-stock*). En un sistema empujar, éste se basa en las órdenes o pronósticos de ventas, más no en el estatus del sistema, mientras que en el sistema jalar, las señales que liberan el trabajo al sistema están basadas en el nivel de inventario de alguna parte de la línea. El sistema empujar es también conocido como un sistema MRP donde los trabajos son liberados de acuerdo a un horario basado en un pronóstico de órdenes.

2.3.5.1 Principios del Sistema de Producción Jalar.

El beneficio más importante de un sistema de producción jalar es que existe un límite en la cantidad máxima de inventario en el sistema. En el sistema Kanban, el número de contenedores definido por el número de tarjetas de producción, sin importar que pase en el piso de la planta, el nivel de WIP no puede exceder el límite especificado. Esto equivale a que el máximo beneficio es atribuido a que existe un control del nivel de WIP y que éste es obtenido sin importar lo que pase o haya que hacer para obtenerlo.

Si el WIP es controlado, los problemas en la línea no permitirán que éste crezca más de lo permitido. Esto no sucede en un sistema empujar donde no existen límites para el crecimiento del WIP. Si un sistema MRP es seguido literalmente, sin ningún ajuste dependiendo de la planta, entonces lo programado puede ser mucho mayor que la capacidad de producción generando así una explosión del WIP. Claro que esto nunca sucede en plantas reales ya que el espacio para el trabajo en proceso siempre es definido. Cuando algún problema afecta el comportamiento de la planta se resuelve de alguna u otra forma, se programa tiempo extra, se realizan contrataciones temporales para incrementar la capacidad, se empuja la producción bajo un sistema de tiempos de entrega a

tiempo, y se realizan acciones hasta que el proceso vuelve a estar controlado hasta que otra explosión de WIP suceda. El punto aquí es que en un sistema empujar las acciones correctivas se aplican hasta después de que existe un problema con el trabajo en proceso y el sistema está fuera de control.

Controlar el nivel de trabajo en proceso sin importar el mecanismo del sistema de producción jalar que se ocupe para obtener este control, llevará a una reducción del nivel de WIP requerido para obtener un throughput definido. Este sistema automáticamente reducirá los costos de producción asociados con el manejo de inventario y el manejo de materiales.

En un sistema Kanban se desarrolla un menor nivel de variabilidad en el tiempo de ciclo del que se desarrolla en un sistema empujar. Debido a la Ley de Little se obtiene que el tiempo de ciclo incrementa conforme se incrementa el nivel de WIP, en el sistema Kanban se previene que el trabajo en proceso explote por lo que también se previene una explosión del tiempo de ciclo.

El tener un nivel de WIP controlado es benéfico para el mantenimiento de la calidad, ya que trabajar con un nivel de trabajo en proceso corto permite identificar las partes defectuosas con una mayor rapidez y de esta forma no se procesan partes defectuosas que causan un reproceso u otro tipo de desperdicio.

2.3.5.2 Principios del Sistema CONWIP.

Un sistema CONWIP se refiere a un sistema con un nivel de trabajo en proceso constante, en este sistema un nuevo trabajo es introducido al sistema cuando un trabajo sale como producto terminado del sistema, por lo que el nivel de WIP permanece constante.

Una línea que trabaja bajo un sistema CONWIP, los trabajos que salen del sistema, envían una tarjeta al principio de la línea autorizando la entrada de un nuevo trabajo a la línea de producción. Para realizar este sistema se asumen dos ciertas consideraciones:

- La línea de producción consiste en una sola ruta donde las piezas fluyen.
- Los trabajos son piezas idénticas por lo cual se pueden medir en unidades.

Un sistema CONWIP se distingue por ser una red de colas cerradas, en la cual los trabajos circulan a lo largo del sistema. En contraste con un sistema empujar o MRP en el cual se considera una red de colas abiertas, donde los trabajos entran en la línea y salen después de haber sido procesados, los trabajos entran en la línea según el Plan de Requerimiento de Material (MRP) sin importar el número de trabajos en la línea.

El sistema Kanban es considerado como una red de colas cerradas con bloqueo, como sucede en el sistema CONWIP, los trabajos circulan a lo largo de la línea indefinidamente. Sin embargo, en el sistema Kanban se limita el número de trabajos en cada estación, ya que depende del número de tarjetas de producción que definen el máximo nivel de WIP en la estación. Cada tarjeta de producción actúa exactamente como un espacio en un buffer finito en frente de la estación de trabajo, si el buffer se llena, la estación anterior será bloqueada.

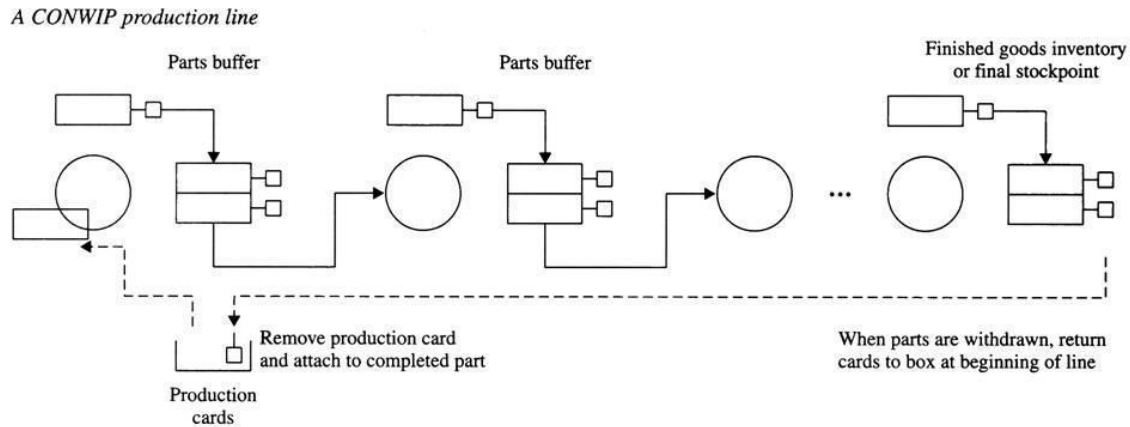


Figura 2.8 Esquema de una línea de producción bajo un sistema CONWIP

[Hopp & Spearman 2001].

Para analizar un sistema CONWIP se debe obtener un modelo cuantitativo que permita su comparación con otros sistemas de producción, un modelo similar al desarrollado por Kingman, en este caso se usa una técnica llamada Análisis del Valor Medio (MVA). Esta técnica es un procedimiento iterativo que desarrolla las medidas de los parámetros de una línea de producción con un cierto nivel de WIP. La idea básica es que un trabajo llega al sistema en una estación con ω trabajos y se observa el comportamiento del sistema con los otros $\omega - 1$ trabajos distribuidos en las demás estaciones.

Para utilizar este modelo se debe seguir la siguiente anotación:

$u_j(\omega)$ = Utilización de la estación j en una línea CONWIP con un nivel de WIP de ω piezas.

$CT_j(\omega)$ = Tiempo de Ciclo de la estación j en una línea CONWIP con un nivel de WIP de ω piezas.

$CT(\omega)$ = Sumatoria de los tiempos de ciclo de todas las estaciones en la línea CONWIP con un nivel de WIP de ω piezas.

$TH(\omega)$ = Throughput de una línea CONWIP con un nivel de WIP de ω piezas.

$WIP_j(\omega)$ = Trabajo en proceso promedio de la estación j en una línea CONWIP con un nivel de WIP de ω piezas.

Permitiendo que $WIP_j(0) = 0$ y $TH(0) = 0$, el algoritmo MVA calcula el tiempo de ciclo, el throughput y el nivel de WIP por cada estación en función del número de trabajos en el sistema CONWIP obedeciendo las siguientes ecuaciones:

$$CT_j(\omega) = \frac{t_e^2(j)}{2} [c_e^2(j) - 1] TH(\omega - 1) + [WIP_j(\omega - 1) + 1] t_e(j)$$

$$CT(\omega) = \sum_{j=1}^n CT_j(\omega)$$

$$TH(\omega) = \frac{\omega}{CT(\omega)}$$

$$WIP_j(\omega) = TH(\omega) \times CT_j(\omega)$$

Mediante estos parámetros se puede analizar el comportamiento de un sistema CONWIP según el número de trabajos en el sistema y así poder graficar el comportamiento de dicho sistema y compararlo con el PWC y con el mejor caso.

Una distinción fundamental entre los sistemas jalar y empujar es que en el sistema empujar se controla el throughput y se observa el nivel de WIP, mientras que en el sistema jalar, se controla el WIP y se observa el comportamiento del throughput. En un sistema MRP con un programa maestro de producción, las piezas son liberadas al piso según el programa y el nivel de trabajo en proceso puede aumentar o disminuir conforme se va cumpliendo el tiempo de producción, esto no sucede en los sistemas jalar, ya que en este sistema el trabajo en proceso siempre está controlado a un nivel específico.

Controlar un sistema CONWIP es relativamente sencillo ya que es muy fácil contar el número de piezas en el sistema, pero controlar un sistema empujar no es nada sencillo ya que se tiene que establecer la tasa de llegadas de las piezas al sistema dependiendo de la capacidad del sistema, si la tasa de llegadas es muy alta el sistema explotará en el nivel de WIP y si la tasa de llegadas es muy baja se estará trabajando con un throughput insuficiente. Es por ello que es preferible controlar parámetros robustos de manera que los errores no cuesten caros y así observar el comportamiento de los parámetros sensibles. El nivel de trabajo en proceso es un parámetro robusto, cuantificable y observable, mientras que throughput es un parámetro sensible y se puede controlar únicamente modificando la capacidad.

Los sistemas empujar son también conocidos como producción en masa, este tipo de sistemas de producción son diferentes a los especificados en la Manufactura Esbelta y la Física de la Fábrica, para un mejor entendimiento, se analizará la producción en masa comparándola contra la Manufactura Esbelta detallando las características que conforman un sistema de producción.

2.4 Producción en Masa.

Se caracteriza por desarrollar, producir y comercializar productos y servicios a precios bajos que puedan ser adquiridos por un cierto mercado. La mayoría de las empresas que llevan a cabo una producción en masa reflejan las características muy similares como las que se mencionan a continuación [Gallego, 2000].

La administración de una producción en masa puede seguir una administración vertical o plana dependiendo de la forma en la que esté organizada la empresa. El personal realiza trabajos repetitivos por lo cual se le considera experto en su

área de trabajo, no desarrolla un nivel elevado de multihabilidad ya que el trabajador es asignado a una actividad específica por largos periodos. En una planta con un sistema de producción en masa obesa no se le permite tomar decisiones respecto al producto o a la producción y no se le toma en cuenta para alguna mejora del proceso.

La producción en masa está planeada y desarrollada para satisfacer una cierta demanda, donde la tasa de producción es la misma ya que los mercados que se cubren son grandes y homogéneos sin ninguna variación del producto. Por lo consiguiente se busca invertir en equipo y facilidades que desempeñen trabajos específicos y que tengan capacidad de producir grandes volúmenes.

De esta forma los productos son estandarizados y se producen en grandes cantidades, permitiendo tener una calidad consistente basada en que no existe una diversidad de productos y no es necesaria una flexibilidad para cambiar de producción. La producción se refiere a un flujo continuo de un producto a través de todos los procesos de la planta. Los programas de producción están basados en pronósticos de ventas y los tiempos de ciclo son altos, ya que equivalen a meses y años, y se utilizan tamaños de lotes grandes.

En plantas con sistemas de producción en masa obesos, los materiales son comprados y almacenados, originando grandes inventarios de materia prima, el sistema de abastecimiento no está controlado y ello conlleva al incremento en el costo del producto. Por otro lado existen tiempos muertos en la espera del traslado de la materia prima del almacén a la estación de trabajo.

Las empresas con una producción en masa esbelta cuentan con una ventaja competitiva basada en el bajo costo de producción, con producciones estándares y una calidad de producto consistente, por lo que compiten por la presencia en un mercado ya sea nacional o internacional.

2.5 Producción en Masa Vs. Manufactura Esbelta.

En la producción en masa, las operaciones de las máquinas son manejadas a través de pronósticos y el producto terminado pasa a un almacén esperando que sea vendido. A diferencia de la Manufactura Esbelta, la cual está basada en el concepto que la producción está comandada por la necesidad de un cliente real. En vez de producir lo que se espera que se venda, la Manufactura Esbelta produce lo que el cliente realmente necesita con un tiempo de entrega corto; en vez de empujar la producción hacia un mercado, ésta es jalada desde un sistema que requiere tiempos de respuesta cortos a las demandas del mercado.

Las empresas esbeltas son capaces de producir artículos de bajo costo con una alta calidad en volúmenes pequeños e introducirlos al mercado más rápido que los productores en masa con procesos obesos. Una empresa esbelta puede producir dos veces más la cantidad de productos con el doble de calidad, con la mitad de tiempo y espacio requerido, a la mitad del costo de producción y con una fracción de inventario en proceso, de lo que se puede hacer con la producción en masa con procesos obesos, ya que las organizaciones esbeltas trabajan con un costo muy bajo y con cero desperdicio. Este concepto de empresas esbelta puede también aplicarse a empresas con producción en masa con procesos esbeltos. Donde la producción en masa está definida por la gran demanda que hay en el mercado, teniendo una producción en masa estándar y una calidad consistente y compitiendo por la mayor presencia del mercado basándose en el bajo costo de sus productos.

La producción en masa está definida por la demanda, hay ciertos productos que son necesariamente producidos en masa y no existe otra alternativa más que obtener una producción en masa esbelta y de bajo costo. El concepto de Esbeltez o Manufactura Esbelta puede ser aplicado a empresas que por características de su producto y por circunstancias del mercado tienen que

producir sus artículos en masa basando su permanencia en el mercado por el bajo costo de su producción y a una calidad consistente.

La siguiente tabla muestra un comparativo de las características organizacionales que se reflejan en una Producción en Masa y en la Manufactura Esbelta [Página Web 1].

Características	Producción en Masa	Manufactura Esbelta
Estrategia de Negocios	Estrategia enfocada al producto.	Estrategia enfocada al cliente.
Satisfacción del Cliente	Se fabrica lo que indica el programa maestro en grandes cantidades, con niveles altos de calidad.	Se fabrica lo que el cliente desea con cero defectos, en el tiempo que el cliente lo desea y en la cantidad de órdenes requeridas, a un bajo costo de producción.
Liderazgo	Se utiliza un liderazgo ejecutivo.	Se utiliza un liderazgo de visión con una amplia participación.
Organización	Estructura jerárquica donde se fomenta el seguimiento de un programa maestro de producción definido según los pronósticos de venta.	Estructura Plana que fomenta la iniciativa y el flujo de información importante que señala defectos, errores de los operadores, anomalías del equipo, y deficiencias organizacionales.

Relaciones Externas	Basadas en precios y negociaciones.	Relaciones estratégicas de largo tiempo.
Administración de la Información	Manejo de información basada en reportes.	Manejo de información basada en los sistemas de control visual por todos los empleados.
Cultura	Cultura de lealtad a la empresa, obediencia a la demanda y eficiencia en la producción.	Cultura de armonía basada en el involucramiento del desarrollo de largas relaciones laborales.
Producción	Lay outs por procesos, operadores expertos en su área, corridas de producción largas, manejo de grandes inventarios, sistema de producción empujar.	Celdas de manufactura y líneas flexibles, personal multihabilidades, flujo de una sola pieza, cero inventarios, sistema de producción jalar.
Capacidad Operacional	Herramientas especializadas en una actividad, alta calidad en los procesos, seguimiento de un plan maestro de producción.	Herramientas inteligentes, trabajo estandarizado, fortaleza en la identificación de problemas, generación de hipótesis y experimentación.
Mantenimiento	Mantenimiento realizado por especialistas.	Programas de mantenimiento preventivo.

Tabla 2.3 Comparación de características organizacionales generales de Manufactura Esbelta y Producción en Masa.

En la siguiente tabla se comparan de igual forma la Producción en Masa con Manufactura Esbelta comparando diversos métodos de manufactura

[Página Web 1].

Métodos de Manufactura	Producción en Masa	Manufactura Esbelta
Programa de producción basado en...	Pronósticos de ventas – la producción es empujada a lo largo del sistema.	Ordenes de los clientes – la producción es jalada a lo largo del sistema.
Productos manufacturados para...	Cumplir con el programa maestro diseñado en base a los pronósticos, los productos se almacenan en inventario de productos terminados.	Cumplir las órdenes del cliente. Los productos son embarcados inmediatamente.
Los ciclos de producción	Semanas/meses.	Horas/días.
Tamaño de lotes	Largos, con pallets largos moviéndose entre las operaciones.	Cortos, basados en el flujo de una sola pieza.
Calidad es asegurada...	A través de muestreo de lotes.	100% de la fuente de producción.
Poder de decisión de los trabajadores.	Medio, son expertos en su área de trabajo, pero no tienen autoridad para parar una producción si no tienen respaldo del supervisor de producción.	Alto, responsables de identificar e implementar mejoras al proceso. Capaces de detener la producción cuando exista algún desperfecto.

Asignación de trabajadores.	Un trabajador por máquina.	Un trabajador responsable de varias máquinas.
Niveles de inventario.	Alto, grandes almacenes de productos terminados y gran cantidad de trabajo en proceso.	Bajo, pequeños buffers entre operaciones con trabajo en proceso.
Flexibilidad al cambiar la programación de la producción.	Muy baja, difícil de ajustar y de manejar con cambios que salen de lo programado ya que es necesario cumplir con una demanda pronosticada.	Alta, fácil de ajustar y de implementar cambios en los programas de producción.

Tabla 2.4 Comparación de métodos de manufactura entre Producción en Masa y Manufactura Esbelta.

De esta forma se puede concluir que la Producción en Masa es significativamente diferente a la Manufactura Esbelta. Aún así, la principal ventaja de la producción en masa es que sus productos son estandarizados, lo que lleva a manejar altos volúmenes de producción, ya que no se necesita de gran flexibilidad en su equipo y personal, facilitando la simplicidad del proceso y reduciendo los costos, de esta forma se pueden ofrecer productos con precios muy competitivos [Gallego, 2000].

En sí la producción en masa no es una forma ineficiente de producción, hay productos que por sus características y por su demanda en el mercado es necesario producirlos en masa, el problema radica en la forma en que se opera una producción en masa que puede ser una operación obesa, aquí es donde se aplican los conceptos de la Física de la Fábrica y la Manufactura Esbelta para

contribuir e implementar una producción en masa esbelta, la cual lleve a obtener una variabilidad mínima en sus procesos que generen un menor tiempo de ciclo y altos niveles de inventario de producto terminado.

De esta forma se concreta que la Manufactura Esbelta y la Física de la Fábrica se enfocan al mejoramiento continuo de la empresa, ya que su objetivo es minimizar la utilización de recursos en todos los tipos de producción, ya sean en masa basados en la demanda y en pronósticos o en una producción jalada por órdenes del cliente.

Dentro de la Manufactura Esbelta se visualiza a los empleados, proveedores y accionistas como socios de la empresa, en donde la relación entre los mismos es de "Ganar-Ganar" y para ello se enfocan en la satisfacción de las necesidades del cliente al menor costo para obtener así las mayores utilidades que beneficiarán a todos los involucrados en la empresa.

La transición de una manufactura obesa a una manufactura esbelta no puede ser instantánea y requiere de un amplio proceso de cambio, ya que las diferencias entre estos sistemas de producción son muy significativas y existen variables que podrían entorpecer el proceso como lo es la cultura del personal, la visión de la dirección, el enfoque de producción, etc. Es por ello que al tomar la decisión de cambiar de sistema de producción se involucra toda la empresa haciendo conciencia que el cambio es para bien y que los beneficios que traerá esta transición mejorarán la visión global de la compañía.

2.6 Beneficios de la Manufactura Esbelta.

Las empresas en vías de transición hacia una Manufactura Esbelta se han enfrentado a diversos problemas que las han llevado a la decisión de cambiar hacia una Empresa Esbelta, estos problemas generalmente en la mayoría de las

empresas se deben a incumplimientos con la fecha de entrega, altos costos de producción comparados con la competencia, pérdida de la participación en el mercado, capacidad limitada en los procesos, etc. Todos estos retos han sido comunes en la mayoría de las empresas, y algunas son las que han tomado la decisión en transformarse en Empresas Esbeltas.

El cambio a una Manufactura Esbelta tiene un impacto positivo inmediato en las empresas. A través de la implementación de esta metodología se pueden obtener ciertos beneficios, pero los resultados varían dependiendo de las características de cada empresa que implemente la metodología. Algunos de los beneficios más comunes presentados por la mayoría de las empresas que han desarrollado una transición a la Manufactura Esbelta son:

- Reducción de los tiempos de entrega de un 50 a 90%.
- Reducción del 50% en los inventarios.
- Reducción de los requerimientos de espacio en piso de un 5 a 30%.
- Reducción de los trabajos en proceso de un 60 a 80%.
- Reducción de un 70% en el tiempo de ciclo.
- Incremento en la capacidad de producción de un 40 a 80%.
- Incremento en la productividad de un 75 a 125%.
- Incremento del 50% o más en la capacidad de recursos existentes.
- Mejoras del 10% o más en la utilización de la mano de obra directa.
- Mejoras del 50% o más en la utilización de la mano de obra indirecta.

Por consiguiente, la Manufactura Esbelta es una alternativa inteligente para permanecer dentro de las actividades de manufactura y sobre todo mantenerse en pie dentro de un ambiente cada vez más competitivo. Finalmente es importante dejar claro que lo esencial de la Manufactura Esbelta es el involucramiento de toda la fuerza de trabajo en el continuo mejoramiento del sistema de producción [Arellano, 2001].

III. METODOLOGÍA.

3.1 Metodología de Trabajo.

Siguiendo a los objetivos planteados y con base en los conceptos analizados anteriormente, es necesario definir el modelo de trabajo que se utilizará en esta investigación.

Debido a que la simulación es una herramienta, mediante la cual es posible estimar el comportamiento de un nuevo sistema sin la necesidad de crearlo o de modificar alguno existente, se busca que sea ésta la parte más importante en la búsqueda de la eliminación del desperdicio.

En la práctica una simulación de procesos, como se mencionó en el capítulo anterior, puede ser la complementación de un mapa de una cadena de valor, donde la simulación funcionaría como un laboratorio de pruebas de una organización, en la cual se llevan a cabo experimentos relacionados con nuevos sistemas, propuestas de mejora o adiciones. La ventaja que esto representa para la empresa radica en el hecho de no tener que invertir en modificaciones o arriesgar los sistemas actuales hasta tener evidencias suficientes de que los cambios traerán mejores resultados [Vera, 1997].

En la siguiente figura, se muestra el modelo que se seguirá como la metodología de trabajo para esta investigación, la cual está basada en la simulación de problemas basados en las leyes de la *Física de la Fábrica* y de la *Manufactura Esbelta* para sistemas de producción abiertos o cerrados, para estos sistemas se utilizarán rutinas de hojas de cálculo conjunto con un paquete computacional de simulación especializado, de manera de poder comparar los resultados de estas simulaciones y obtener las conclusiones finales de esta comparación.

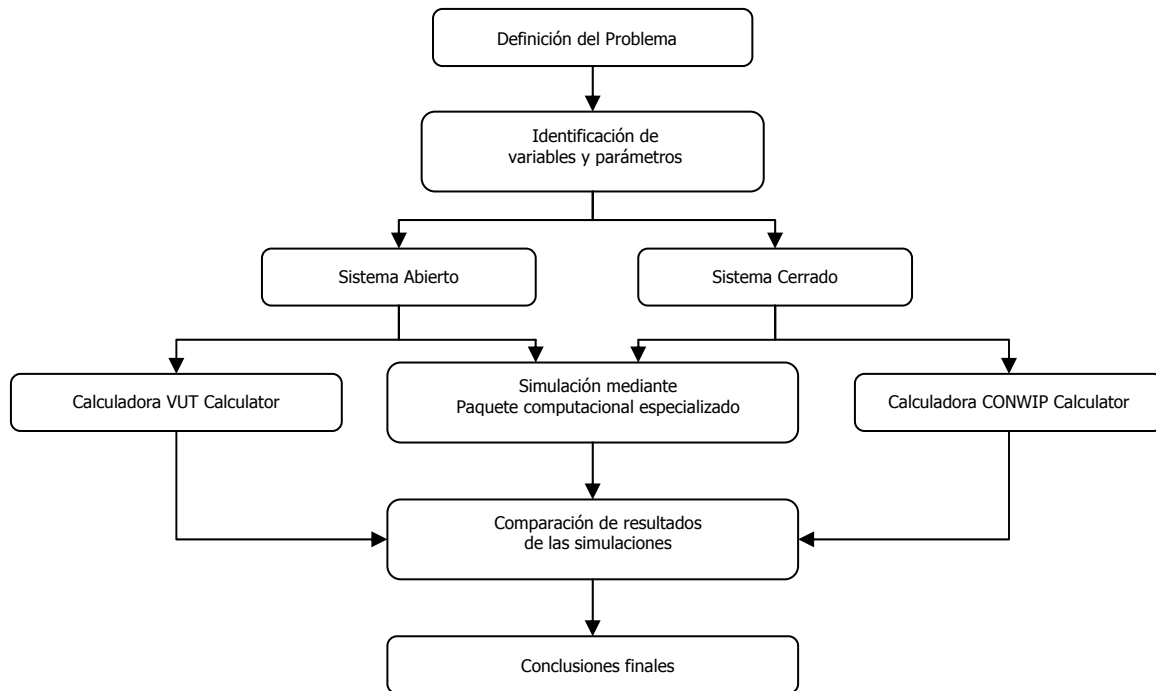


Figura 3.1 Modelo de la metodología de trabajo.

3.2 Definición del Problema.

Es el primer punto del modelo, en este paso se comienza por establecer el sistema que se va a simular, este sistema puede ser el producto de un mapa de una cadena de valor de un estado actual o de un estado futuro o ideal. En este punto se inicia por conocer el sistema de producción en el cual se va a trabajar, conociendo todos los detalles y por menores del sistema, cuantas estaciones de trabajo funcionan, si fallan, si tienen tiempos de preparación, etc. De esta forma se crea una idea del proceso en general.

3.3 Identificación de Variables y Parámetros.

Habiendo conocido el proceso a simular el siguiente paso es identificar aquellas variables y parámetros necesarios para comenzar el proceso de simulación. Es importante definir primeramente las variables ya que si no se tienen bien

establecidas el resultado de dicha simulación puede variar y no ser confiable, por lo cual es necesario darle especial atención en este paso.

Las variables independientes que se definen son:

- Tiempos naturales de procesamiento.
- Variabilidad natural de procesamiento.
- Tasa de llegadas.
- Variabilidad natural de las llegadas al sistema.
- Número de estaciones de trabajo.
- Número de máquinas por estación.
- Tipos de fallas.
- Tiempo medio entre fallas.
- Tiempo medio entre reparaciones.
- Tiempos de preparación.
- Variabilidad de los tiempos de preparación.
- Número de trabajos entre fallas.

Solo por mencionar algunas de las variables independientes de las cuales se debe poner cierta atención, en la mayoría de los sistemas de producción a simular es común encontrar estas variables independientes pero cada sistema puede variar y ser diferente, es por ello que se estableció como primer paso definir el problema, para después identificar las variables que éste problema presenta. No se puede dar por hecho que todos los sistemas a simular sean iguales, es necesario identificar cada sistema y categorizarlo para definir exactamente las variables y parámetros de cada sistema. Al realizar una adecuada identificación de variables y parámetros se puede definir una amplia posibilidad de éxito para realizar la simulación de dicho sistema de producción en las herramientas computacionales utilizadas.

3.4 Sistema Abierto o Sistema Cerrado.

Es necesario conocer la diferencia entre un sistema abierto y un sistema cerrado para comenzar una simulación, ya que el funcionamiento de estos sistemas es completamente diferente uno del otro.

En un sistema abierto los niveles de inventario en proceso varían según la demanda y las órdenes de compra de los clientes, mientras en un sistema cerrado el nivel de inventario es el mismo, y no varía ante ningún movimiento de la demanda o de las órdenes de compra. En el sistema abierto las entradas al sistema de manera excesiva provocarían un aumento de los niveles de inventario, aumentado de esta forma el tiempo de ciclo total, mientras que en sistemas cerrados la entrada de material al sistema depende de la salida de material, no puede entrar una pieza al sistema de producción si no ha salido una pieza.

Los sistemas cerrados ocuparán el mecanismo del sistema CONWIP, el cual permite la entrada de una pieza a un sistema de producción siempre y cuando haya salido una pieza del sistema de producción. Este sistema logra que los niveles de inventario siempre se mantengan constantes de acuerdo con los requerimientos de la línea de producción.

3.5 Simulación de Procesos de Producción.

El siguiente paso es realizar la simulación de los procesos de producción, en este punto, habiendo definido los parámetros e identificando si el sistema es abierto o cerrado, se procede a realizar la simulación.

Para un sistema abierto se utilizará la rutina de hoja cálculo *VUT CALCULATOR* esta rutina de cálculo se basa en el flujo de la variabilidad utilizando la *Ecuación Kingman* para procesos generales, mediante la cual se alimentan los parámetros

establecidos y se obtiene de resultado las variables dependientes que indican el estatus y comportamiento del sistema. De igual forma para los sistemas cerrados se utilizará la rutina de hoja de cálculo *CONWIP CALCULATOR* la cual esta basada en el Algoritmo del Valor Medio. Estas hojas de cálculo son programadas bajo las leyes de la *Física de la Fábrica* y son parte del material de apoyo de Hopp y Spearman dentro de la página Web de la *Física de la Fábrica* [Página Web 3].

Estas rutinas de cálculo serán comparadas contra un lenguaje de simulación especializado como lo es ARENA 7.01, el cual se utilizará para hacer la simulación tanto de los sistemas abiertos como cerrados. En dicho programa no se utilizarán recursos de transporte dentro de los cálculos finales de tiempo de ciclo ya que estos no están definidos dentro de las rutinas de simulación de hojas de cálculo. Se realiza de esta forma para que los casos de simulación sean idénticos y no se de lugar a diferencias en los resultados.

El paquete computacional especializado en simulación de sistemas ARENA 7.01, es un producto de Rockwell Software Inc. Este es una herramienta de simulación y animación diseñado para modelar sistemas de manufactura. Arena está orientado a modelar elementos de manufactura basados en reglas de decisiones lógicas.

Arena puede ser usado para simular sistemas discretos y continuos empleando un objetivo basado en diseño para un el desarrollo de un modelo gráfico. La simulación de los modelos es construido usando objetos llamados módulos para definir sistemas lógicos y componentes físicos, como los son, máquinas, operadores, estaciones de trabajo, etc. Los módulos son representados por íconos asociados con ventanas de dialogo donde se introducen los datos. Estos íconos son conectados para representar el flujo de las entidades a través del sistema a modelar. Los módulos están organizados en diversas colecciones

llamadas plantillas. Las plantillas de Arena son la base de las colecciones de módulos, proveniente ciertas características generales para modelar toda clase de aplicaciones además de las características estándar como lo son recursos, colas, procesos lógicos y sistemas de datos, existen módulos enfocados en aspectos específicos de sistemas de manufactura y manejo de materiales. Arena puede ser usado para simular modelos combinando sistemas discretos y continuos a la vez [Banks, 2001].

El corazón de Arena es el lenguaje de simulación SIMAN. Para animar las simulaciones de los modelos, se utilizan gráficas estándar que muestran colas, disponibilidad de recursos y flujo de entidades.

El análisis de los datos que emite Arena como datos de salida, proporciona intervalos de confianza, comparación de sistemas múltiples y determina un tiempo de calentamiento, el cual reduce las variaciones de las condiciones de inicio. El paquete crea varias gráficas e histogramas, así como análisis de correlación del desempeño del sistema.

La interfase para correr una simulación de un sistema en Arena permite al usuario a definir múltiples escenarios y hacer las corridas deseadas que dan lugar a realizar una experimentación haciendo variaciones el sistema para ver el funcionamiento y la reacción de éste a ciertas modificaciones [Kelton, 2004].

3.6 Comparación de Resultados.

Es en este paso donde se comparan los resultados de las simulaciones, aquí es donde se observa la manera en la que las variables dependientes varían según la simulación efectuada. Esta comparación se basa en la disparidad de los resultados y del porcentaje de variación que exista entre ellos.

3.7 Conclusiones Finales.

Al haber comparado los resultados, el siguiente paso es emitir las conclusiones finales basados en dicha comparación. Las conclusiones finales mencionarán las observaciones de la comparación efectuada en los sistemas de producción y confirmarán si las hojas de cálculo utilizadas para la simulación de procesos son confiables para su uso en estos sistemas. Estas hojas de cálculo representarán una ventaja competitiva para pequeñas y medianas empresas que no cuentan con una licencia de un paquete computacional especializado en simulación de procesos.

Cabe señalar que el objetivo es proporcionar una herramienta confiable y de bajo costo que permita contribuir en la lucha de la disminución del desperdicio y la búsqueda de la perfección constante en las organizaciones que comienzan una etapa de transformación a una empresa esbelta.

IV.EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.

4.1 Distribución Continua.

La mayoría de los procesos de producción establecidos como líneas de ensamble en procesos reales describen funcionamientos aleatorios, los cuales se asemejan al comportamiento de algunas distribuciones continuas, como lo pueden ser distribuciones gamma, exponenciales, normal, uniforme, weibull, etc. Las variables aleatorias continuas pueden ser usadas para describir fenómenos aleatorios en los cuales la variable de interés puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo, por ejemplo pueden describir el tiempo en que falla una máquina, los tiempos de procesamiento de estaciones de trabajo, o el comportamiento de los recursos.

El uso de este tipo de distribuciones ha sido benéfico para realizar simulaciones de modelos y proveer una lista de propiedades relevantes. Existen algunas alternativas para definir o parametrizar la densidad de las funciones probabilísticas. Si los parámetros han sido definidos correctamente, éstos pueden ser clasificados en interpretaciones físicas o geométricas como lo son en parámetros de escala, forma o locación.

El parámetro de locación especifica la abscisa, el eje x , el punto de distribución de los valores en el rango, los parámetros de locación en algunas ocasiones son considerados como la media o el punto medio de la distribución. Cuando se modifique el parámetro de locación, la distribución se mueve ya sea a la izquierda o la derecha del eje x , sin que cambien los demás parámetros.

El parámetro de escala determina la unidad de medición de los valores en el rango de distribución. Un cambio en el parámetro de escala comprime o expande la distribución asociada, sin alterar su forma básica. El parámetro de forma determina la forma básica de la distribución, un cambio en el parámetro de forma altera por completo las propiedades de la distribución.

Para analizar, modelar y simular un proceso de manufactura que se apegue a las condiciones reales de cualquier línea de procesamiento, es necesario contar con cierta variabilidad en los procesos, como se mencionó anteriormente en los procesos de producción o líneas de producción existe un coeficiente de variabilidad tanto en las llegadas de las piezas al sistema como en los procesos de las estaciones de trabajo. Para la *Física de la Fábrica*, este es el punto primordial de los procesos, conocer, manejar y disminuir la variabilidad efectiva de dichos procesos.

Para las simulaciones efectuadas tanto en los sistemas abiertos y cerrados del tipo *VUT Calculator* y *CONWIP Calculator* es necesario establecer el valor de un coeficiente de variación tanto para las llegadas de las piezas como el coeficiente de variación natural de los procesos. Este coeficiente de variación se obtiene mediante la razón de la varianza con el cuadrado de la media o del tiempo medio de los procesos. En la mayoría de los casos es más fácil conocer el coeficiente de variación de los procesos que el tipo de distribución que se apega al comportamiento de dicho proceso.

Es necesario conocer tanto el coeficiente de variación para realizar las simulaciones en las hojas de cálculo *VUT Calculator* y *CONWIP Calculator* ya que para introducir los datos en estas hojas de cálculo se pide como dato principal el coeficiente de variación de los procesos. Sin embargo, para realizar las simulaciones de los modelos en Arena, se requiere de una distribución probabilística continua que describa de mejor forma el comportamiento de dichos procesos.

Bajo esta metódica se ha decidido establecer la distribución gamma como la distribución probabilística que se utilizará para realizar las simulaciones de los modelos en arena. Los parámetros de esta simulación se obtienen directamente del coeficiente cuadrado de variación y del tiempo promedio dado.

Se utiliza la distribución gamma ya que ésta establece que los datos utilizados serán todos números positivos, debido a que se utiliza el tiempo como un parámetro de interés, es necesario que los datos sean positivos, de lo contrario se estaría trabajando con tiempos negativos que no son ilógicos e inexistentes. La Figura 4.1 muestra la distribución gamma con diversos valores del parámetro de forma, en esta figura se puede ver como la función gamma puede tomar una forma tanto de una distribución exponencial como de una distribución normal pero con valores completamente positivos, es por ello que es una distribución probabilística que cumple perfectamente con los comportamientos de los sistemas de una línea de producción.

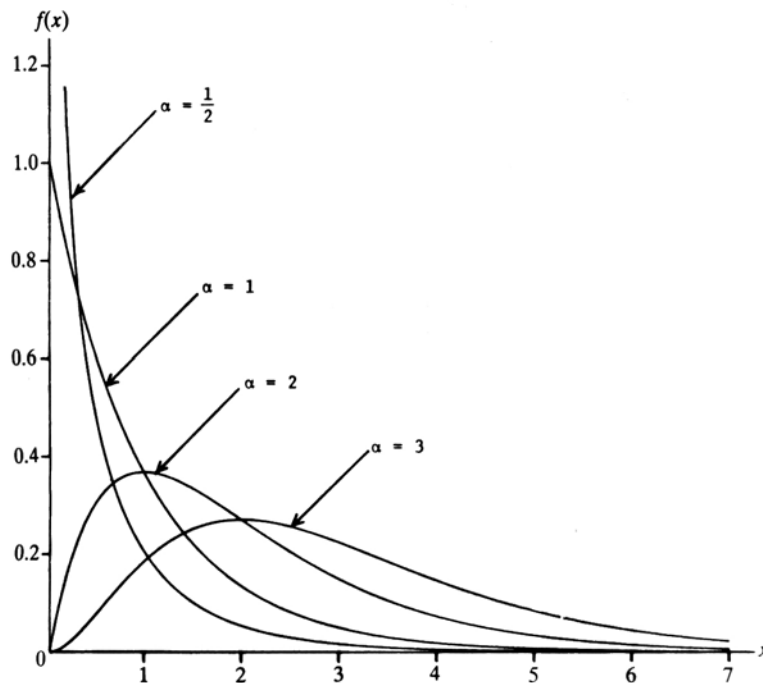


Figura 4.1 Función de densidad de la distribución gamma con diversos parámetros de forma [Law, 1991].

Los parámetros que se utilizan para desarrollar las simulaciones en Arena son necesarios para llevar a cabo la metodología descrita anteriormente. Es por ello que es muy importante sincronizar los parámetros de la distribución gamma con el coeficiente cuadrado de variación de los procesos.

En la Tabla 4.1 se indican los parámetros importantes a considerar de la distribución gamma.

Distribución Gamma	
Parámetros	Parámetro de Forma $\alpha > 0$ Parámetro de Escala $\beta > 0$
Rango	$[0, \infty)$
Media	$\alpha\beta$
Varianza	$\alpha\beta^2$

Tabla 4.1 Parámetros importantes de la Distribución Gamma.

De manera que estos parámetros de la distribución gamma sean utilizados tanto para los datos de las hojas de cálculo *VUT Calculator* y *CONWIP Calculator*, y las simulaciones de estos modelos en *Arena*, es necesario sintetizar estos parámetros en términos de un coeficiente de variación. Como se mencionó anteriormente del coeficiente de variación utilizado en las hojas de cálculo se obtendrá el comportamiento que siguen los procesos bajo una distribución gamma.

Las primeras ecuaciones de los parámetros de la distribución gamma como se indican en la Tabla 4.1 son:

$$\mu = \alpha\beta$$

$$\sigma^2 = \alpha\beta^2$$

De la varianza se obtiene:

$$\sigma^2 = (\alpha\beta)\beta$$

$$\sigma^2 = \mu\beta$$

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu} \cdot \frac{\mu}{\mu}$$

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \mu$$

Se conoce que el coeficiente cuadrado de variación se define por:

$$c^2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2}$$

Por lo tanto se dice que para el parámetro de escala β la ecuación se define como:

$$\beta = c^2 \cdot \mu$$

Conociendo que la media es igual al producto del parámetro de forma α por el parámetro de escala β , se define α como:

$$\alpha = \frac{\mu}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\mu}{c^2 \cdot \mu}$$

$$\alpha = \frac{1}{c^2}$$

De igual forma se puede decir que el parámetro de forma es igual a:

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

Mediante estas ecuaciones es posible sincronizar tanto los coeficientes de variación que se introducen a las hojas de cálculo *VUT Calculator* y *CONWIP Calculator*, como a los comportamientos de los procesos y las llegadas en los modelos simulados en Arena.

El coeficiente de variación provee información útil acerca de la forma de las distribuciones continuas, en particular el coeficiente de variación de valor igual a 1 se refiere generalmente a una distribución exponencial, sin importar el parámetro de escala β . Cuando el coeficiente de variación es cercano a uno se sugiere una distribución exponencial. En una distribución gamma el coeficiente de variación puede ser mayor, igual o menor a uno si el parámetro de forma α es menor, igual o mayor a uno respectivamente, por lo que esta distribución tiene una forma singular, como se aprecia en la Figura 4.2, donde para un $\alpha > 1$ implica que el coeficiente de variación $c < 1$.

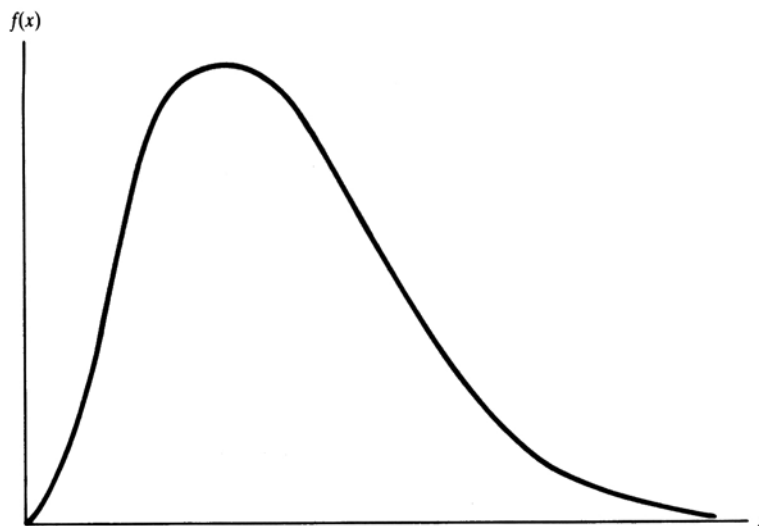


Figura 4.2 Típica forma de la función gamma experimentada en procesos reales [Law, 1991].

La Figura 4.2 muestra el comportamiento que se vislumbra en la mayoría de los procesos reales, es por ello que se utiliza este tipo de distribución probabilista, tratando que los modelos sean lo más cercano a la realidad.

4.2 Experimentación con un Sistema Abierto.

El siguiente paso es aplicar la metodología descrita en el capítulo anterior aplicándola a un sistema abierto. La metodología descrita, es muy flexible y cubre cualquier tipo de problema ya sean abiertos o cerrados, de esta forma se definirá primeramente para un sistema abierto, donde se utilizará la calculadora *VUT Calculator* y la simulaciones realizadas en Arena.

4.2.1 Definición del Problema.

El sistema de producción a simular, es un sistema muy sencillo, se decide aplicar un sistema de este tipo ya que al trabajar con sistemas abiertos, la cantidad de piezas dentro de un sistema va en ascenso conforme se realiza la simulación. Se simulará un sistema con una sola estación de trabajo y una máquina. Este sistema tendrá una tasa de llegadas fija con un coeficiente cuadrado de variación de llegadas fijo también, se harán varias corridas utilizando diversos parámetros como lo son la utilización de la máquina y la variabilidad natural del proceso, haciendo variaciones desde una subutilización y una variabilidad baja, hasta una utilización casi del 100% y una alta variabilidad.

4.2.2 Identificación de Variables y Parámetros.

Habiendo definido el sistema a simular, es necesario identificar las variables y parámetros que llevarán a una simulación confiable. Como se mencionó antes, el sistema cuenta con una sola estación de trabajo y una máquina. Para este sistema, las llegadas de las piezas serán iguales en todas las corridas que se realicen. Las llegadas tendrán una razón de 10 piezas por hora, con un coeficiente cuadrado de variación entre llegadas de 0.8 con una variabilidad un tanto moderada. Estos datos permanecerán fijos conforme vayan cambiando las corridas que se realicen al simular el proceso.

- $r_a = 10$ pza/hr.
- $t_a = .1$ hr.
- $c_a^2 = 0.8$

Las variaciones que se hagan al sistema a simular dependerán directamente de la utilización de la estación de trabajo, además de la variabilidad natural de procesamiento, es decir, se realizarán simulaciones con diversos valores de utilización, que van desde un 5% hasta un 95% de utilización. Además se modificará el coeficiente de variación natural del proceso, realizando simulaciones con un coeficiente cuadrado de variabilidad baja, media y alta.

Cabe señalar que además de estas variaciones que se han indicado, el sistema se simulará primeramente sin detractores, es decir sin fallas que afecten su desempeño, y se realizará una segunda simulación de todo el proceso agregando un tipo de falla. Se realiza de esta forma para distinguir el funcionamiento tanto de la calculadora *VUT Calculator* como de Arena en diferentes situaciones, y así comparar un número mayor de resultados. En total se realizarán alrededor de 30 simulaciones para verificar el desempeño de estas herramientas en sistemas abiertos y en escenarios distintos.

El modificar la utilización de la estación de trabajo, afecta directamente al tiempo efectivo de procesamiento ya que la tasa de llegadas permanecerá constante, esto siguiendo a la ecuación que indica que la utilización es la razón de la tasa de llegadas sobre la tasa de procesamiento efectiva. Para el caso de las simulaciones sin detractores donde no hay nada que afecte al sistema, el tiempo de procesamiento efectivo equivale al tiempo natural de proceso, $t_e = t_o$, siendo el tiempo natural de procesamiento una variable de entrada para realizar las simulaciones. En la siguiente tabla se muestran los valores del tiempo natural de procesamiento para diversas utilidades.

Utilización	Tiempo Natural de Proceso
u = 5%	$t_o = 0.005$ hr.
u = 20%	$t_o = 0.02$ hr.
u = 50%	$t_o = 0.05$ hr.
u = 80%	$t_o = 0.08$ hr.
u = 95%	$t_o = 0.095$ hr.

Tabla 4.2 Diversos valores del tiempo natural de proceso para cada utilización sin detractores.

Estos valores de tiempo natural de proceso se simularán para cada valor del coeficiente cuadrado de variación natural utilizado.

Variabilidad	Coficiente Cuadrado de Variación
Baja	$c_o^2 = 0.25$
Media	$c_o^2 = 1$
Alta	$c_o^2 = 2$

Tabla 4.3 Valores del coeficiente cuadrado de variación natural.

En el caso donde existen detractores, se agrega una falla al sistema, esta falla es del tipo *Preemptive* o falla aleatoria, donde se le indica al sistema un patrón a seguir, el sistema funciona un cierto periodo de tiempo y falla, para después esperar otro periodo de tiempo a que el sistema sea reestablecido, en este tipo de falla se utiliza un MTTF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio de reparación). Con estos indicadores se obtiene una disponibilidad del sistema, la cual afecta indirectamente al tiempo efectivo de procesamiento. Para todas las simulaciones se decidió utilizar el mismo tipo de falla, ocupando un MTTF de 200 horas y un MTTR de 4 horas, siendo que para estos valores se tiene una disponibilidad $A = 0.98$, debido a que esta disponibilidad afecta al tiempo efectivo de procesamiento, es necesario calcular nuevamente el tiempo natural de proceso que se utilizará para las simulaciones con detractores.

Utilización	Tiempo Natural de Proceso
u = 5%	$t_o = 0.0049$ hr.
u = 20%	$t_o = 0.0196$ hr.
u = 50%	$t_o = 0.049$ hr.
u = 80%	$t_o = 0.0784$ hr.
u = 95%	$t_o = 0.0931$ hr.

Tabla 4.4 Tiempo natural de procesamiento para un sistema con fallas aleatorias.

Habiendo identificado las variables y parámetros que se utilizarán para realizar las simulaciones, es necesario fijar los resultados de salida a los cuales se les debe poner especial atención, ya que son éstos los que indican el comportamiento del sistema. Las variables dependientes que nos indican el estado del sistema producción son:

- Throughput (TH).
- Tiempo de Ciclo total del sistema (CT).
- Número total de piezas en el sistema (WIP).

4.2.3 Sistema Abierto.

Como se estableció anteriormente, se simularán sistemas que corresponden a sistemas tipo Push, donde las piezas entran al sistema a una razón dada y son procesadas para posteriormente salir del sistema, se trata de sistemas abiertos donde no hay restricciones de buffer, bloqueos o restricciones de espacio, literalmente las colas del sistema pueden crecer hasta un nivel muy elevado, afectando de esta forma el trabajo en proceso, el tiempo de ciclo y el throughput. Es por ello que es necesario conocer el comportamiento de este tipo de sistemas y utilizar las herramientas computacionales para poder prever alguna situación que afecte el desempeño del sistema de producción.

4.2.4 Simulaciones de los Sistemas Abiertos.

El primer paso es realizar las simulaciones en la hoja de cálculo *VUT Calculator*, en ésta se introducen todos los datos recabados en el inciso anterior. Como se indico las llegadas quedan fijas para todas las simulaciones y se va variando tanto el coeficiente cuadrado de variación natural como el tiempo natural de proceso.

Para simular un sistema abierto sin detractores y con un servidor, se introdujeron los datos dentro de la hoja de cálculo, quedando de la siguiente forma:

MEASURE:	STATION:	1
Arrival Rate (parts/hr)	r_a	10.000
Arrival CV	c_a^2	0.800
Natural Process Time (hr)	t_0	0.050
Natural Process SCV	c_0^2	1.000
Number of Machines	m	1
MTTF (hr)	m_f	1
MTTR (hr)	m_r	0
Availability	A	1.000
Effective Process Time (failures only)	t_e'	0.050
Eff Process SCV (failures only)	$c_e'^2$	1.000
Batch Size	k	1
Setup Time (hr)	t_s	0.000
Setup Time SCV	c_s^2	0.000
Arrival Rate of Batches	r_a/k	10.000
Eff Batch Process Time (failures+setups)	$t_e = kt_0/A + t_s$	0.050
Eff Batch Process Time Var (failures+setups)	$k*\sigma_0^2/A^2 + 2m_r(1-A)kt_0/A + \sigma_s^2$	0.003
Eff Process SCV (failures+setups)	c_e^2	1.000
Utilization	u	0.500
Departure SCV	c_d^2	0.850
Yield	y	1.000
Final Departure Rate	r_a*y	10.000
Final Departure SCV	$yc_d^2 + (1-y)$	0.850

Figura 4.3 Datos de VUT Calculator con variabilidad media y utilización del 50% Sin Detractores

[Hopp & Spearman, 2001].

De esta manera se realizaron 15 hojas de cálculo *VUT Calculator*, una para cada uno de los escenarios descritos del sistema sin detractores. Cada hoja de cálculo VUT depende de la utilización y de la variabilidad, por lo que si se están ocupando 5 utilidades y 3 niveles de variabilidad, se tienen que representar 15 escenarios distintos. Los resultados arrojados del VUT se presentan como se indica en la siguiente figura.

Utilization	u	0.500
Throughput	TH	10.000
Queue Time (hr)	CT_q	0.045
Cycle Time (hr)	CT_q+t_e	0.095
Cumulative Cycle Time (hr)	$\Sigma_i(\text{CT}_q(i)+t_e(i))$	0.095
WIP in Queue (jobs)	r_aCT_q	0.450
WIP (jobs)	r_aCT	0.950
Cumulative WIP (jobs)	$\Sigma_i(r_a(i)CT(i))$	0.950

Figura 4.4 Resultados de VUT Calculator con variabilidad media y utilización del 50% Sin Detractores [Hopp & Spearman, 2001].

De igual forma se integran los datos obtenidos para un sistema con fallas aleatorias en el *VUT Calculator*, agregando en este caso las horas entre fallas y las horas para reparación, así como el tiempo natural de proceso que le corresponde.

Para este caso de igual forma se realizaron otras 15 hojas de cálculo para cada uno de los escenarios descritos, para cada nivel de variación natural y para cada nivel de utilización aplicado.

Debido a la extensión de estas 30 hojas de cálculo, no es posible integrarlas en este capítulo, por lo que solo se utilizarán los resultados emitidos para presentar un comprimido de dichos resultados en tablas comparativas.

MEASURE:	STATION:	1
Arrival Rate (parts/hr)	r_a	10.000
Arrival CV	c_a^2	0.800
Natural Process Time (hr)	t_0	0.049
Natural Process SCV	c_0^2	1.000
Number of Machines	m	1
MTTF (hr)	m_f	200
MTTR (hr)	m_r	4
Availability	A	0.980
Effective Process Time (failures only)	t_e'	0.050
Eff Process SCV (failures only)	$c_e'^2$	4.139
Batch Size	k	1
Setup Time (hr)	t_s	0.000
Setup Time SCV	c_s^2	0.000
Arrival Rate of Batches	r_a/k	10.000
Eff Batch Process Time (failures+setups)	$t_e = kt_0/A + t_s$	0.050
Eff Batch Process Time Var (failures+setups)	$k*\sigma_0^2/A^2 + 2m_r(1-A)kt_0/A + \sigma_s^2$	0.010
Eff Process SCV (failures+setups)	c_e^2	4.139
Utilization	u	0.500
Departure SCV	c_d^2	1.634
Yield	y	1.000
Final Departure Rate	r_a*y	10.000
Final Departure SCV	$yc_d^2 + (1-y)$	1.634
Utilization	u	0.500
Throughput	TH	10.000
Queue Time (hr)	CT_q	0.123
Cycle Time (hr)	$CT_q + t_e$	0.173
Cumulative Cycle Time (hr)	$\Sigma_i(CT_q(i) + t_e(i))$	0.173
WIP in Queue (jobs)	$r_a CT_q$	1.233
WIP (jobs)	$r_a CT$	1.733
Cumulative WIP (jobs)	$\Sigma_i(r_a(i)CT(i))$	1.733

Figura 4.5 Hoja de cálculo VUT Calculator para un sistema con fallas preemptive, utilización del 50% y variabilidad media [Hopp & Spearman, 2001].

Posteriormente se realizaron en Arena las simulaciones del sistema abierto sus diferentes escenarios tanto en un panorama sin detractores como un panorama con fallas aleatorias. Dentro de los comandos que se utilizan para realizar la simulación se utiliza un Create, el cual establece las llegadas de las piezas al sistema, un Assign de Tiempo de Entrada para contabilizar el tiempo de ciclo de cada pieza, así como un Process el cual tiene la función de simular el

comportamiento de una estación de trabajo, se integran también dos Records tanto para la producción total de las piezas y el tiempo de ciclo de las piezas, y por ultimo se ubica un Dispose, el cual elimina las piezas que salen del sistema, este comando sirve como la salida de las piezas del proceso.

El primer punto es establecer las llegadas de las piezas al sistema conforme se estableció en las hojas de cálculo VUT, como se mencionó anteriormente, para estas simulaciones se utilizará una distribución continua GAMMA, de la cual los parámetros tanto de forma como de escala son calculados mediante el coeficiente cuadrado de variación y el tiempo medio. Esta distribución será utilizada para las llegadas de las piezas al sistema como el tiempo promedio de procesamiento.

Para este sistema se utilizaron los datos de las llegadas fijas, donde $r_a = 10$ pza/hr, $t_a = 0.10$ hr y $c_a^2 = 0.8$ por lo que la distribución gamma queda como sigue:

$$\beta = c_a^2 \cdot t_a$$

$$\alpha = \frac{1}{c_a^2}$$

$$GAMMA (0.8*0.10 , 1|0.8)$$

En el tiempo natural de procesamiento se utiliza la misma distribución continua y el proceso para obtener la distribución es el mismo que se ha descrito, solo que en este caso varía el c_o^2 según el nivel de variabilidad que se está utilizando y el tiempo natural de procesamiento también cambia según la utilización del sistema y si es una simulación con detractores o no. Por ejemplo, en un sistema donde se maneje una utilización del 20%, se tiene un tiempo natural de procesamiento

de 0.020 hr y si se está trabajando en un nivel de variabilidad baja, la distribución gamma queda de la siguiente forma:

$$GAMMA (0.25*0.02 , 1/0.25).$$

Las simulaciones de los sistemas que presentan fallas, se modifica el tiempo natural de procesamiento, ya que éste depende de la disponibilidad de la estación de trabajo, y se agrega la falla tipo *Preemptive* dentro del sistema para realizar la simulación.

Cabe señalar que se corren 100 réplicas de la simulación y cada réplica es de 1000 horas, por lo que el tiempo de simulación es bastante grande. Se realiza de esta forma para tener datos lo más precisos que se pueda y de esta forma obtener un intervalo de confianza que genere un porcentaje de error muy pequeño.

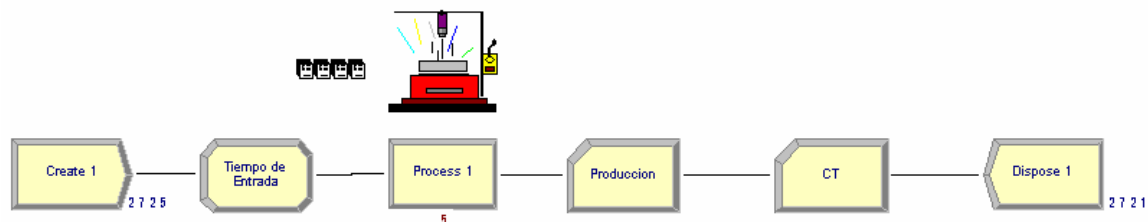


Figura 4.6 Simulación en Arena Sistema Abierto.

De igual forma que la hoja de cálculo *VUT Calculator*, se realizaron 30 simulaciones del proceso, tanto para las diferentes utilizaciones como para los diversos niveles de variabilidad, así como para un sistema sin detractores y un sistema con fallas aleatorias. Los resultados de estas 30 simulaciones se presentan en conjunto con los resultados de las simulaciones realizadas en la hoja de cálculo *VUT Calculator*.

Los resultados de las corridas que se realizaron en Arena, fueron analizados mediante el reporte que emite Arena de Category Overview, en el cual se sintetizan los resultados de las 100 réplicas en uno solo.

4.2.5 Resultados de las Simulaciones de Sistemas Abiertos.

A continuación se presentan las tablas comparativas de los resultados de las simulaciones realizadas en la hoja de cálculo *VUT Calculator* y Arena de los diferentes escenarios planteados para un sistema abierto.

En primer término se presentan los resultados obtenidos del sistema abierto sin detractores. El primer punto de comparación es en el Throughput del sistema.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja				
	VUT	ARENA			% Error
		TH	Limite Inf.	Media	
u - 5%	10	9.9509502	9.969168	9.98738582	0.3083%
u - 20%	10	9.9517822	9.97002	9.98825743	0.2998%
u - 50%	10	9.9419802	9.960594	9.97920792	0.3941%
u - 80%	10	9.9537525	9.971881	9.9900099	0.2812%
u - 95%	10	9.947495	9.965653	9.98381188	0.3435%

$c^2_o=1$	Variabilidad Media				
	VUT	ARENA			% Error
		TH	Limite Inf.	Media	
u - 5%	10	9.9496832	9.96797	9.98625743	0.3203%
u - 20%	10	9.9549901	9.972772	9.99055446	0.2723%
u - 50%	10	9.9433861	9.961218	9.9790495	0.3878%
u - 80%	10	9.9494752	9.964515	9.97955446	0.3549%
u - 95%	10	9.9449604	9.961842	9.97872277	0.3816%

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta				
	VUT	ARENA			% Error
TH		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	10	9.9507129	9.968851	9.9869901	0.3115%
u - 20%	10	9.9525545	9.969723	9.98689109	0.3028%
u - 50%	10	9.9512475	9.969693	9.98813861	0.3031%
u - 80%	10	9.9523267	9.968584	9.98484158	0.3142%
u - 95%	10	9.2674227	9.331134	9.39484536	6.6887%

Tabla 4.5 Comparación de Throughput para Sistemas Abiertos Sin Detractores.

La siguiente tabla muestra el desempeño del Tiempo de Ciclo en el sistema abierto bajo los escenarios ya establecidos.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja				
	VUT	ARENA			% Error
CT		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.005	0.00504319	0.00510701	0.00516927	2.0954%
u - 20%	0.023	0.02191537	0.02235488	0.02274392	2.8049%
u - 50%	0.076	0.07224074	0.07555865	0.07814385	0.5807%
u - 80%	0.248	0.2193	0.2532	0.3025	2.0537%
u - 95%	1.043	1.1176	1.1976	1.2776	12.9092%

$c^2_o=1$	Variabilidad Media				
	VUT	ARENA			% Error
CT		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.005	0.005033	0.00515676	0.00530856	3.0399%
u - 20%	0.025	0.02334471	0.02390789	0.02465431	4.3684%
u - 50%	0.095	0.0878155	0.0926	0.1001	2.5263%
u - 80%	0.368	0.3489	0.3589	0.3689	2.4728%
u - 95%	1.72	1.5914	1.6914	1.7914	1.6628%

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta				
	VUT	ARENA			% Error
CT		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.005	0.00510496	0.00528911	0.00550691	5.4661%
u - 20%	0.027	0.02507423	0.02641454	0.02789895	2.1684%
u - 50%	0.12	0.1058	0.1186	0.1347	1.1667%
u - 80%	0.528	0.5274	0.5374	0.5474	1.7492%
u - 95%	2.622	1.9741	2.6341	3.2941	0.4594%

Tabla 4.6 Comparación de Tiempo de Ciclo para Sistemas Abiertos Sin Detractores.

Los resultados siguientes muestran el comportamiento del Trabajo en Proceso a lo largo de todo el sistema que se está analizando.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.051	0.05047125	0.05142178	0.0530337	0.8202%	
u - 20%	0.226	0.22	0.2251	0.2317	0.3982%	
u - 50%	0.763	0.7205	0.7602	0.8001	0.3670%	
u - 80%	2.48	2.521	2.551	2.581	2.7832%	
u - 95%	10.426	11.275	12.075	12.875	13.6563%	

$c^2_o=1$	Variabilidad Media					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.052	0.05019496	0.05191696	0.05370219	0.1599%	
u - 20%	0.245	0.2309	0.2408	0.2526	1.7143%	
u - 50%	0.95	0.9218	0.9318	0.9418	1.9158%	
u - 80%	3.68	3.5525	3.6125	3.6725	1.8342%	
u - 95%	17.195	16.0436	17.0336	18.0236	0.9386%	

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.054	0.05094769	0.05325446	0.05597523	1.4000%	
u - 20%	0.27	0.2507	0.266	0.283	1.4815%	
u - 50%	1.2	1.1848	1.1948	1.2048	0.4333%	
u - 80%	5.28	5.2824	5.4124	5.5424	2.4462%	
u - 95%	26.22	19.8755	26.3855	32.8955	0.6272%	

Tabla 4.7 Comparación del Trabajo en Proceso para Sistemas Abiertos Sin Detractores.

Estos resultados son el producto de las simulaciones efectuadas tanto en Arena como en *VUT Calculator* donde lo importante es observar el porcentaje de error que pueden tener los datos de VUT con respecto a los resultados que emite Arena.

En cierta forma es difícil visualizar estos resultados tabla por tabla por lo cual se desarrolló una nueva tabla donde se realiza un colofón de toda la información relevante de y se visualiza de una forma más general si los resultados que emite *VUT Calculator* caen dentro del intervalo de confianza que Arena muestra. Esta tabla permitirá tener una mejor apreciación el comportamiento de los resultados que proporciona la hoja de cálculo VUT con un software especializado en simulación de procesos de producción como lo es Arena.

Tabla de Resultados		Simulaciones Sin Detractores									
		u = 5%		u = 20%		u = 50%		u = 80%		u = 95%	
		Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error
$c^2_o = 0.25$	TH	Ok	0.3083%	Ok	0.2998%	Ok	0.3941%	Ok	0.2812%	Ok	0.3435%
	CT	Ok	2.0954%	Ok	2.8049%	Ok	0.5807%	Ok	2.0537%	X	12.9092%
	WIP	Ok	0.8202%	Ok	0.3982%	Ok	0.3670%	Ok	2.7832%	X	13.6563%
$c^2_o = 1$	TH	Ok	0.3203%	Ok	0.2723%	Ok	0.3878%	Ok	0.3549%	Ok	0.3816%
	CT	Ok	3.0399%	Ok	4.3684%	Ok	2.5263%	Ok	2.4728%	Ok	1.6628%
	WIP	Ok	0.1599%	Ok	1.7143%	Ok	1.9158%	Ok	1.8342%	Ok	0.9386%
$c^2_o = 2$	TH	Ok	0.3115%	Ok	0.3028%	Ok	0.3031%	Ok	0.3142%	Ok	6.6887%
	CT	Ok	5.4661%	Ok	2.1684%	Ok	1.1667%	Ok	1.7492%	Ok	0.4594%
	WIP	Ok	1.4000%	Ok	1.4815%	Ok	0.4333%	Ok	2.4462%	Ok	0.6272%

Ok – Porcentaje de Error Bajo.

X – Porcentaje de Error Alto.

Tabla 4.8 Tabla de Resultados de un Sistema Abierto en diversos escenarios.

De esta tabla se aprecia mejor que la mayoría de los resultados emitidos por las simulaciones tanto en Arena como en la hoja de cálculo VUT son muy parecidos, generando porcentajes de error muy pequeños. Existen algunos casos en donde los resultados salieron del intervalo de confianza, en el caso de una utilización casi de un 100% con variabilidad baja, los resultados tanto de Tiempo de Ciclo como de Trabajo en Proceso no concordaron, por lo que no entraron dentro del intervalo de confianza establecido, a pesar de ello el porcentaje de error que presentan no es muy elevado ya que no llega ni a un 15% de error.

El siguiente paso es mostrar los resultados que se obtuvieron para un sistema abierto con detractores, para la elaboración de estos resultados se realizó el mismo procedimiento que se llevó a cabo para un sistema sin detractores. Los resultados se muestran de la misma forma que los anteriores. El primer punto de

esta comparación se desarrolla con el Throughput, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja				
	VUT	ARENA			% Error
		TH	Limite Inf.	Media	
u - 5%	10	9.951	9.968713	9.98642574	0.3129%
u - 20%	10	9.952297	9.969535	9.98677228	0.3047%
u - 50%	10	9.9553168	9.973782	9.99224752	0.2622%
u - 80%	10	9.9468317	9.966208	9.98558416	0.3379%
u - 95%	10	9.9489604	9.966238	9.98351485	0.3376%

$c^2_o=1$	Variabilidad Media				
	VUT	ARENA			% Error
		TH	Limite Inf.	Media	
u - 5%	10	9.952	9.970307	9.98861386	0.2969%
u - 20%	10	9.9442673	9.961455	9.97864356	0.3854%
u - 50%	10	9.9415545	9.959089	9.97662376	0.4091%
u - 80%	10	9.9531683	9.96895	9.98473267	0.3105%
u - 95%	10	9.9508911	9.965208	9.97952475	0.3479%

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta				
	VUT	ARENA			% Error
		TH	Limite Inf.	Media	
u - 5%	10	9.9485446	9.966208	9.98387129	0.3379%
u - 20%	10	9.9564257	9.973337	9.99024752	0.2666%
u - 50%	10	9.9496337	9.965743	9.98185149	0.3426%
u - 80%	10	9.9500396	9.966238	9.98243564	0.3376%
u - 95%	10	9.2170103	9.321237	9.42546392	6.7876%

Tabla 4.9 Resultados del Throughput de las simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.

El siguiente punto muestra el desempeño del Tiempo de Ciclo total para un sistema abierto con detractores.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja				
	VUT	ARENA			% Error
		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
CT					
u - 5%	0.009	0.03477714	0.04661858	0.05464103	80.6944%
u - 20%	0.042	0.0608321	0.07171339	0.08219802	70.7462%
u - 50%	0.155	0.1282	0.153	0.1734	1.2903%
u - 80%	0.481	0.4275	0.4375	0.4475	9.0437%
u - 95%	2.513	1.629	1.709	1.789	31.9936%

$c^2_o=1$	Variabilidad Media				
	VUT	ARENA			% Error
		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
CT					
u - 5%	0.009	0.03605648	0.04677778	0.05420999	80.7601%
u - 20%	0.044	0.05939454	0.07264554	0.08435298	39.4319%
u - 50%	0.173	0.1452	0.1692	0.1991	2.1965%
u - 80%	0.68	0.5298	0.5398	0.5498	20.6176%
u - 95%	3.184	1.9535	2.0535	2.1535	35.5057%

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta				
	VUT	ARENA			% Error
		Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
CT					
u - 5%	0.009	0.03459023	0.04645806	0.05478025	80.6277%
u - 20%	0.047	0.06156686	0.07494854	0.088153	59.4650%
u - 50%	0.198	0.1606	0.1963	0.2312	0.8586%
u - 80%	0.84	0.6936	0.7136	0.7336	15.0476%
u - 95%	4.079	2.2767	2.8567	3.4367	29.9657%

Tabla 4.10 Resultados del Tiempo de Ciclo total de las simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos del Trabajo en Proceso total para un sistema abierto con detractores.

$c^2_o=0.25$	Variabilidad Baja					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.093	0.4594	0.4694	0.4794	80.1875%	
u - 20%	0.422	0.7121	0.7221	0.7321	41.5593%	
u - 50%	1.546	1.5216	1.5416	1.5616	0.2846%	
u - 80%	5.607	4.3145	4.4045	4.4945	21.4464%	
u - 95%	25.131	16.3458	17.2258	18.1058	31.4560%	

$c^2_o=1$	Variabilidad Media					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.094	0.4611	0.4711	0.4811	80.0467%	
u - 20%	0.441	0.7209	0.7309	0.7409	39.6634%	
u - 50%	1.733	1.6818	1.7018	1.7218	1.8003%	
u - 80%	6.804	5.3265	5.4365	5.5465	20.0985%	
u - 95%	31.843	19.6433	20.6833	21.7233	35.0460%	

$c^2_o=2$	Variabilidad Alta					
	WIP	VUT	ARENA			% Error
			Limite Inf.	Media	Limite Sup.	
u - 5%	0.095	0.4576	0.4676	0.4776	79.6835%	
u - 20%	0.466	0.7449	0.7549	0.7649	38.2700%	
u - 50%	1.983	1.9461	1.9761	2.0061	0.3480%	
u - 80%	8.4	6.9945	7.1845	7.3745	14.4702%	
u - 95%	40.793	23.0367	28.8367	34.6367	29.3097%	

Tabla 4.11 Resultados del Inventario en Proceso total de las simulaciones realizadas en un sistema abierto Con Detractores.

De igual forma que se realizó con el sistema abierto sin detractores, se realizó una tabla comparativa de los resultados de las 15 simulaciones realizadas tanto en la hoja de cálculo VUT como en Arena. La tabla muestra la siguiente información:

Tabla de Resultados		Simulaciones Con Detractores									
		u = 5%		u = 20%		u = 50%		u = 80%		u = 95%	
		Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error	Status	% Error
$c_o = 0.25$	TH	Ok	0.3129%	Ok	0.3047%	Ok	0.2622%	Ok	0.3379%	Ok	0.3376%
	CT	X	80.6944%	X	70.7462%	Ok	1.2903%	Ok	9.0437%	X	31.9936%
	WIP	X	80.1875%	X	41.5593%	Ok	0.2846%	X	21.4464%	X	31.4560%
$c_o = 1$	TH	Ok	0.2969%	Ok	0.3854%	Ok	0.4091%	Ok	0.3105%	Ok	0.3479%
	CT	X	80.7601%	X	39.4319%	Ok	2.1965%	X	20.6176%	X	35.5057%
	WIP	X	80.0467%	X	39.6634%	Ok	1.8003%	X	20.0985%	X	35.0460%
$c_o = 2$	TH	Ok	0.3379%	Ok	0.2666%	Ok	0.3426%	Ok	0.3376%	Ok	6.7876%
	CT	X	80.6277%	X	59.4650%	Ok	0.8586%	X	15.0476%	X	29.9657%
	WIP	X	79.6835%	X	38.2700%	Ok	0.3480%	X	14.4702%	X	29.3097%

Ok – Porcentaje de Error Bajo.

X – Porcentaje de Error Alto.

Tabla 4.12 Tabla de Resultados de un Sistema Abierto Con Detractores en diversos escenarios.

En este caso el panorama es completamente diferente al panorama de un sistema sin fallas, la situación sale de sus parámetros ya que la mayoría de los resultados de la hoja de cálculo VUT no entraron dentro de los intervalos de confianza que maneja Arena. La única excepción es el caso de una utilización del 50% en todos los niveles de variabilidad, donde todos los resultados entraron dentro de los intervalos. Se puede hacer mención que el caso de una utilización del 80%, los resultados tienen un porcentaje de error en promedio de un 17%. La situación es alarmante, ya que los resultados no coinciden en algunos casos con hasta un 80% de error. El siguiente paso es hacer las comparaciones de las herramientas computacionales ocupando sistemas cerrados.

4.3 Aplicación de la Metodología a un Sistema Cerrado.

Los sistemas cerrados o sistemas de inventario en proceso constante, se distinguen por ser sistemas muy estables, en este caso se evita que las piezas se acumulen en grandes tamaños de colas provocando así una explosión del inventario en proceso que genera una dramática elevación del tiempo de ciclo total, este tipo de sistemas mantiene el inventario en proceso constante y permite trabajar con una mayor facilidad y detectar más rápidamente los defectos y así hacer acciones correctivas y preventivas.

4.3.1 Definición del Problema.

Teniendo como base los resultados arrojados por las simulaciones hechas a un sistema abierto, se toman las conclusiones de éste sistema para definir un escenario óptimo para realizar las simulaciones. En este caso al ser sistemas cerrados se ocupa la hoja de cálculo *CONWIP Calculator* y el software de simulación Arena.

De manera de realizar un proceso de comparación de resultados que se asemeje más a una línea de producción, se decide utilizar un sistema con cinco estaciones de trabajo, todas con el mismo tiempo natural de procesamiento y con el mismo nivel de variabilidad. En este caso se utiliza un tiempo natural de proceso de 0.080 horas y un nivel medio de variabilidad con un coeficiente cuadrado de variación natural de 1.

Igual que el proceso anterior, se realizara una simulación sin detractores y otra simulación agregando algún tipo de falla. Para este caso se ocupara una falla de tipo Wait, donde se realiza un conteo de piezas y se procese a ejecutar un tiempo de preparación. Estas fallas son similares a utilizar un set up o un cambio de herramienta cada vez que se hayan procesado un cierto número de piezas.

4.3.2 Identificación de Variables y Parámetros.

Las variables de entrada a los sistemas a simular como se mencionó en el inciso anterior, es el tiempo natural de procesamiento y el coeficiente cuadrado natural de variación.

- $t_0 = 0.08$ hrs.
- $c_o^2 = 1$.

Se utilizan estos valores tomando como referencia que para una un tiempo de 0.08 horas y un nivel medio de variabilidad, los resultados de la simulación de sistemas abiertos fueron satisfactorios.

Un punto importante a señalar será el uso de una falla tipo de tiempo de preparación o cambio de herramienta. En la cual se define un número de piezas que son procesadas para que el tiempo de set up tenga lugar, además que se establece un coeficiente cuadrado de variación de éste set up.

Falla tipo Wait (Set Up)	
Número de piezas a procesar antes de que ocurra el set up	$N_s = 100$ pzas.
Tiempo de set up	$t_s = 2$ hrs.
Coeficiente cuadrado de variación	$c_s^2 = 1$

Tabla 4.13 Parámetros del tipo de falla wait.

Las variables de salida o los resultados que se deben monitorear y que describirán el comportamiento del sistema son:

- Tiempo de ciclo de cada estación dentro del sistema a un cierto nivel de inventario en proceso.
- Tiempo de ciclo total del sistema a un cierto nivel de inventario en proceso, el cual es la sumatoria de los tiempos de ciclo de las estaciones de trabajo.
- Throughput para un cierto nivel de inventario en proceso.

4.3.3 Simulación de Sistemas Cerrados.

El primer paso es introducir los valores en la hoja de cálculo *CONWIP Calculator* tanto la simulación para un sistema sin detractores como una simulación para un sistema con detractores.

La simulación de la hoja de cálculo *CONWIP Calculator* para un sistema sin fallas se realiza como se indica la siguiente figura.

MEASURE:	STATION:		1	2	3	4	5
Natural Process Time (hr)	t_0		0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
Natural Process CV	c_0^2		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Number of Machines	m		1	1	1	1	1
MTTF (hr)	m_f		100	100	100	100	100
MTTR (hr)	m_r		0	0	0	0	0
Availability	A		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Effective Process Time (failures only)	t_e'		0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
Eff Process CV (failures only)	$c_e'^2$		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Jobs Between Setups	N_s		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Setup Time (hr)	t_s		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Setup Time CV	c_s^2		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Eff Process Time (failures+setups)	t_e		0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
Eff Station Rate	r_e		12.500	12.500	12.500	12.500	12.500
Eff Process Time Var (failures+setups)	σ_e^2		0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
Eff Process CV (failures+setups)	c_e^2		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Figura 4.7 Variables de entrada para un sistema cerrado de 5 estaciones en *CONWIP Calculator* [Hopp & Spearman, 2001].

Como se aprecia en la figura se trata de un sistema de cinco estaciones de trabajo, no existen fallas ya que la disponibilidad de las estaciones es al 100% y no hay tiempo de preparación.

Un punto importante a resaltar son los valores críticos que CONWIP arroja, como lo son la tasa cuello de botella (r_b), el tiempo de procesamiento neto (T_o) y el inventario en proceso crítico (WIP_o).

r_b	12.500
T_0	0.400
W_0	5.000

Figura 4.8 Valores críticos del sistema en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].

Los resultados que proporciona el *CONWIP Calculator* se muestran en la siguiente figura.

w	TH Actual	CT Actual	CT ₁ (w)	CT ₂ (w)	CT ₃ (w)	CT ₄ (w)	CT ₅ (w)
1	2.500	0.400	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
2	4.167	0.480	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
3	5.357	0.560	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112
4	6.250	0.640	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
5	6.944	0.720	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144
6	7.500	0.800	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
7	7.955	0.880	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176
8	8.333	0.960	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192
9	8.654	1.040	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208
10	8.929	1.120	0.224	0.224	0.224	0.224	0.224
11	9.167	1.200	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
12	9.375	1.280	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
13	9.559	1.360	0.272	0.272	0.272	0.272	0.272
14	9.722	1.440	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288
15	9.868	1.520	0.304	0.304	0.304	0.304	0.304
16	10.000	1.600	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320
17	10.119	1.680	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336
18	10.227	1.760	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352
19	10.326	1.840	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368
20	10.417	1.920	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
21	10.500	2.000	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
22	10.577	2.080	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416

Figura 4.9 Resultados de un Sistema Cerrado sin detractores en *CONWIP Calculator* [Hopp & Spearman, 2001].

De igual forma se sigue el mismo proceso para realizar los cálculos del sistema cerrado en *CONWIP Calculator* para sistemas con detractores. Como se indicó anteriormente se utiliza un tipo de falla set up.

MEASURE:	STATION:		1	2	3	4	5
Natural Process Time (hr)	t_0		0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
Natural Process CV	c_0^2		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Number of Machines	m		1	1	1	1	1
MTTF (hr)	m_f		100	100	100	100	100
MTTR (hr)	m_r		0	0	0	0	0
Availability	A		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Effective Process Time (failures only)	t_e'		0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
Eff Process CV (failures only)	$c_e'^2$		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Jobs Between Setups	N_s		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Setup Time (hr)	t_s		2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Setup Time CV	c_s^2		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Eff Process Time (failures+setups)	t_e		0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Eff Station Rate	r_e		10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Eff Process Time Var (failures+setups)	σ_e^2		0.086	0.086	0.086	0.086	0.086
Eff Process CV (failures+setups)	c_e^2		8.600	8.600	8.600	8.600	8.600
	r_b	10.000					
	T_0	0.500					
	W_0	5.000					
	TH	CT					
w	Actual	Actual	$CT_1(w)$	$CT_2(w)$	$CT_3(w)$	$CT_4(w)$	$CT_5(w)$
1	2.000	0.500	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
2	2.041	0.980	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196
3	2.758	1.088	0.218	0.218	0.218	0.218	0.218
4	3.021	1.324	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
5	3.392	1.474	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295
6	3.649	1.644	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329
7	3.904	1.793	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359
8	4.120	1.942	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
9	4.321	2.083	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417
10	4.502	2.221	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444
11	4.670	2.355	0.471	0.471	0.471	0.471	0.471
12	4.825	2.487	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497
13	4.968	2.617	0.523	0.523	0.523	0.523	0.523
14	5.102	2.744	0.549	0.549	0.549	0.549	0.549
15	5.228	2.869	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574
16	5.345	2.993	0.599	0.599	0.599	0.599	0.599
17	5.456	3.116	0.623	0.623	0.623	0.623	0.623
18	5.561	3.237	0.647	0.647	0.647	0.647	0.647
19	5.660	3.357	0.671	0.671	0.671	0.671	0.671
20	5.755	3.475	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695
21	5.844	3.593	0.719	0.719	0.719	0.719	0.719
22	5.929	3.710	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742
23	6.011	3.827	0.765	0.765	0.765	0.765	0.765

Figura 4.10 Sistema Cerrado con detractores en CONWIP Calculator [Hopp & Spearman, 2001].

El siguiente paso es realizar dichas simulaciones en Arena de manera de poder comparar los diversos escenarios propuestos para la simulación de sistemas cerrados.

Para realizar la simulación en Arena, se tomó como base las simulaciones realizadas para los sistemas abiertos, ocupando los mismos elementos como un Create, donde solo se crea una pieza o un trabajo con un cierto nivel de WIP, un Process para cada estación de trabajo, se utiliza un Separate que ayuda a realizar la función de tandem para un sistema cerrado, propiciado así el elemento más importante dentro de una simulación de este tipo, se ubican los Records que se utilizan y un Dispose.

De igual forma se utiliza la distribución continua Gamma para definir el comportamiento tanto de los procesos como de la falla que se agrega a los procesos con detractores.

Así que se integra la simulación en Arena la cual se muestra en la siguiente figura.

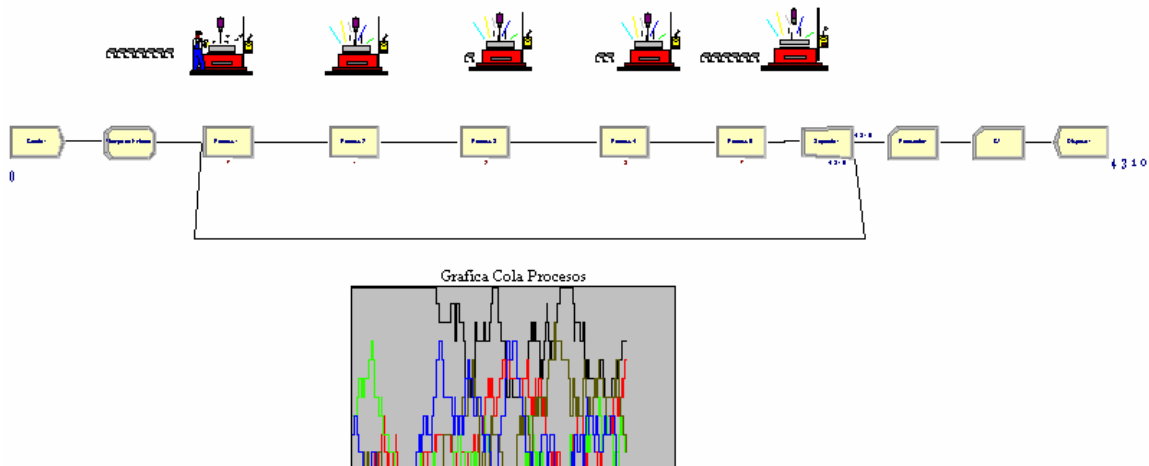


Figura 4.11 Simulación en Arena de un sistema cerrado tipo CONWIP.

4.3.4 Resultados de las Simulaciones de los Procesos Cerrados.

Después de haber realizado las simulaciones tanto en Arena como en *CONWIP Calculator* es necesario conjuntar todos los resultados de manera de observar si existe alguna disparidad en dichos resultados. De igual forma las simulaciones

hechas en Arena, se corrieron por 1000 horas y se obtuvieron 100 réplicas, se realiza de esta forma para obtener un intervalo de confianza aceptable.

Los resultados de las simulaciones de un sistema cerrado sin detractores se presentan en la siguiente tabla.

Simulación Sin Detractores						
	CONWIP	ARENA			% Error	Status
		Limite Inf.	Media	Limite Sup.		
WIP	5	-	5	-	0%	Ok
TH	6.944	6.9290396	6.938277	6.94751485	0.0824%	Ok
CT	0.72	0.7018	0.7135	0.7252	0.9028%	Ok
CT₁	0.144	0.1341	0.1425	0.1509	1.0417%	Ok
CT₂	0.144	0.1346	0.1423	0.1501	1.1806%	Ok
CT₃	0.144	0.1356	0.1428	0.1495	0.8333%	Ok
CT₄	0.144	0.1332	0.1429	0.1499	0.7639%	Ok
CT₅	0.144	0.1374	0.143	0.1493	0.6944%	Ok
WIP	30	-	30	-	0%	Ok
TH	11.029	10.994139	11.00723	11.0203168	0.1974%	Ok
CT	2.72	2.6464	2.6986	2.7307	0.7868%	Ok
CT₁	0.544	0.5264	0.5364	0.5464	1.3971%	Ok
CT₂	0.544	0.5348	0.5448	0.5548	0.1471%	Ok
CT₃	0.544	0.531	0.541	0.551	0.5515%	Ok
CT₄	0.544	0.5249	0.5349	0.5449	1.6728%	Ok
CT₅	0.544	0.5315	0.5415	0.5515	0.4596%	Ok

Ok – Dentro del Intervalo de Confianza.

X – Fuera del Intervalo de Confianza.

Tabla 4.14 Resultados de un Sistema Cerrado sin detractores.

Se utilizó un nivel de inventario en proceso de 5 piezas ya que este valor es el indicado como WIP crítico y un nivel de 30 piezas solo para observar si los resultados obtenidos seguían estando dentro del intervalo de confianza.

Los resultados de las simulaciones para un sistema cerrado con un tipo de falla de set up, se muestran en la siguiente tabla.

Simulación Con Detractores						
	CONWIP	ARENA			% Error	Status
		Limite Inf.	Media	Limite Sup.		
WIP	5	-	5	-	0%	Ok
TH	3.392	4.3328812	4.365703	4.39852475	22.3035%	X
CT	1.474	1.1256	1.1356	1.1456	22.9579%	X
CT₁	0.295	0.1901	0.2281	0.2834	22.6780%	X
CT₂	0.295	0.1797	0.2305	0.2813	21.8644%	X
CT₃	0.295	0.1698	0.2259	0.2793	23.4237%	X
CT₄	0.295	0.1834	0.2257	0.2814	23.4915%	X
CT₅	0.295	0.1816	0.2254	0.2814	23.5932%	X
WIP	10	-	10	-	0%	Ok
TH	4.502	5.147703	5.18602	5.22433663	13.1897%	X
CT	2.221	1.9018	1.9118	1.9218	13.9217%	X
CT₁	0.444	0.3738	0.3838	0.3938	13.5586%	X
CT₂	0.444	0.3699	0.3799	0.3899	14.4369%	X
CT₃	0.444	0.3759	0.3859	0.3959	13.0856%	X
CT₄	0.444	0.3717	0.3817	0.3917	14.0315%	X
CT₅	0.444	0.3706	0.3806	0.3906	14.2793%	X
WIP	20	-	20	-	0%	Ok
TH	5.755	5.9002277	5.946426	5.99262376	3.2192%	X
CT	3.475	3.3053	3.3353	3.3653	4.1885%	X
CT₁	0.695	0.653	0.663	0.673	4.8265%	X
CT₂	0.695	0.6562	0.6662	0.6762	4.3230%	X
CT₃	0.695	0.6459	0.6659	0.6859	4.3700%	X
CT₄	0.695	0.6638	0.6738	0.6838	3.1463%	X
CT₅	0.695	0.6463	0.6663	0.6863	4.3074%	X
WIP	30	-	30	-	0%	Ok
TH	6.491	6.4175842	6.467584	6.51758416	0.3607%	Ok
CT	4.622	4.5596	4.5996	4.6396	0.4846%	Ok
CT₁	0.924	0.8996	0.9196	0.9396	0.4762%	Ok
CT₂	0.924	0.8881	0.9081	0.9281	1.7208%	Ok
CT₃	0.924	0.9069	0.9269	0.9469	0.3129%	Ok
CT₄	0.924	0.9199	0.9399	0.9599	1.6917%	Ok
CT₅	0.924	0.8853	0.9053	0.9253	2.0238%	Ok

Ok – Dentro del Intervalo de Confianza.

X – Fuera del Intervalo de Confianza.

Tabla 4.15 Resultados de un Sistema Cerrado con detractores.

Similar a un sistema abierto, cuando se realizan simulaciones con detractores, los resultados varían de una herramienta a otra y es cuando se presentan resultados que salen del intervalo de confianza. En este caso se utilizaron niveles de WIP de 5, 10, 20 y 30 piezas, se agregaron dos niveles de WIP más que a los sistemas sin detractores ya que era necesario observar el cambio paulatino de los resultados obtenidos.

De esta forma se aprecia que el porcentaje de error para un sistema cerrado con una falla de Set Up, va disminuyendo conforme se agrega más inventario en proceso en el sistema, haciendo que el sistema sea más estable y se comporte de una forma ya prevista.

Siendo en este caso, el comportamiento del sistema se va haciendo más estable conforme existan más piezas en procesamiento, ya que cuando se realiza la simulación con 5 piezas en el sistema, el porcentaje de error es mayor a un 20%, si la simulación se realiza con 10 piezas, el porcentaje de error disminuye a un 14%, si se aumenta el número de piezas a 20, el porcentaje de error vuelve a disminuir obteniendo un 4% de error, cuando se agregan otras 10 piezas y se complementan 30 piezas en el sistema, el porcentaje de error es ahora de un 1% en promedio, indicando que va existiendo una relación entre los resultados que arroja Arena y los resultados de la calculadora *CONWIP Calculator*.

VI. BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA

[Womack, 1991] Womack James, Jones Daniel y Roos Daniel, *"The Machine that Change the World"*, Harper Collins Publishers, Estados Unidos 1991.

[Gallego, 2000] Gallego Loaiza Paula Andrea, *"Metodología para la Implementación de la Manufactura Esbelta en la Pequeña y Mediana Empresa"*, Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México 2000.

[Shingo, 1990] Shingo Shigeo, *"El Sistema de Producción de Toyota Desde el Punto de Vista de la Ingeniería"*, Productivity Prees, Estados Unidos, 1993.

[González, 1998] González de la Torre José Edmundo, *"Metodología para Implementar Sistemas de Manufactura Esbelta en Operaciones de Ensamble"*, Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México 1998.

[Villareal, 1999] Villareal García Juan, *"Desarrollo de una Metodología para la Aplicación de la Reingeniería Rápida a la PYME"*, Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México 1999.

[Azarang y García, 1996] Azarang Mohammad y García Dunna Eduardo, *"Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos"*, McGraw-Hill, México 1996.

[Askin, 1993] Askin Ronald y Standridge Charles, *"Modeling and Analysis of Manufacturing Systems"*, John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos, 1993.

[Arellano, 2001] Arellano Ramírez Claudia Selene, *"Investigación Exploratoria de los Elementos que Intervienen en el Desarrollo de la Logística Esbelta en el Sector Automotriz"* Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México 2001.

BIBLIOGRAFÍA

[Hernández, 2002] Hernández Escanero Nadia Guadalupe, "*Metodología para la Implementación de un Sistema Esbelto en Base a los Principales Conceptos de la Manufactura Esbelta, Seis Sigma y Teoría de las Restricciones*", Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México.

[Womack, 1994] Womack James y Jones Daniel, "*From Lean Production to the Lean Enterprise*", Harvard Business Review, Estados Unidos, 1994.

[Womack, 1996] Womack James y Jones Daniel "*Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in your Corporation*", Simon & Schuter, Estados Unidos, 1996.

[Moore, 1998] Moore Richard y Scheinkopf Lisa, "*Theory of Constrains and Lean Manufacturing: Friend or Foes?*", Chesapeake Consulting Inc., Estados Unidos, 1998.

[De León, 2001] De León Peña Marcos Eduardo, "*Metodología para la Implementación de un Sistema de Manufactura Esbelta Bajo un Enfoque de Teoría de Restricciones*", Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México, 2001.

[Página Web 1] Mid-America Manufacturing Technology Center (MAMTC), <http://www.mamtc.com/lean/index.asp>

[Página Web 2] Lean Enterprise Institute, <http://www.lean.org>

[Página Web 3] Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management, <http://www.factoryphysics.net/factoryphysics/index.html>

BIBLIOGRAFÍA

[Hopp & Spearman, 2001] Hopp Wallace & Spearman Mark, "*Factory Physics*", McGraw-Hill, Estados Unidos, 2001.

[Vera, 1997] Vera Zorrilla Pablo, "*Sistema para Simulación de Eventos Discretos*", Tesis de pos grado, ITESM, Monterrey, N.L., México, 1997.

[Spearman, 2002] Spearman Mark, "*What is Lean?*", White Paper, Factory Physics, Inc., Estados Unidos, 2002.

[Spearman, 2002] Spearman Mark, "*Making Lean Work in your Plant*", White Paper, Factory Physics, Inc., Estados Unidos, 2002.

[Spearman, 2003] Spearman Mark, "*The Culmination of over 100 years of Operations Productivity Improvement Initiatives*", White Paper, Factory Physics, Inc., Estados Unidos, 2003.

[Rother & Shook, 1998] Rother Mike & Shook John, "*Learning to See. Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*", A lean tool kit method and workbook, The Lean Enterprise Institute, Estados Unidos 1998.

[Goldratt, 1999] Goldratt Eliyahu, "*La Meta*", Ediciones Castillo S.A. de C.V., México, 1999.

[Banks, 2001] Banks Jerry, Carson II John, Nelson Barry y Nicol David, "*Discrete Event System Simulation*" Editorial Prentice may, Estados Unidos, 2001.

[Law, 1991] Law Averill y Kelton W. David, "*Simulation Modeling & Analysis*", Editorial McGraw-Hill International, Estados Unidos, 1991.

BIBLIOGRAFÍA

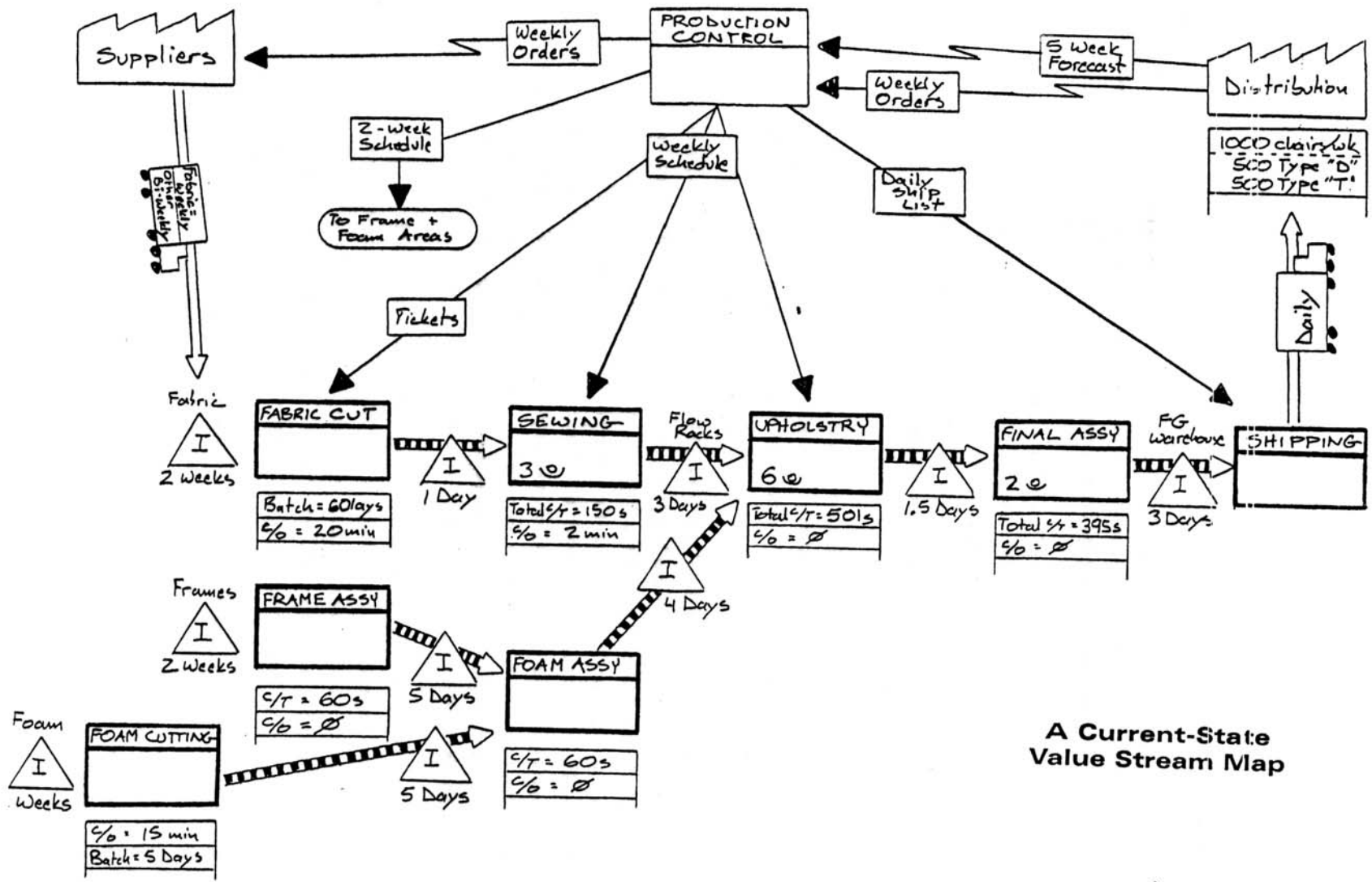
[Kelton, 2004] Kelton W. David, Sadowski Randall y Sturrock David, "*Simulation with Arena*" Editorial McGraw-Hill International, Estados Unidos, 2004.

[Whitt, 1998] Ward Whitt, "*An Interpolation Approximation for the Mean Workload in a G/G/1 Queue*", White Paper, Operations Research ABI/INFORM Global, Estados Unidos, Noviembre – Diciembre de 1998.

VII. ANEXOS.

7.1 Mapa de Cadena de Valor Estado Actual.

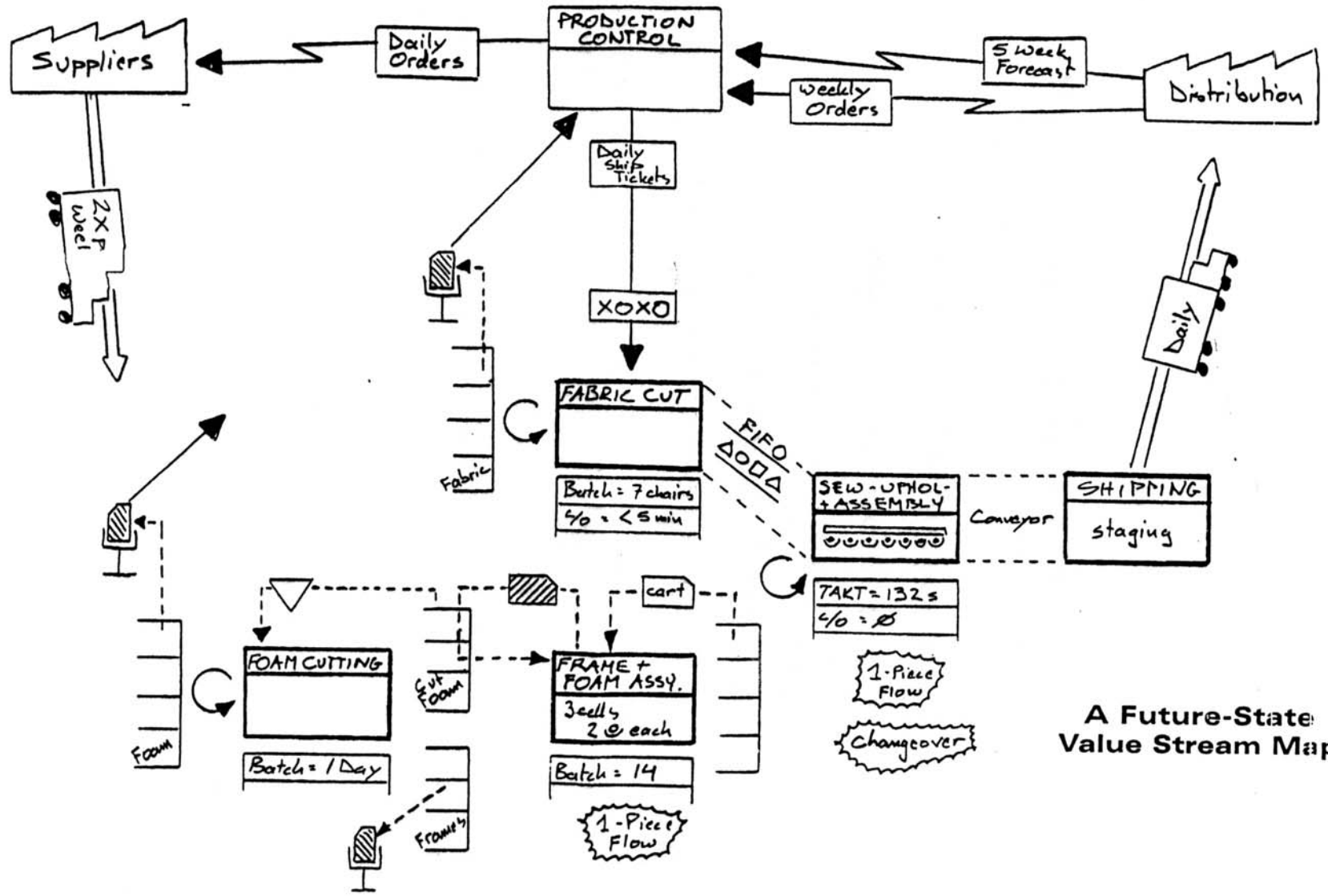
Mapa de la cadena de valor de un estado actual de un sistema de producción [Rother & Shook, 1998].



A Current-State Value Stream Map

7.2 Mapa de Cadena de Valor del Estado Ideal o Futuro.

Mapa de cadena de valor del estado futuro o ideal [Rother & Shook, 1998].



A Future-State Value Stream Map