

UNIVERSIDAD PANAMERICANA  
*CAMPUS GUADALAJARA*

**"LA OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES COMO  
METODOLOGÍA PARA ELEVAR LA COMPETITIVIDAD DE  
LAS EMPRESAS EN MÉXICO "**

**IVÁN FERNANDO RODRÍGUEZ HUERTA**

Tesis presentada para optar por el grado de  
**Maestro en Ingeniería**  
Con Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios de la  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,  
según acuerdo número 2006098 con fecha 28-II-06.

Zapopan, Jal., Diciembre del 2009



UNIVERSIDAD PANAMERICANA  
*CAMPUS GUADALAJARA*

**DICTAMEN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO**

SR. IVÁN FERNANDO RODRÍGUEZ HUERTA

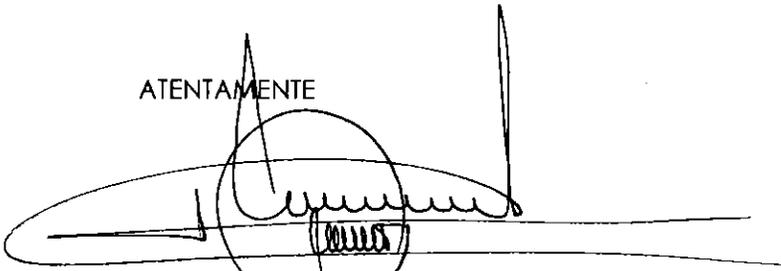
Presente.

En mi calidad de presidente de la Comisión de Exámenes de Grado, y después de haber analizado el trabajo de titulación presentado por usted en la alternativa de **TESIS**, titulada:

**"LA OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES COMO METODOLOGÍA PARA ELEVAR LA COMPETITIVIDAD DE LAS EMPRESAS EN MÉXICO"**

Le manifiesto que reúne los requisitos a que obligan los reglamentos en vigor para ser presentado ante el H. Jurado del Examen de Grado, por lo que deberá de entregar siete ejemplares como parte de su expediente al solicitar el examen.

ATENTAMENTE



ING. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ BELMONTE  
PRESIDENTE DE LA COMISIÓN



UNIVERSIDAD PANAMERICANA  
*CAMPUS GUADALAJARA*

Noviembre 15 del 2009

ING. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ BELMONTE  
**PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE EXÁMENES DE GRADO**  
P R E S E N T E .

Me permito hacer de su conocimiento que **IVÁN FERNANDO RODRÍGUEZ HUERTA**, de la Maestría en Ingeniería, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de titulación con la alternativa de TESIS, titulada:

**"LA OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES COMO METODOLOGÍA PARA ELEVAR LA COMPETITIVIDAD DE LAS EMPRESAS EN MÉXICO"**

Manifiesto que, después de haber sido dirigida y revisada previamente, reúne todos los requisitos técnicos para solicitar fecha de Examen de Grado.

Agradezco de antemano la atención prestada y me pongo a sus órdenes para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE



MTRO. MIGUEL ÁNGEL MORENO MIGUEZ  
ASESOR DE TESIS

## DEDICATORIA

Entra y mira,  
verás que no es el caos lo que rige las cosas de este mundo;  
es, si acaso, la complejidad.

Entra y escucha,  
Entre el estruendo distinguirás un leve ritmo;  
Es bálsamo para el corazón de los escépticos.

Dedico el presente proyecto de investigación  
a quien con su diaria labor inspira la creación de valor  
en todas sus formas y representaciones,  
a quienes construyen los nuevos paradigmas de acción  
que posicionan la mente y el espíritu en el nivel  
de excelencia para el que han sido creados

## **AGRADECIMIENTOS**

Valga el presente párrafo para agradecer  
en lo que es justo,  
las diversas formas de colaboración  
de mis compañeros de viaje,  
personas que han compartido su ser y su conocimiento,  
sin su contribución, esta tesis hubiera sido otra

A ti Señor, que me creaste

A ti madre, que con tu ejemplo de plenitud,  
forjaste un ser siempre en busca de la excelencia

A Uds. hermanos que me han  
acompañado siempre y juntos hemos  
formado una familia

## INDICE

JUSTIFICACION	i
OBJETIVOS	ii
HIPOTESIS	iii
METODOLOGIA DE INVESTIGACION	iv
INTRODUCCION	1
PRIMERA PARTE: <i>“Planteamiento, programación y solución del modelo de optimización de la planeación de la producción a través de programación matemática”</i>	8
1. CAPITULO I: Marco de referencia y conocimientos existentes en la materia	9
1.1. Enfoques de creación de modelos de planeación	12
1.1.1. Investigación operativa	12
1.1.2. Técnicas de búsqueda	12
1.1.3. Razonamiento basado en restricciones	12
1.2. Definición general del problema	12
1.2.1. Elementos del problema	12
1.2.2. Restricciones	13
1.2.3. Objetivo	13

1.2.4.	Ejemplo Tipo	13
1.2.5.	Solución	13
1.3.	Modelos CSP (Communicatytions Sequential Processes)	14
1.3.1.	Modelos de puntos de tiempo	14
1.3.2.	Modelo PCP (Precedent Constraint Posting)	14
1.3.3.	Técnicas de consistencia: uso de propagadores	15
1.3.4.	Uso de heurísticas	15
1.3.5.	Análisis de restricciones	15
1.3.6.	Algoritmo PCP	16
1.3.7.	Programación de restricciones	16
1.3.8.	Esquema dedge Finding	17
1.3.9.	Herísticas	17
2.	CAPITLO II: Introducción al planteamiento del modelo	20
2.1.	Representación del cromosoma	26
2.2.	Selección	26
2.3.	Recombinación	27
2.4.	Mutación	29
2.5.	Modificar la población actual	31

2.6. Programación Lineal	33
3. CAPITULO III: Planteamiento del Modelo Matemático	38
3.1. Situación actual	38
3.2. Estructura de datos	44
3.3. Diagrama del proceso	45
3.4. Representación gráfica del modelo conceptual	46
3.5. Objetivo del Modelo	47
3.6. Datos de entrada	47
3.7. Variables de decisión	48
3.8. Restricciones	51
3.9. Función Objetivo	55
3.10. Método de optimización	59
3.11. Flujo del Modelo	60
4. CAPITULO IV: Resultados del modelo y conclusiones de la primera parte	61
SEGUNDA PARTE: <i>“Diseño de solución e implementación de manufactura esbelta”</i>	68
5. CAPITULO V: Marco Teórico	71

5.1. Introducción	71
5.2. Los sistemas productivos	73
5.2.1. Talleres funcionales o job-shops	74
5.2.2. Líneas de flujo desconectadas	74
5.2.3. Líneas de flujo conectadas	74
5.2.4. Proceso de flujos continuos	75
5.3. Evolución histórica de los sistemas productivos	76
5.3.1. La producción artesana	76
5.3.2. La producción en masa	78
5.3.3. La producción esbelta	81
5.3.3.1. Cadena de suministro	84
5.3.3.2. Ingeniería de producto	85
5.3.3.3. Demanda del consumidor	86
5.3.3.4. Trato con los clientes	86
5.4. Los principios de la producción esbelta	86
5.4.1. Evolución de la producción esbelta	88
5.4.2. Las claves de la producción esbelta: El pensamiento esbelto	91
5.5. Resultados alcanzados por la producción esbelta	94
5.5.1. La industria de la automoción	94
5.5.1.1. Etapa inicial (1960-1990)	95

5.5.1.2. Segunda etapa (1990-1995)	96
5.5.1.3. Tercera etapa (1995-2005)	97
5.5.2. Otros sectores manufactureros	101
5.5.3. Necesidad del sector en México	110
5.5.4. Resumen de los resultados alcanzados	113
5.6. Resumen	115
6. CAPITULO VI: Implementación de un sistema de producción de manufactura esbelta a través de la técnica del Value Stream Management en Planta de Manufactura Metalmecánica	118
6.1. Introducción	118
6.2. Selección del caso	121
6.3. Definición	128
6.3.1. Problema	128
6.3.2. Objetivos del proyecto	130
6.3.3. Definición del equipo de trabajo	131
6.3.4. Project Charter	132
6.3.5. Layout Inicial	133
6.3.6. Value Stream Mapping	134
6.3.7. Definición de plan de acción	136

6.3.8. Cadena de valor futura	137
6.3.9. Definición de nuevo Layout	138
6.3.10. Ilustración gráfica de la transformación	139
6.3.11. Presentación de resultados	143
6.4. Comentarios finales	152
CONCLUSIONES	155
GLOSARIO DE TERMINOS	164
BIBLIOGRAFIA	173
ANEXOS	176

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 – Flujograma de Metodología de Investigación	
Figura 2 – División de una Actividad Industrial según Tompkins	4
Figura 3 – Sistema de planta industrial y subsistemas que lo conforman según Muther	5
Figura 4 – Representación Grafica del Makespan	13
Figura 5 – Representación Modelo PCP	14
Figura 6 – Representación Restricciones CBA	16
Figura 7 – Representación Algoritmo PCP	16
Figura 8 – Esquema Edge Finding	17
Figura 9 – Representación Gráfica Intervalo de Tareas	17
Figura 10 – Representación Gráfica Técnica Heurística	18
Figura 11 – Representación Gráfica Técnica Heurística (contención)	19
Figura 12 – Proceso de planeación	21
Figura 13 – Modelo Típico de Planeación	22
Figura 14 – Secuenciación en línea de tres tareas en cuatro máquinas	23
Figura 15 – Secuenciación de 6 tareas	26
Figura 16 – Diagrama de flujo de selección de padres	27
Figura 17 – Ejemplo de aplicación del operador PMX	29
Figura 18 – Proceso de Mutación	30

Figura 19 – Regiones Factibles	35
Figura 20 – Regiones Factibles & Rectas de Nivel	36
Figura 21 – Proceso de Generación de Plan de Embarque	41
Figura 22 – Estructuración de datos para desarrollo del modelo	43
Figura 23 – Representación de Estructura de Datos	44
Figura 24 – Diagrama General de Procesos de la Planta de Manufactura Metal Mecánica	45
Figura 25 – Representación Gráfica del Modelo Conceptual (Estructura Multinivel)	46
Figura 26 – Flujo del Modelo de Optimización	60
Figura 27 – Software utilizado para resolver el modelo matemático: Solver Premium Plus	63
Figura 28 – Características del Modelo después de cargarlo en Solver Premium	63
Figura 29 – Distribución del inventario en la cadena logística. (Holweg et al., 2004).	99
Fig. 30 – Rotaciones anuales de inventario en EEUU por sectores económicos. (Marchwinski, 2004)	102
Figura 31 – Rotaciones anuales por tipo de industria manufacturera. (Marchwinski, 2004)	103
Figura 32 – Rack ALX1000 Almacenamiento de Datos	127
Figura 33 – CPU ALZ500 Router	127
Figura 34 – Distribución de Planta EMM Inicial	134

Figura 35 – VSM Actual. VA/NVA= 0.1%	134
Figura 36 – Análisis de Actividades VA vs. NVA	135
Figura 37 – Identificación de áreas de oportunidad y plan de acción de efecto inmediato y sostenido	136
Figura 38 – Value Stream Map Futuro	137
Figura 39 – Nueva Distribución de Planta	138
Figura 40 – Flujos Lógicos y Secuenciales	139
Figura 41 – Movimiento de Maquinaria	140
Figura 42 – Definición de flujos y áreas de trabajo	141
Figura 43 – Entrenamiento a la platilla total de la planta (labor directa e indirecta)	142
Figura 44 – Área de Ensamble de Racks	144
Figura 45 – Cargado de MP en Prensas Hidráulicas	145
Figura 46 – Almacen de MP	145
Figura 47 – Creación de Supermarket en el área de Hard Tool	146
Figura 48 – Area de Almacenamiento de Producto en Proceso	147
Figura 49 – Area de Desenmascarillado	147
Figura 50 – Área de Integración de Misceláneos	149
Figura 51 – Flujo de una sola pieza integración de Racks de Aluminio	151
Figura 52 – Área de Inyección de Plásticos	152

Tabla 1 – Planteamiento del Problema	13
Tabla 2 - Clientes, Números de Parte Activos (Productos Embarcables), Partes Manufacturadas y Partes Compradas	40
Tabla 3A - Clientes con su respectivo % de contribución a las ventas y a las utilidades totales de la planta (Octubre/2008)	41
Tabla 3B - Listado de productos embarcables del cliente piloto, se muestra detalle de precio de venta, costo de venta, volumen de ventas para el trimestre Julio – Septiembre 2009 y su correspondiente margen de utilidad bruto y monto de utilidad bruta	42
Tabla 4 – Muestra la capacidad requerida por los productos demandados por el cliente vs. la capacidad disponible por día por proceso	51
Tabla 5 – Resultados del Sistema de Planeación de la Producción Tradicional vs. Sistema de Planeación utilizando el Modelo Matemático	64
Tabla 6 – La matriz producto-proceso (Hayes et al., 1979a - 1979b)	75
Tabla 7 – Ejemplo comparativo entre una planta de Producción en Masa y otra de Producción	95
Tabla 8 – Características de plantas de montaje en 1989 (Womack et. al., 1990)	96
Tabla 9 – Desempeño de la industria de la automoción en la década de los 90 (Womack et al., 1996)	97

Tabla 10 - Horas de mano de obra por vehículo, 1989, 1994, 2000 (Holweg et al., 2004)	98
Tabla 11 – Los 10 "no sólo..." del Pensamiento Esbelto (Holweg, 2000)	105
Tabla 12 – Validación de caso	124
Tabla 13 – Perfil de equipo EMM. Entrevista definición de equipo	126
Tabla 14 – Indicadores de efectividad del proyecto de tesis	130
Tabla 15 – Análisis de Actividades VA vs. NVA Estado Actual	135
Tabla 16 – Resultados de la ejecución del proyecto	143
Tabla 17 – Resultados de la ejecución del proyecto Hard Tool	144
Tabla 18 – Resultados de la ejecución del proyecto Pintura	146
Tabla 19 – Resultados de la ejecución del proyecto Ensamble de Misceláneos	148
Tabla 20 – Resultados de la ejecución del proyecto Racks de Aluminio	150
Tabla 21 – Resultados de la ejecución del proyecto Plásticos	151

## INTRODUCCION

En un mercado dominado por la competencia y el consumo, que exige gran variedad de productos con ciclos de vida cada vez más cortos, las empresas manufactureras tratan de adaptar sus procesos de fabricación implementando sistemas flexibles que permitan hacer frente a la incertidumbre que esta situación genera. Lograr la eficiencia y la flexibilidad demandada pasa necesariamente por una correcta ordenación de los medios productivos que permita no solo hacer frente con éxito a las situaciones actuales, sino también, a posibles escenarios futuros.

Un sistema productivo puede asimilarse a un proceso de transformación que convierte una serie de insumos en un determinado bien o servicio. Dicho proceso de transformación comprende un conjunto de operaciones diversas, tanto de tipo productivo sobre los insumos, materiales y productos (tratamiento, transformación, almacenamiento, inspección, etc.), como de gestión de la información asociada al propio proceso (toma de decisiones, control de la producción, planeación, dirección, etc.). La Dirección de Operaciones se puede definir como el diseño, la gestión del funcionamiento y la mejora de los sistemas de producción que crean los bienes o servicios de la compañía.

Los problemas que debe afrontar la Dirección de Operaciones pueden agruparse en dos categorías (Lario Esteban, 93)<sup>1</sup> las relacionadas con el *Diseño del Sistema Productivo* y las relacionadas con la *Gestión del Sistema Productivo*.

El Diseño del Sistema Productivo aborda:

- El diseño del producto o servicio
- La planificación de las capacidades productivas requeridas
- La selección del equipo y el proceso
- La localización geográfica de las unidades productivas y logísticas
- La distribución en planta de los medios de producción
- La selección de proveedores
- La definición del sistema de aseguramiento de la calidad
- La selección de las tecnologías de información
- El establecimiento de sistemas de control del sistema productivo
- El estudio del trabajo

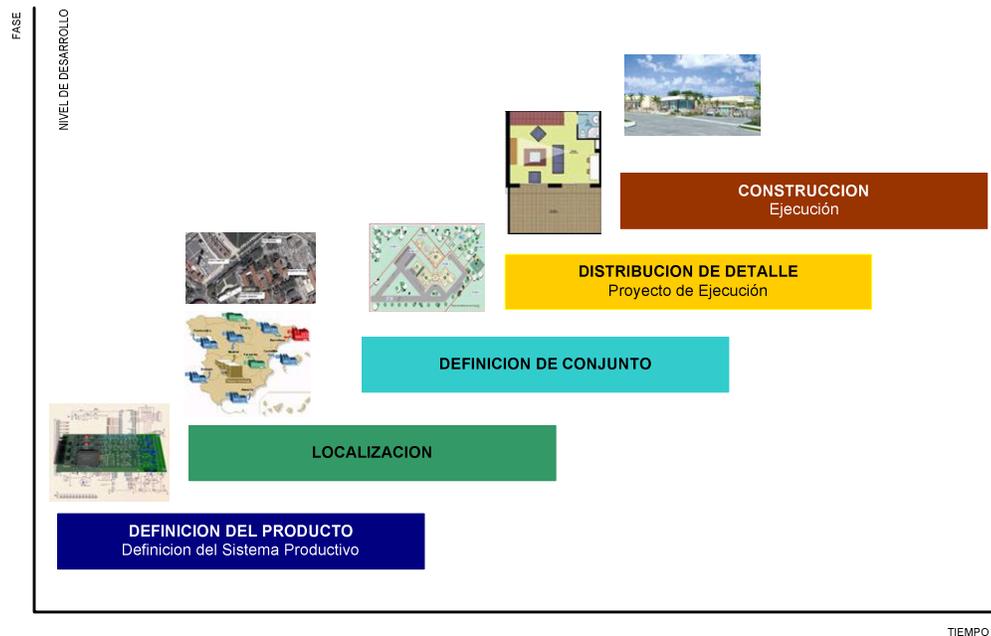
Las decisiones relacionadas con la Gestión de los Sistemas Productivos son del tipo: Precisión de la Demanda, Planeación de la Producción y Compras, Gestión de Inventarios, Programación y Control de la Producción, Gestión del Aprovisionamiento, Gestión de la Distribución, Definición de los sistemas de mantenimiento de renovación de equipos, etc.

---

<sup>1</sup> Otro criterio de agrupación muy extendido es en los tres niveles básicos de decisión: decisiones estratégicas, tácticas y operativas.

El presente trabajo se centrará sobre una de las decisiones que debe tomar el planeador durante el diseño del sistema productivo: la planeación de la producción como eje vector y catalizador de la mejora gradual de la planta. Se hace necesario resaltar que la planeación de la producción no es un subproblema aislado dentro del proceso de diseño de la actividad productiva; como se expondrá a lo largo de este proyecto, existe una clara interrelación entre la planeación de la producción y el resto de las decisiones de la dirección de operaciones, tanto en su vertiente de diseño del sistema como en la de la gestión del mismo.

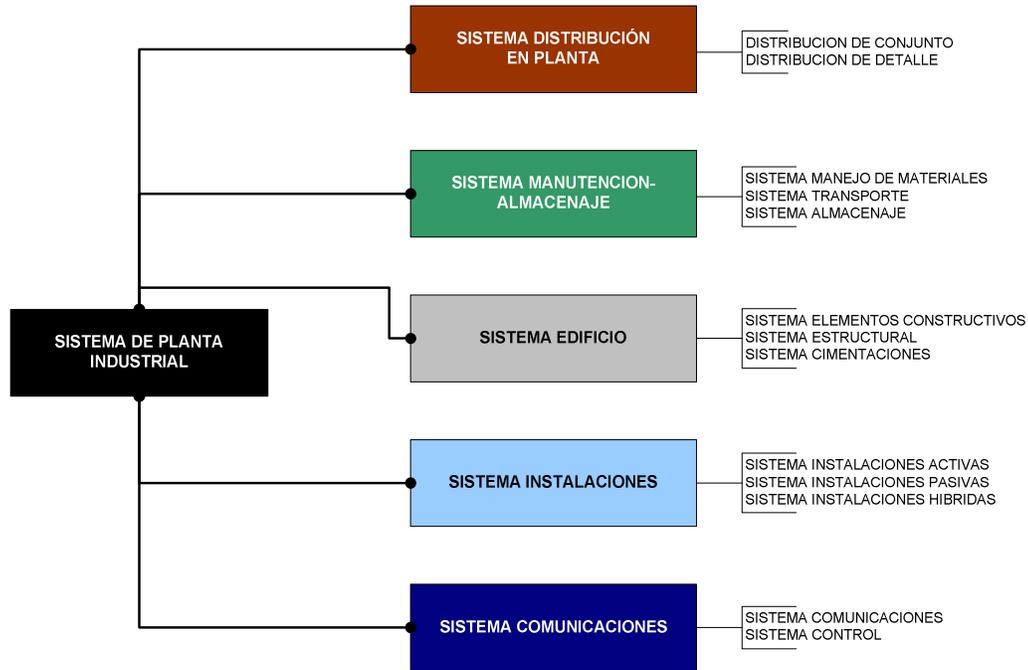
Tompkins y White (Tompkins et al., 84) dividieron la planificación de una actividad industrial a la que se llamara proyecto de actividad industrial en cinco fases (Figura 2). Tras la selección del producto a fabricar y del sistema productivo, y de haber dimensionado el proceso y el volumen de producción, se procede a la localización o ubicación de la planta seleccionando la zona de actuación, el suelo industrial en base a diferentes criterios, logísticos, disponibilidad de la materia prima, situación de los mercados, sistemas de comunicación, infraestructura, etc.; tras esto se realiza una distribución de conjunto de la planta que servirá de base para la distribución detallada y la elaboración del proyecto de ejecución, materia de este trabajo.



**Figura 2** – División de una Actividad Industrial según Tompkins

En el esquema habitual la distribución en planta o layout, parte de considerar el número de actividades a realizar en el proceso productivo, el área requerida para el correcto desarrollo de dichas actividades y las interrelaciones existentes entre ellas, flujos de materiales, necesidades de proximidad o alejamiento, etc.; a partir de dichos criterios se obtiene una distribución ideal en la que quedan definidas la ordenación de actividades, la situación relativa entre ellas en el espacio de la planta y la forma de dicha planta. Basándose en dicha distribución ideal y en una fase del proyecto de mayor nivel de detalle, se sintetiza la distribución real que será la que finalmente se lleve a la práctica, esto es lo que la segunda parte de este proyecto plantea, direcciona e implementa.

Muther (Muther et al., 79) plantea con el método SPIF (Systematic Planning of Industrial Facilities) la planta industrial como un sistema compuesto por cinco subsistemas físicos interrelacionados entre ellos y con el entorno (Figura 3).



**Figura 3** – Sistema de planta industrial y subsistemas que lo conforman según Muther

Es el subsistema distribución en planta el que determina la ordenación de los medios productivos. Realizar dicha ordenación de manera eficiente no es un problema trivial debido al gran número de factores a considerar, una planta industrial es un sistema complejo en el que interactúan máquinas, materiales, hombres y mujeres sirviéndose de un conjunto de instalaciones (ingeniería, almacén, oficinas, áreas de servicio, etc.). Es evidente que la forma de ordenar los medios productivos influye en la concepción del edificio industrial en los medios de procuración y almacenamiento a emplear, en las instalaciones y en los propios sistemas de comunicación.

Además de la complejidad de las relaciones anteriormente descritas, la dificultad fundamental para obtener distribuciones flexibles y eficientes de los medios productivos, es la necesidad de contemplar y satisfacer múltiples criterios e intereses. Como se expondrá posteriormente, el problema que se aborda posee un marcado carácter multicriterio, siendo simplista cualquier intento de abordarlo desde una perspectiva monocriterio.

La obtención de una distribución en planta adecuada a las necesidades de una empresa debe ser uno de los objetivos fundamentales de la arquitectura industrial. mientras que una correcta ordenación de los medios de producción de la empresa, constituye para ésta una importante fuente de ventajas competitivas al tener incidencia directa sobre el costo de los productos fabricados, los tiempos de fabricación, el consumo de recursos energéticos, y sobre la capacidad de adaptación ante los cambio en la demanda, una distribución en plan incorrecta, constituye un grave problema, como se vera con datos fehacientes y claros, que dificulta los procesos de fabricación, aumenta los costos de producción y que puede, llegado el momento, dificultar la subsistencia de la empresa.

“La distribución en planta es un fundamento de la industria. Determina la eficiencia y, en algunos casos, la supervivencia de la empresa” (Muther, 81) Así pues, es absolutamente justificable la necesidad de un estudio detallado de las necesidades de la planta, de las características de su proceso productivo, de las características del mercado, y en general. de todos los aspectos necesarios para desarrollar una correcta planeación de la producción y distribución en planta.

Esta problemática ha sido abordada por múltiples autores desde diversas perspectivas, empleando técnicas procedentes de otros ámbitos o desarrollando herramientas específicas para ello, en cualquier caso, el problema está lejos de ser completamente resuelto, puesto que las soluciones obtenidas con los métodos existentes no son trasladables a una distribución detallada e inmediatamente aplicable. El problema, en caso de abordarlo con cierto rigor, es intrínsecamente complejo debido a su carácter multicriterio y a la naturaleza cuadrática de la función objetivo resultante de la formulación matemática del mismo, como se verá más adelante. Por otra parte, la modelización del comportamiento de una planta y la interacción entre las diferentes actividades, la selección de los criterios a considerar y la calidad de la información de la que se dispone, introducen necesariamente inexactitudes que afectan a la inmediatez con la que la solución obtenida en algún caso se pueda trasladar a las siguientes fases de implementación.

# PRIMERA PARTE

*“Planteamiento, programación y solución del modelo de optimización de la planeación de la producción a través de programación matemática”*

## CAPITULO I

### MARCO DE REFERENCIA Y CONOCIMIENTOS EXISTENTES EN LA MATERIA

La presente tesis se desarrolla partiendo de una estructura de conocimientos basta en ambos temas; por un lado, el diseño de un modelo de planeación de la producción y por el otro, la puesta en marcha de un sistema de manufactura esbelta; la relevancia radica en su aplicabilidad, la cual se plantea y se resuelve, de manera tal que, pese a desarrollarse en una planta de manufactura metal mecánica, puede aplicarse a diferentes realidades de empresas en México.

El reto que se enfrenta, reside en la incertidumbre generada por la demanda siempre cambiante de los clientes, la cual puede exigir la adición inmediata de recursos (al costo que sea); o el cierre temporal o definitivo de centros de trabajo, y en algunos casos extremos, de la empresa en si misma. Mucho se habla hoy en día de la flexibilidad requerida para hacer frente a esta realidad infalible de libre mercado, sin embargo, los modelos de planeación suelen ser rígidos, lentos, complejos, reactivos y pesados. Este proyecto de tesis plantea un modelo de planeación de la producción del tipo PFS (Production Flow Shop) que consiste en secuenciar los pedidos o lotes de producción de un sistema de producción en línea o en flujo, de tal manera que se minimice el tiempo de terminación total de todas las órdenes de producción o makespan. En un problema PFS, N ordenes deben pasar por M etapas de producción o centros de trabajo para acabar su ciclo de fabricación o prestación de un servicio, donde cada una de estas etapas siguen un orden específico.

Estas órdenes se caracterizan por el movimiento de materia (prima o en proceso) y por los diferentes tiempos de operación. Esta situación plantea un caso de programa lineal mixto con variables enteras y binarias, cuya solución no puede ser obtenida por las técnicas convencionales de la investigación de operaciones. Para encontrar soluciones óptimas y rápidas a este problema se han empleado metaheurísticas como el algoritmo genético modificado de Chu-Beasley, en el cual se usan parámetros de búsqueda modificando la población en cada generación.

Muchos investigadores han probado las metodologías de solución para problemas de secuenciación de máquinas usando casos que se han generado aleatoriamente, sin embargo la gran mayoría de ellos no han sido publicados. Debido a esta situación aparece un conjunto de problemas de alta dificultad denominados problemas Taillard<sup>2</sup> que sirven como casos de prueba. El rango de los problemas comprende casos desde 20 trabajos y 5 máquinas hasta casos de 500 trabajos y 20 máquinas, donde los tiempos de procesamiento de cada tarea (incluyen tiempo de preparación de la máquina  $j$  para realizar la tarea  $i$ , más el tiempo de ejecución de dicha tarea en la presente máquina) fueron obtenidos aleatoriamente de una distribución uniforme  $U(1,100)$ .

En este trabajo se propone un algoritmo genético mejorado para el problema PFS, en donde algunas de las estrategias como la generación de la población inicial, la selección de la población a mejorar y los operadores de cruce y mutación se han modificado para hacer más eficiente el algoritmo.

---

<sup>2</sup> Scheduling Instances: <http://ina.eivd.ch/Collaborateurs/etd/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>

Esta metaheurística propuesta, utiliza una serie de parámetros tales como duración de la tarea, costo temporal de pasar de un trabajo a otro, número de máquinas, etc.; con el propósito de evaluar una serie de secuencias de tareas posibles generadas aleatoriamente de vecino en vecino para mejorar la calidad de sus resultados. Esta tarea es repetitiva y se detiene cuando las soluciones cumplen un criterio de parada, ya sea el número de generaciones y bien, la homogenización de la población.

Este modelo resultante podrá ser utilizado por el planeador común y corriente quien alimentando (1) números de parte, (1) cantidades requeridas y (3) fechas de entrega, será capaz de obtener el orden óptimo que habrá de seguirse en cada etapa del proceso productivo para asegurar el menor tiempo de ciclo (Makespan) y por ende, el menor costo de transformación. Esto a su vez, constituirá la base para soportar una nueva estructura de trabajo en la que el tradicional esquema de producir en centros de producción aislados, se rompe para dar paso a un esquema de producción de flujo continuo con Kankan estratégicamente diseñados y posicionados que generen la menor cantidad de desperdicio en cualquiera de sus posibles representaciones y que esto finalmente, se traduzca en la creación de un sistema de trabajo predecible, confiable y económico.

Lo anterior contrasta completamente con la realidad actual de la planta que se caracteriza tener un reactivo de planeación enfocado a producir aquello que demanda el cliente más crítico, dejando de lado la ingeniería de métodos, el análisis y control de costos, el secuenciamiento lógico y económico de la producción, la administración del proceso vs. la función; el control del inventario en cualquiera de sus manifestaciones (materia prima, producto en proceso, producto terminado), el

nivel de estrés del personal por satisfacer metas efímeras de producción, el alto nivel de rotación del personal de línea y administrativo, el alto nivel de insatisfacción laboral. las pérdidas financieras, la insatisfacción de clientes; en fin, un negocio con pocas posibilidades de sobrevivir el embate despiadado del libre mercado.

## 1.1. ENFOQUES DE CREACION DE MODELOS DE PLANEACION

Los enfoques de solución de creación de un modelo de planeación efectivo pueden agruparse en tres grandes grupos:

1.1.1. Investigación operativa – Desarrollo de algoritmos ad-hoc → poco flexibles

1.1.2. Técnicas de búsqueda

- Simulated annealing
- Algoritmos genéticos
- Tabu search

1.1.3. Razonamiento basado en restricciones – Incorpora técnicas de consistencia

## 1.2. DEFINICION GENERAL DEL PROBLEMA

1.2.1. Elementos del problema

Un conjunto de **n** trabajos  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$

Un conjunto de **m** máquinas  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$

Un conjunto de **nxm** operaciones  $O = \{o_{11}, o_{12}, \dots, o_{mn}\}$

### 1.2.2. Restricciones

Tecnológicas: precedencia entre operaciones de un mismo trabajo

Disyuntivas: precedencia entre operaciones a ejecutar sobre una misma máquina.

### 1.2.3. Objetivo → Minimizar el *makespan*<sup>3</sup>

### 1.2.4. Ejemplo Tipo

Minimizar el makespan de forma que los 4 agentes (ensambles/productos) dejen libre cuanto antes las máquinas.

	READY TIME	MAQ1	MAQ2	MAQ3	DUE TIME
AGENTE 1	0	5	10	2	30
AGENTE 2	0	2	6	5	20
AGENTE 3	0	10	20	15	10
AGENTE 4	0	3	2	5	50

Tabla 1 – Planteamiento del Problema

### 1.2.5. Solución

Makespan mínimo: 52

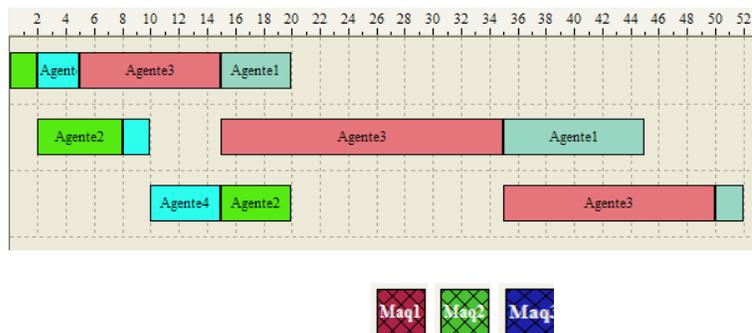


Figura 4 – Representación Grafica del Makespan

<sup>3</sup> *Makespan* es el **tiempo total** en el que todos los trabajos completan su ejecución

### 1.3. MODELOS CSP (Communications Sequential Processes)

#### 1.3.1. Modelo de puntos de tiempo:

Operaciones = variables

Puntos temporales = valores

Restricciones: EST, LFT, disyuntivas

Problema: encontrar un conjunto de tiempos de comienzo para cada operación (que satisfagan una función objetivo)

#### 1.3.2. Modelo PCP (Precedence Constraint Posting)

Para cada par de operaciones se definen dos posibles órdenes de ejecución: (oi before oj) y (oj before oi)

Variables = restricciones disyuntivas entre dos operaciones

Problema: encontrar las relaciones de ordenación entre pares de operaciones que requieren el mismo recurso (que satisfagan una función objetivo)

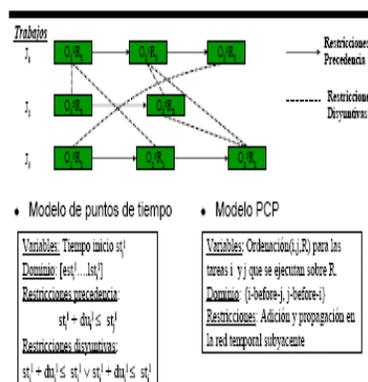


Figura 5 – Representación Modelo PCP

### 1.3.3. Técnicas de consistencia: uso de propagadores

#### CBA

Propagación a través de las relaciones de precedencia de las operaciones

#### Edge-Finding

Propagación a través de las restricciones sobre los recursos

### 1.3.4. Uso de heurísticas

#### Slack

Elección según el espacio temporal libre

#### Orr-Fss

Elección en base al grado de "competencia" por los recursos en un intervalo de tiempo y grado de "dependencia" de las tareas sobre los recursos para conseguir una solución al problema

### 1.3.5. Análisis de restricciones

#### CBA = Constraint Based Analysis

Para cualquier par de operaciones no ordenadas  $i$  y  $j$  que utilicen el mismo recurso, distinguimos los siguientes casos:

1. Si  $l_{fti} - estj < p_i + p_j \leq l_{ftj} - esti$  entonces  $i \rightarrow j$  (caso 1)
2. Si  $l_{ftj} - esti < p_i + p_j \leq l_{fti} - estj$  entonces  $j \rightarrow i$  (caso 2)
3. Si  $p_i + p_j > l_{ftj} - estj$  y  $p_i + p_j > l_{fti} - estj$  entonces inconsistencia (caso 3)
4. Si  $p_i + p_j \leq l_{ftj} - estj$  y  $p_i + p_j \leq l_{fti} - estj$  entonces cualquiera (caso 4)

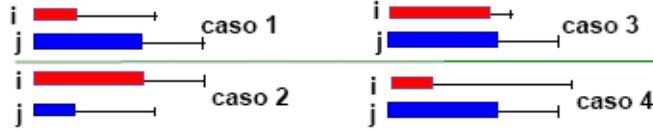


Figura 6 – Representación Restricciones CBA

### 1.3.6. Algoritmo PCP

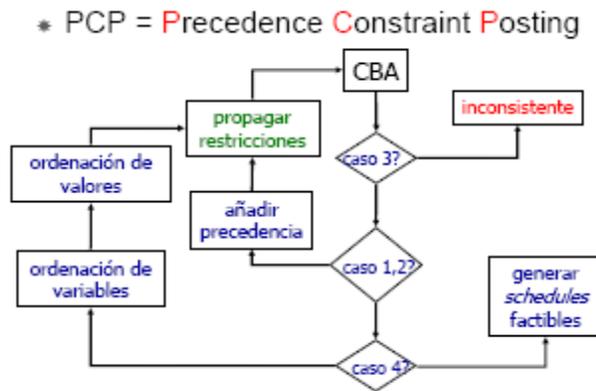


Figura 7 – Representación Algoritmo PCP

### 1.3.7. Propagación de restricciones

Si se toma la restricción  $i \rightarrow j$  entonces actualizar :

$$estj = \max \{ estj, esti + pi \} \text{ y}$$

$$lftj = \min \{ lfti, lftj - pj \}$$

Si durante el proceso:

$$estk + pk > lftk \quad \square k \rightarrow \text{INCONSISTENCIA!}$$

### 1.3.8. Esquema Edge Finding

Se trata de determinar si una tarea puede ser la primera o la última de un determinado conjunto de tareas.

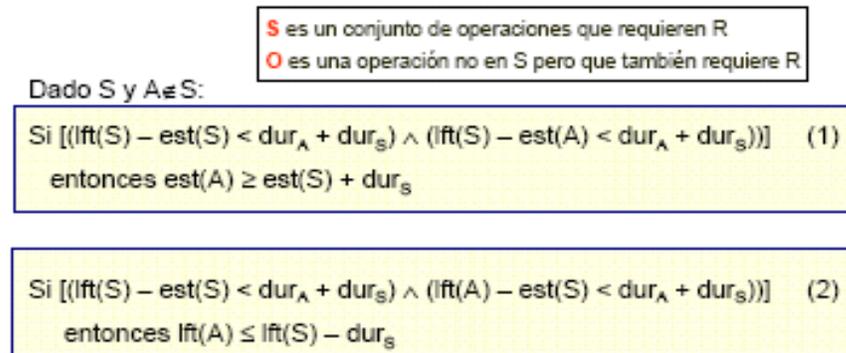


Figura 8 – Esquema Edge Finding

### Intervalo de Tareas

C4 se ejecutará después de A1 y B3

$est(C4) = 25$

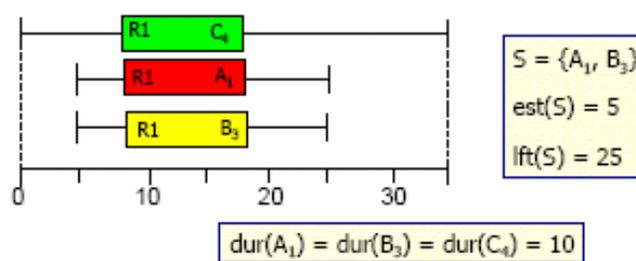


Figura 9 – Representación Gráfica Intervalo de Tareas

### 1.3.9. Heurísticas

Dadas dos operaciones no ordenadas:

–  $Slack(o_i, o_j) = lft(o_j) - est(o_i) - (dur(o_i) + dur(o_j))$



Estimación de probabilidad de las preferencias temporales de una determinada actividad

orr: operation resource reliance.

fs: filtered survivable schedules

Heurística basada en las medidas de contención y dependencia

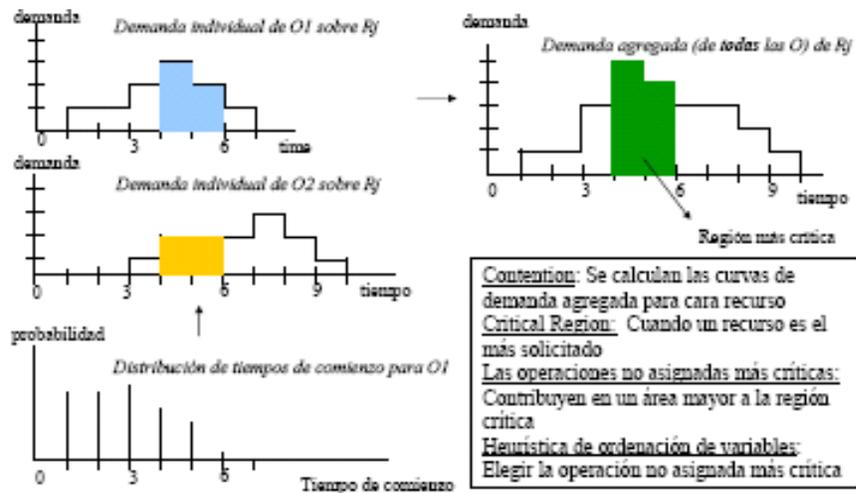


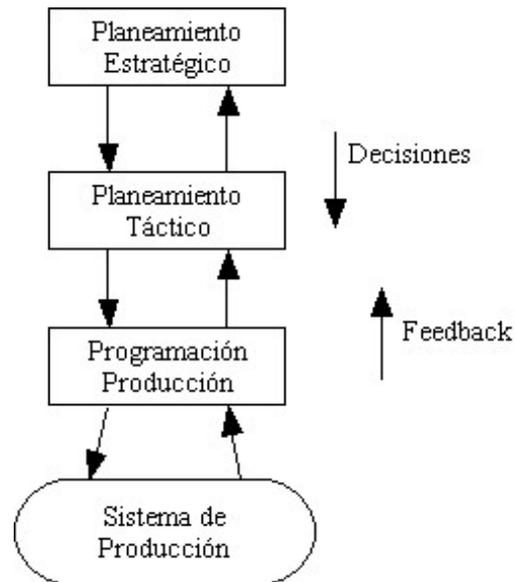
Figura 11 – Representación Gráfica Técnica Heurística (contención)

## CAPITULO II

### INTRODUCCION AL PLANTEAMIENTO DEL MODELO

La eficiencia es usualmente expresada como el porcentaje de tiempo en que los recursos son usados productivamente. La utilización improductiva suele ser el resultado de actividades tales como puesta en marcha de equipos (*setup*), paros (*downtime*), reconfiguración de máquinas por cambio de productos (*mix cost*), mantenimiento, tiempos muertos e interrupciones por roturas y/o descomposturas. Todas ellas excepto las interrupciones por roturas pueden ser anticipadas, y su impacto en la eficiencia minimizadas con una buena planeación. Las roturas, obviamente, no están programadas y sus consecuencias tienen un doble impacto. Primero, se pierde producción mientras el recurso no esté disponible y segundo, en el caso de una interrupción prolongada, una nueva programación debe ser generada inmediatamente para minimizar las consecuencias de la interrupción. El proceso del planeación y programación de la producción se describe usualmente usando un modelo de tres niveles, como se muestra en la figura 12.

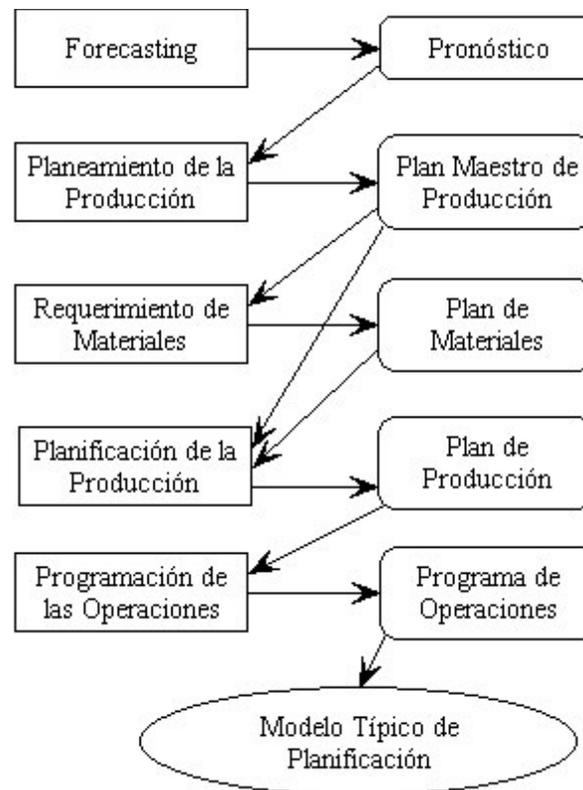
A estos tres niveles se los denomina frecuentemente: Planeación Estratégica, Planeación Táctica y Programación de Producción (Planeación Operativa). Los problemas de Planeación Estratégica se resuelven con programación lineal. Los problemas de Planeación Táctica se resuelven con métodos exactos como el Branch and Bound y Balas, entre otros. Los problemas de Planeación de Producción se resuelven por medio de técnicas heurísticas debido a la explosión combinatorial del espacio de soluciones.



**Figura 12 – Proceso de planeación**

En realidad, el proceso de planeación está dividido en varios componentes funcionales, con múltiples planes de soporte. El modelo típico de planificación se basa en pronósticos, plan maestro de producción, plan de materiales, plan de producción y programación de operaciones como se detalla en la figura 13.

Un problema de programación de operaciones en un ambiente Flow Shop es un problema en el cual  $n$  tareas deben ser procesadas por un conjunto de  $m$  máquinas distintas y las tareas deben tener el mismo flujo de procesamiento o secuencia tecnológica en las máquinas.



**Figura 13 – Modelo Típico de Planeación**

Las consideraciones usuales de un problema de programación de tareas Flow Shop son:

- 1) Cada máquina esta disponible continuamente y sin interrupciones.
- 2) Cada máquina puede procesar una tarea por vez.
- 3) Cada tarea sólo puede ser procesada por una máquina cada vez.
- 4) Los tiempos de procesamiento de las tareas en las diferentes máquinas son determinados y fijos.
- 5) Las tareas tienen la misma opción de ser programadas.
- 6) Los tiempos de preparación de las operaciones en las distintas máquinas están incluidos en los tiempos de procesamiento.
- 7) Las operaciones en las máquinas, una vez iniciadas no deben ser interrumpidas.

Según la teoría que estudia la complejidad matemática, este problema es clasificado como NP- completo.

Un ejemplo del problema de secuenciación en línea es el que se muestra en la figura 14, donde en un ambiente de línea de flujo, se tiene un conjunto de 3 tareas que deben ser procesadas en un conjunto de 4 máquinas, cada tarea tiene el mismo orden de secuencia tecnológica a través de las máquinas, es decir, cada una de las tareas debe ser procesada primero en la máquina 1, luego en la máquina 2, y así sucesivamente hasta llegar a la máquina 4. Las secuencias se denominan técnicamente secuencias de permutación. El tiempo de procesamiento de la tarea  $j$  en la máquina  $i$  se denota por  $p_{ij}$  y el tiempo total de procesamiento o de ejecución se denomina  $C_{max}$  (*Makespan*).

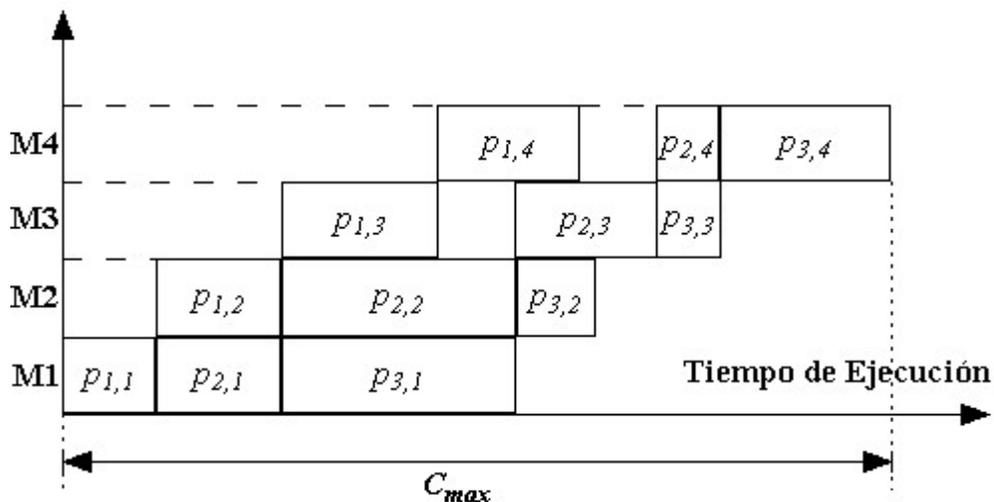


Figura 14 – Secuenciación en línea de tres tareas en cuatro máquinas

El objetivo es encontrar la secuencia de los trabajos a programar la cual debe minimizar el *Makespan* que corresponde al tiempo en el cual el último trabajo es finalizado en la máquina *m*. El problema investigado usualmente es denotado por *n/m/P/ C<sub>max</sub>* y definido de la siguiente forma:

Si se tienen los tiempos de procesamiento  $p(i,j)$  para el trabajo *i* en la máquina *j* y la secuencia de trabajo  $\{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$  donde se calcula el tiempo completo de procesamiento o *Makespan*  $C(J_i, j)$ , entonces el modelo puede ser planteado así:

$$C(J_1, 1) = p(J_1, 1) \quad (1)$$

Con la ecuación (1), se contabiliza el tiempo que tarda en ejecutarse el trabajo 1 de la secuencia de trabajo  $\{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$  en la máquina 1. Partiendo de este valor y utilizando la ecuación (2), se contabilizan los tiempos de ejecución de la tarea  $J_i$  ( $i \neq 1$ ) en la máquina 1, adicionándole el tiempo acumulado de la secuencia en esta máquina en el momento del inicio de la ejecución del trabajo  $J_i$ .

$$C(J_i, 1) = C(J_{i-1}, 1) + p(J_i, 1) \text{ para } i = 2, \dots, n \quad (2)$$

La ecuación (3) es utilizada posteriormente para contabilizar el tiempo de ejecución del trabajo  $J_i$  en las demás máquinas del sistema de producción, teniendo en cuenta que al tiempo de ejecución de esta tarea en la máquina *j* se le debe sumar el tiempo que tardó en ejecutarse esta misma tarea en la máquina anterior (máquina  $j-1$ ).

$$C(J_i, j) = C(J_i, j-1) + p(J_i, j) \text{ desde } j=2, \dots, m \quad (3)$$

El tiempo acumulado de la secuencia de producción hasta que finaliza la ejecución de la tarea  $J_i$  ( $i \neq 1$ ) en la máquina  $j$  ( $j \neq 1$ ) se obtiene mediante la ecuación (4):

$$C(J_{i,j}) = \max \{C(J_{i-1,j}), C(J_i, j-1)\} + p(J_i,j) \quad (4)$$

*desde  $i=2, \dots, n$*

*desde  $j=2, \dots, m$*

Finalmente el tiempo total que tarda la secuencia de producción, contabilizado desde que ingresa el trabajo  $J_1$  en la máquina 1 hasta que el trabajo  $J_n$  sale de la máquina  $m$  se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{\max} = C(J_{n,m}) \quad (5)$$

El algoritmo genético propuesto por Chu-Beasley en 1997 ha ganado mayor importancia en el sector académico en los últimos años debido a la calidad en las respuestas y en el alto desempeño computacional obtenido al adaptarse a nuevos problemas. La principal característica del Algoritmo Genético de Chu-Beasley consiste en mantener constante el tamaño de la población de alternativas de solución, de manera que en cada iteración se reemplaza una alternativa de la población usando un eficiente mecanismo de modificación de la misma. En cada iteración la población es reemplazada sistemáticamente por un único descendiente generado.

Esta estrategia tiene la ventaja de permitir encontrar múltiples soluciones y además conservar la diversidad del conjunto de alternativas.

## 2.1. Representación del Cromosoma

La codificación utilizada para representar cada una de las alternativas de solución del problema de flow shop consiste en construir un vector de tamaño  $m$  (que corresponde al número de trabajos a ejecutar). Por lo tanto, la  $k$ -ésima posición del vector representa el trabajo que se hará en el  $k$ -ésimo lugar. La población de alternativas de solución se conforma por un número determinado de cromosomas como el mostrado en la figura 15. El cromosoma representa la secuencia natural en la que se programaran los trabajos requeridos.

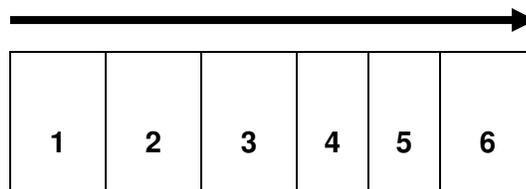
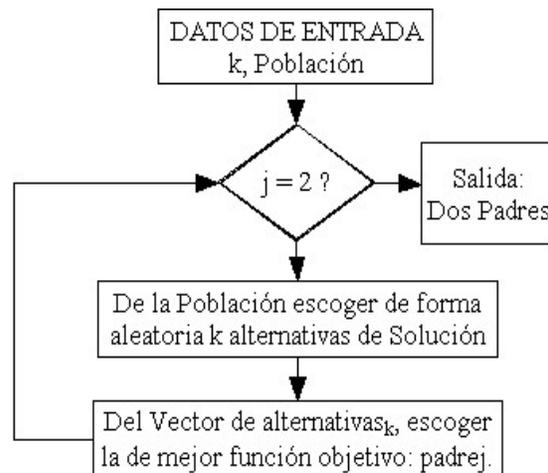


Figura 15 – Secuenciación de 6 tareas

## 2.2. Selección

En el proceso de selección se definen el número de alternativas que serán escogidas de la población de manera aleatoria a fin de definir las alternativas padre, en este caso se utilizó la selección por torneo que consiste en escoger la mejor de las  $k$  alternativas elegidas en forma aleatoria, el proceso se repite dos veces para obtener los dos padres. Según diagrama de flujo de la figura 15.



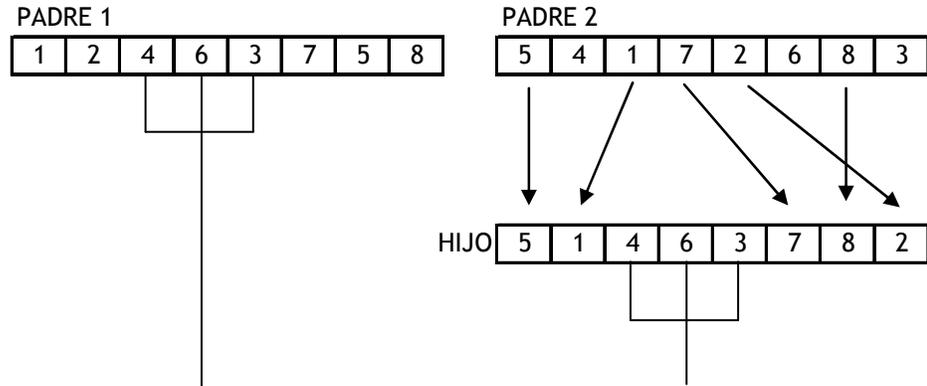
**Figura 16** – Diagrama de flujo de selección de padres

### 2.3. Recombinación

Con los dos padres seleccionados, el paso a seguir es recombinarlos de tal forma que se generen dos descendientes. En el proceso de recombinación es necesario definir el número  $p$  de puntos de recombinación; estos se eligen de forma aleatoria sobre el cromosoma y luego se realiza un cruzamiento de porciones del cromosoma como se muestra en la figura 17. Para conservar la legitimidad de las configuraciones obtenidas se aplicó una variación a este operador, llamada recombinación PMX (Partially Mapped Crossover), de manera que se garantice la legitimidad de las configuraciones obtenidas y que consiste en lo siguiente:

1. Elegir aleatoriamente dos puntos de cruce.
2. Intercambiar estos 2 segmentos en los hijos que se generan.
3. El resto de las cadenas se obtienen haciendo mapeos entre los 2 padres:
  - a) Si un valor no está contenido en el segmento intercambiado, permanece igual.
  - b) Si está contenido en el segmento intercambiado, entonces se sustituye por el valor que tenga dicho segmento en el otro padre.

Por ejemplo, si tenemos dos padres  $P1=\{1,2,4,6,3,7,5,8\}$  y  $P2=\{5,4,1,7,2,6,8,3\}$  y el segmento seleccionado al azar de  $P1$  para ser insertado en  $P2$  es el  $\{4,6,3\}$  esto establece una relación con el segmento  $\{1,7,2\}$  que ocupa las mismas posiciones en  $P2$ . Entonces la secuencia de operaciones transformarían  $P2$  en  $\{5,4,4,6,3,6,8,3\}$ , y luego, eliminado las repeticiones, quedaría  $\{5,*,4,6,3,*,8,*\}$  donde los asteriscos corresponden a los elementos repetidos que deben retirarse de la configuración. Reemplazando queda  $\{5,1,4,6,3,*,8,*\}$  ya que el 4 había ocupado el lugar del 1 en el segmento, continuando se obtiene  $\{5,1,4,6,3,7,8,2\}$ .



**Figura 17** – Ejemplo de aplicación del operador PMX

El resultado de la recombinación produce dos hijos de los cuales uno es eliminado de forma aleatoria. Otra estrategia es hacerlos competir por torneo o por ruleta.

## 2.4. Mutación

El algoritmo de mutación permite crear una amplia gama de propuestas, y su aceptación depende exclusivamente de si mejoran o no el valor de la función objetivo de la propuesta inicial. Este proceso está ligado fuertemente al concepto de vecindad.

En este trabajo, el cromosoma hijo obtenido en el proceso de recombinación es sometido al proceso de mutación. La mutación aplicada consiste en escoger, de manera aleatoria, dos trabajos e intercambiarlos en la secuencia de producción. En la figura 18, se muestra el algoritmo de mutación, donde el número de permutaciones o

mutaciones  $j$  es una cantidad que el usuario puede escoger a voluntad. La cantidad recomendada de permutaciones oscila entre 10 y 20 para los problemas que son tratados en este artículo, una mayor cantidad puede hacer caer en redundancias al algoritmo, es decir que se llegue a un punto de saturación donde las permutaciones no aporten ninguna mejora a la secuencia evaluada.

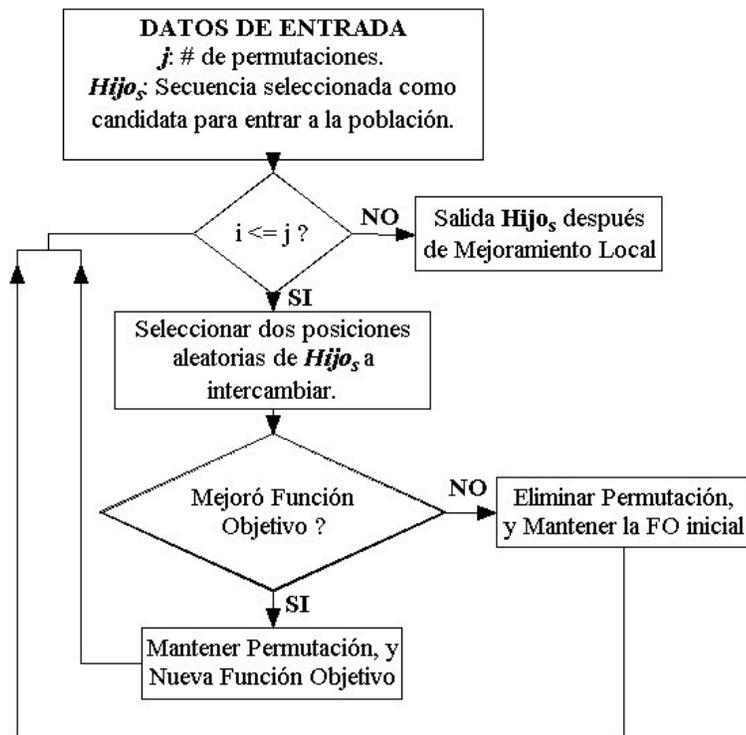


Figura 18 – Proceso de Mutación

## 2.5. Modificar la población actual

El algoritmo presentado en este trabajo tiene algunas características especiales asociadas a la población actual. El algoritmo completo después de generada la población inicial consiste en repetir un número determinado de iteraciones los pasos descritos a continuación:

1. Se obtiene dos alternativas padre por selección de la población actual.
2. Se obtiene una alternativa hijo aplicando recombinación a los padres obtenidos en el paso anterior.
3. Se obtiene una alternativa modificada aplicando mutación.
4. Si la configuración es no factible se mejora la infactibilidad y se obtiene una alternativa menos no factible. De lo contrario ir al paso 5.
5. Se mejora la optimalidad de la alternativa en estudio.
6. Si la alternativa resultante de aplicar los pasos anteriores no se encuentra en la población, entonces aplicar estrategia de modificación de la población de lo contrario volver al paso 1.

Para modificar la población se propone la siguiente estrategia:

1. Si la alternativa actual es no factible y a su vez es menos no factible que la peor no factible de la población, entonces reemplazar la peor no factible por la alternativa actual.

2. Si la configuración es factible y existe por lo menos una no factible en la población actual. entonces reemplazar la peor no factible por la alternativa actual.
3. Si la configuración es factible y todas las alternativas de la población actual son factibles,
4. entonces reemplazar la alternativa con peor función objetivo por la alternativa actual. Lo anterior se realiza sólo si la alternativa actual es de mejor calidad que la peor de la población.

La estrategia de modificación de la población actual se realiza cambiando sólo una alternativa por iteración y teniendo en cuenta que no se admiten alternativas repetidas. Lo anterior evita convergencias prematuras y asegura una exploración detallada de la región de soluciones. Adicionalmente se pueden obtener múltiples soluciones de un mismo problema.

Esta estrategia busca preservar las mejores alternativas, asegurando factibilidad y optimalidad. Estas características constituyen la principal diferencia con respecto al algoritmo propuesto por Chu-Beasley, en el cual la alternativa más no factible es reemplazada. A diferencia de los algoritmos genéticos tradicionales, no se modifica la población de forma aleatoria.

## 2.6. Programación Lineal

La programación matemática es un área de la matemática que se encarga de representar situaciones reales en las cuales se tiene como preocupación principal la optimización de un recurso escaso.

$$\begin{array}{l} \text{Minimizar } f(x) \\ \text{s.a. } x \in \Omega \end{array}$$

Requiere un formato de la siguiente forma:

$f(x)$  es una función matemática que representa el costo a minimizar, equivalentemente el problema puede ser escrito en el formato de maximización, caso en el cual  $f(x)$  representa la utilidad a maximizar.

$W$  representa el espacio que contiene a todas las soluciones posibles (factibles) para el problema que se resuelve

$x$  en general. puede ser representado como un vector de variables de  $n$  componentes, el formato establece la minimización de una función en un espacio delimitado y conocido de antemano

En el formato general antes descrito, cuando  $f(x)$  es una función lineal de la forma:



Conceptos importantes:

- *Conjunto solución del sistema o región factible* es la región formada por la intersección de los semiplanos solución de cada una de las inecuaciones de un sistema.
- *Polígono convexo o región convexa*. Es toda región del plano tal que para dos puntos cualesquiera de la región, el segmento que los une está contenido en su interior.
- *La región factible* es un polígono convexo y puede ser: acotado, no acotado y vacío, es decir, que no haya ni un solo punto que verifique todas las restricciones al mismo tiempo.

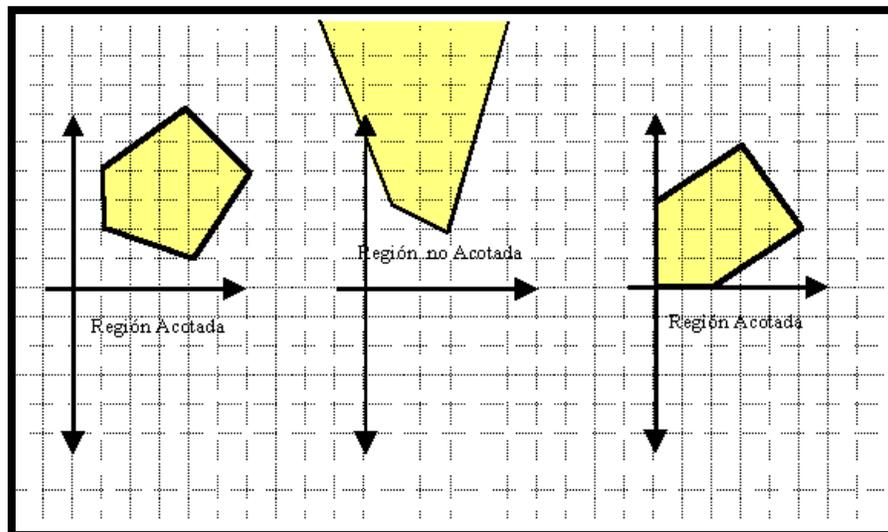


Figura 19 – Regiones Factibles

- *Programación lineal*: Es una parte de las matemáticas que trata de optimizar (maximizar o minimizar) una función lineal en un conjunto definido por unas restricciones que están dadas por inecuaciones lineales.
- *Función objetivo*: Es la función que deseamos optimizar, es decir, maximizar o minimizar. En el caso bidimensional, que es el que nos interesa, la representamos por:

$$f(x,y)=ax+by+c$$

- *Rectas de nivel*: Son las rectas que pasan por los puntos de la región factible y son paralelas al vector director de la función objetivo.

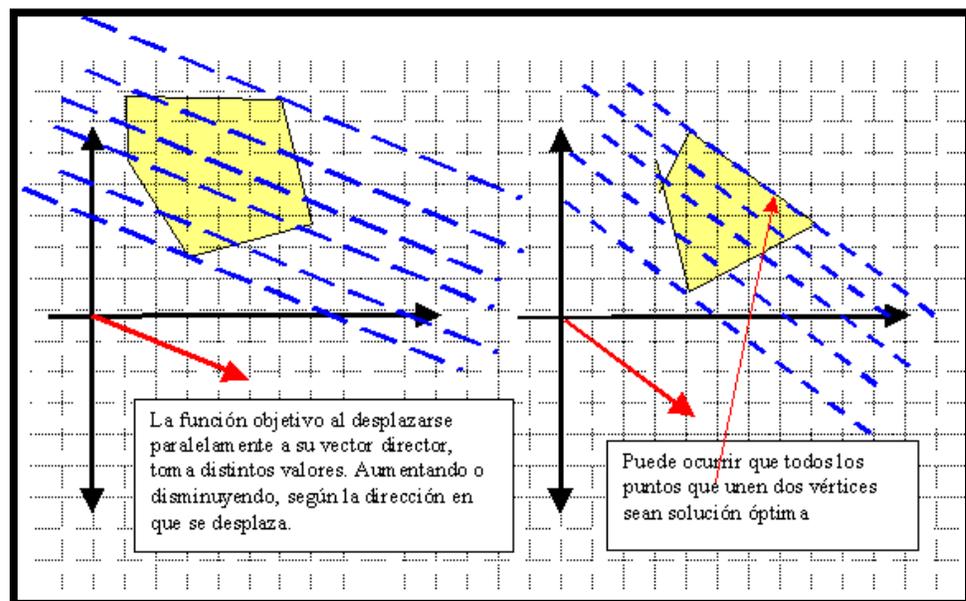


Figura 20 – Regiones Factibles & Rectas de Nivel

- *Solución óptima:* Es el punto o conjunto de puntos de la región factible donde la función objetivo alcanza el valor máximo o el valor mínimo. La solución óptima siempre se alcanza en uno de los vértices o en el segmento que une dos vértices de la región factible.

## CAPITULO III

### PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMATICO

#### 3.1. Situación actual

La planta en la que se desarrolla este proyecto tiene 10 clientes, representados por literales A, B, ... J, los cuales demandan un total de 127 Productos, que serán llamados **Productos Embarcables**, los cuales a su vez, están formados por un total de 2,263 partes compradas y 1,083 partes manufacturadas. La tabla 2 muestra el detalle de clientes con sus respectivos números de parte activos, partes manufacturadas y compradas, estos datos son presentados partiendo de la realidad de la planta al 13 de Agosto del 2009.

La demanda se recibe de los clientes en base semanal y se somete a un proceso estándar denominado "**Supply Commit**" descrito en la Figura 18 del que se desprende el **Plan de Producción** que detalla los números de parte a construir a nivel *Producto Embarcable*, la cantidad y la fecha requerida por el cliente. A partir de éste, se genera el Plan de Embarques, el cual detalla la misma información, Numero de Parte, Cantidad y Fecha que serán comprometidos con el cliente final. Normalmente existe un desfase de 2 días entre plan de producción y plan de embarques, este desfase es conocido como el "buffer" que el grupo de negocios de la planta asigna para enfrentar cualquier posible retraso en la ejecución del plan de producción.

En este caso, las partes compradas se administran a través de un programa denominado VMI<sup>4</sup> (***Vendor Managed Inventory***) a través del cual se asume disponibilidad inmediata o con tiempos de entrega menores a cualquiera de los tiempos de ciclo de las partes manufacturadas.

Lo anterior permite enfocar el estudio en la planeación de las partes manufacturadas. Para ello, se ha hecho un análisis por cliente de su respectiva contribución a las utilidades de la planta y se ha identificado el que aporta la menor contribución, o que de hecho, como es el caso, genera pérdidas financieras (su costo de ventas rebasa su propio precio de venta). Se usará como programa piloto para medir la efectividad del modelo, se comparará el resultado financiero generado con el modelo de planeación actual utilizado por el grupo de planeadores en la planta con el que genere el modelo soportado en programación matemática. El diseño del modelo es tal. que una vez que se verifique su efectividad, éste podrá utilizarse para cargar la información del resto de los clientes y generar mejores resultados financieros a través de una programación óptima de la producción, el modelo es flexible, permitirá la actualización de los parámetros de programación y con ello, se mantendrá vigente en el tiempo.

---

<sup>4</sup> En el proceso de VMI, el vendedor asume responsabilidad por manejar el reaprovisionamiento del inventario. En lugar de un cliente que somete órdenes, el vendedor reaprovisionara según sea necesitado. Este proceso a veces es llamado el inventario manejado por proveedor (SMI) o co-manejo del inventario.

Las Tablas 3A & 3B muestran el análisis de contribución marginal por cliente, en la que resulta evidente que el **Cliente A** muestra la contribución más baja (-26%), y dentro de éste, se identificaron los productos con mayor impacto a este resultado (Tabla 3B).

CLIENTE	N° PRODUCTOS EMBARCABLES	N° PARTES COMPRADAS	N° PARTES MANUFACTURADAS
A	56	221	267
B	29	464	168
C	40	332	161
D	20	303	230
E	90	69	34
F	120	760	83
G	20	217	112
H	40	120	27
I	50	210	78
J	100	620	41

**Tabla 2** - Clientes, Números de Parte Activos (Productos Embarcables), Partes Manufacturadas y Partes Compradas

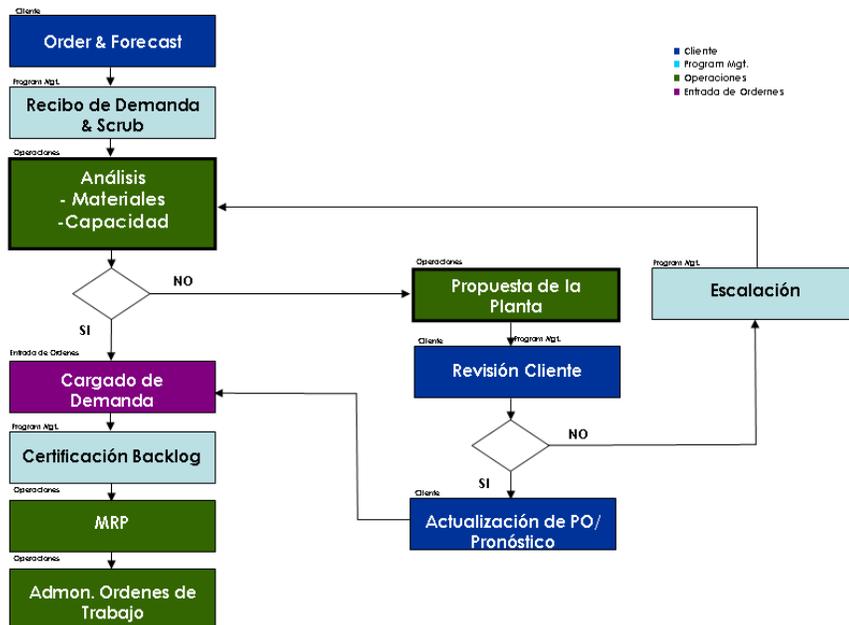


Figura 21 – Proceso de Generación de Plan de Embarque

CLIENTE	DATOS	%
A	% DEL TTL DE VENTAS	11%
	CONTRIBUCION MARGINAL	-34%
B	% DEL TTL DE VENTAS	10%
	CONTRIBUCION MARGINAL	-5%
C	% DEL TTL DE VENTAS	16%
	CONTRIBUCION MARGINAL	16%
D	% DEL TTL DE VENTAS	13%
	CONTRIBUCION MARGINAL	45%
E	% DEL TTL DE VENTAS	3%
	CONTRIBUCION MARGINAL	44%
F	% DEL TTL DE VENTAS	24%
	CONTRIBUCION MARGINAL	24%
G	% DEL TTL DE VENTAS	20%
	CONTRIBUCION MARGINAL	-6%
H	% DEL TTL DE VENTAS	0%
	CONTRIBUCION MARGINAL	2%
I	% DEL TTL DE VENTAS	1%
	CONTRIBUCION MARGINAL	4%
J	% DEL TTL DE VENTAS	2%
	CONTRIBUCION MARGINAL	10%
<b>TTL VENTAS</b>		<b>100%</b>
<b>TTL CONTRIBUCION MARGINAL</b>		<b>100%</b>

→ PRIORIDAD DE SOLUCION  
 MINIMIZAR PERDIDAS  
 FINANCIERAS

Tabla 3A - Clientes con su respectivo % de contribución a las ventas y a las utilidades totales de la planta (Julio / 2009)

PADRE [Wij]	PRODUCTO EMBARCABLE	PRODUCTO [Xpd]	SUB-ENSAMBLE	A	B	C	D	FU	PRECIO DE VENTA
W1	LF3FE51055AAAA	X1	LF3FE51055AAAA	1	0	0	0	1	\$257.950
W2	LF3FE51299AAAB	X17	LF3FE51299AAAB	1	0	0	0	1	\$106.310
W3	LF1AD014120044-KIT	X25	LF1AD014120044-KIT	1	0	0	0	1	\$47.300
W4	LF87-0206-03	X30	LF87-0206-03	1	0	0	0	1	\$2.949
W5	LF87-0214-02	X31	LF87-0214-02	1	0	0	0	1	\$1.387
W6	LF87-0227-02	X32	LF87-0227-02	1	0	0	0	1	\$17.147
W7	LF87-0228-02	X33	LF87-0228-02	1	0	0	0	1	\$19.787
W8	LF87-0246-02	X34	LF87-0246-02	1	0	0	0	1	\$2.686
W9	LF87-0247-02	X35	LF87-0247-02	1	0	0	0	1	\$2.800
W10	LF87-0277-01	X36	LF87-0277-01	1	0	0	0	1	\$2.102
W11	LF87-0278-01	X37	LF87-0278-01	1	0	0	0	1	\$5.390
W12	LF87-0351-01	X38	LF87-0351-01	1	0	0	0	1	\$11.828
W13	LF87-0352-01	X39	LF87-0352-01	1	0	0	0	1	\$16.384
W14	LF87-0354-02	X40	LF87-0354-02	1	0	0	0	1	\$231.620
W15	LF87-0355-01	X55	LF87-0355-01	1	0	0	0	1	\$13.952
W16	LF87-0356-01	X57	LF87-0356-01	1	0	0	0	1	\$10.872
W17	LF87-0357-02	X59	LF87-0357-02	1	0	0	0	1	\$15.264
W18	LF87-0358-02	X61	LF87-0358-02	1	0	0	0	1	\$13.015
W19	LF87-0359-01	X63	LF87-0359-01	1	0	0	0	1	\$4.728
W20	LF87-0367-01	X65	LF87-0367-01	1	0	0	0	1	\$41.408
W21	LF87-0399-01	X68	LF87-0399-01	1	0	0	0	1	\$10.918
W22	LF87-0400-01	X70	LF87-0400-01	1	0	0	0	1	\$5.772
W23	LF87-0401-02	X72	LF87-0401-02	1	0	0	0	1	\$22.390
W24	LF87-0020-01	X74	LF87-0020-01	1	0	0	0	1	\$2.746
W25	LF87-0122-03	X75	LF87-0122-03	1	0	0	0	1	\$10.644
W26	LF87-0237-02	X76	LF87-0237-02	1	0	0	0	1	\$4.316
W27	LF87-0238-02	X77	LF87-0238-02	1	0	0	0	1	\$4.502
W28	LF87-0287-02	X78	LF87-0287-02	1	0	0	0	1	\$15.984
W29	LF87-0329-02	X84	LF87-0329-02	1	0	0	0	1	\$15.264
W30	LF87-0331-02	X86	LF87-0331-02	1	0	0	0	1	\$15.264
W31	LF87-0334-02	X88	LF87-0334-02	1	0	0	0	1	\$231.620
W32	LF87-0392-02	X103	LF87-0392-02	1	0	0	0	1	\$16.370
W33	LF87-0393-02	X106	LF87-0393-02	1	0	0	0	1	\$16.370
W34	LF87-0394-02	X109	LF87-0394-02	1	0	0	0	1	\$20.035
W35	LF87-0395-04	X111	LF87-0395-04	1	0	0	0	1	\$63.915
W36	LF87-0402-03	X118	LF87-0402-03	1	0	0	0	1	\$305.144
W37	LF87-0113-02	X138	LF87-0113-02	1	0	0	0	1	\$2.881
W38	LF87-0136-02	X139	LF87-0136-02	1	0	0	0	1	\$2.406
W39	LF87-0328-02	X140	LF87-0328-02	1	0	0	0	1	\$22.936
W40	LF87-0330-01	X142	LF87-0330-01	1	0	0	0	1	\$12.884
W41	LF87-0360-02	X144	LF87-0360-02	1	0	0	0	1	\$22.936
W53	LF87-0137-02	X146	LF87-0137-02	1	0	0	0	1	\$4.579
W43	LF87-0440-01	X147	LF87-0440-01	1	0	0	0	1	\$137.681
W44	LF87-0443-01	X158	LF87-0443-01	1	0	0	0	1	\$137.681
W45	LF87-0509-02	X169	LF87-0509-02	1	0	0	0	1	\$77.791
W46	LF87-0590-01	X177	LF87-0590-01	1	0	0	0	1	\$77.398
W47	LF87-0694-01	X185	LF87-0694-01	1	0	0	0	1	\$10.918
W48	LF87-0695-01	X187	LF87-0695-01	1	0	0	0	1	\$5.772
W42	LF87-0696-01	X189	LF87-0696-01	1	0	0	0	1	\$22.390
W49	LF87-0697-01	X191	LF87-0697-01	1	0	0	0	1	\$305.144
W50	LF87-0699-01	X211	LF87-0699-01	1	0	0	0	1	\$20.035
W52	LF87-0701-02	X213	LF87-0701-02	1	0	0	0	1	\$63.593
W51	LF87-0707-01	X220	LF87-0707-01	1	0	0	0	1	\$15.984
W54	LF87-0336-01	X226	LF87-0336-01	1	0	0	0	1	\$10.872
W55	LF87-0697-02	X228	LF87-0697-02	1	0	0	0	1	\$305.144
W56	LF87-0402-04	X248	LF87-0402-04	1	0	0	0	1	\$305.144

**Tabla 3B** - Listado de productos embarcables del cliente piloto, se muestra detalle de precio de venta, costo de venta, volumen de ventas para el trimestre Julio-Septiembre 2009 y su correspondiente margen de utilidad bruto y monto de utilidad bruta

PROJECT	N/P PADRE	SUB ASSY NUMBER	SECUENCIA	FU	WELDING		SAW		TTL MFG TIME [MIN]	TTL MFG TIME [MIN]	# DE MAQUINAS DISPONIBLES EN LA PLANTA POR PROCESP			TAMAÑO DE LOTE	
					SCMM	RCMM	SCSAW	RCSAW			0	<>0	TTL		
ALCATEL	W1		A	1	0	0	0	0	192	15	116	4	120	100	
ALCATEL		x1	B	1	0	0	0	0	7.338	258	172	8	120	100	
ALCATEL		x2	B	1	0	0	0	0	270	270	115	5	120	100	
ALCATEL		x3	B	2	0	0	0	0	108	108	113	7	120	100	
ALCATEL		x4	B	0	0	0	0	0	40.2	40.2	117	3	120	100	
ALCATEL		x5	B	0	0	0	0	0	90	90	115	5	120	100	
ALCATEL		x6	B	0	0	0	0	0	178.2	178.2	113	7	120	100	
ALCATEL		x7	F	0	0	0	0	0	300	300	115	5	120	100	
ALCATEL		x8	1	0	0	0	0	0	258	258	113	7	120	100	
ALCATEL		x9	1	0	0	0	0	0	6.11598	6.11598	112	8	120	100	
ALCATEL		x10	2	0	0	0	0	0	0	0	113	7	120	100	
ALCATEL		x11	B	1	0	0	0	0	0	0	113	7	120	100	
ALCATEL		x12	B	1	0	0	0	0	0	0	113	7	120	100	
ALCATEL		x13	B	1	0	0	0	0	0	0	115	5	120	100	
ALCATEL		x14	B	1	0	0	0	0	66.35202	66.35202	111	9	120	100	
ALCATEL		x15	B	1	0	0	0	0	4.386	4.386	117	7	120	100	
ALCATEL	W2		A	1	0	0	0	0	30	30	120	9	120	100	
ALCATEL		x16	B	1	0	0	0	0	6	6	2	1	120	100	
ALCATEL		x17	C	1	0	0	0	0	14.54802	14.54802	318	110	10	120	100
ALCATEL		x18	C	2	0	0	0	0	2.8598	2.8598	0	0	0	120	100
ALCATEL		x19	C	1	0	0	0	0	2.67198	2.67198	0	0	0	120	100
ALCATEL		x20	C	1	0	0	0	0	2.67198	2.67198	0	0	0	120	100
ALCATEL		x21	C	1	0	0	0	0	13.94364	13.94364	0	0	0	120	100
ALCATEL		x22	B	2	0	0	0	0	1.914	1.914	0	0	0	120	100
ALCATEL	W3		A	1	0	0	0	0	6	6	0	0	0	120	100
ALCATEL		x23	B	1	0	0	0	0	3.49998	3.49998	78	0	0	100	100
ALCATEL		x24	B	1	0	0	0	0	6	6	0	0	0	100	100
ALCATEL		x25	C	1	0	0	0	0	35.23602	35.23602	48	0	0	100	100
ALCATEL		x26	C	2	0	0	0	0	2.094	2.094	60	115	5	120	100

Figura 22 – Estructuración de datos para desarrollo del modelo

- 1 Número de parte embarcable
- 2 Número de parte del subensamblable
- 3 Nivel en la estructura (A, B, C ó D)
- 4 Factor de uso en el producto embarcable
- 5 Procesos productivos requeridos para fabricar el producto
- 6 Numero de máquinas disponibles por tipo de proceso
- 7 Número de procesos productivos no utilizados
- 8 Número de procesos productivos utilizados
- 9 Número de procesos productivos totales
- 10 Lote mínimo de producción (MOQ – Minimum Order Quantity)

### 3.2. Estructura de Datos

#### MATRIZ DE PROCESOS (XMAP CON TIEMPOS DE CICLO)

#### FLUJO DE PROCESO (MAQUINA POR MAQUINA)

DE LOS A CORRER POR CADENA CON DEMANDA

Part Number	Demand	SMT													
		ETI ENT	DEK BOT	CYB BOT	PASTA BOT	CPA BOT	CPB BOT	OP BOT	ORB BOT	INSP BOT	INSP SMT	DEK TOP	CYB TOP	PASTA TOP	CPA TOP
RX-XH	2400.000	0.348	0.417	0.378	0.808	0.343	0.303	0.248	0.344	0.288	0.264	0.338	0.241	0.254	0.281
RX-ZQ	2400.000	0.000	1.872	2.880	1.878	7.264	4.487	4.838	4.288	6.888	6.216	2.417	4.817	0.000	11.604
RX-D6m	1260.000	0.348	0.421	0.382	0.813	0.340	0.223	0.182	0.377	0.688	0.247	0.404	0.248	0.288	0.302
RX-ZQ	3000.000	0.000	1.872	2.880	1.878	7.264	4.487	4.838	4.288	6.888	6.216	2.417	4.817	0.000	11.604

TIEMPOS DE CICLO POR MODELO Y POR MAQUINA O PROCESO

#### TIEMPOS DE SETUP

TIEMPOS DE SETUP POR MAQUINA O PROCESO

Part Number	Demand	SMT													
		ETI ENT	DEK BOT	CYB BOT	PASTA BOT	CPA BOT	CPB BOT	OP BOT	ORB BOT	INSP BOT	INSP SMT	DEK TOP	CYB TOP	PASTA TOP	CPA TOP
RX-XH	2400.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	1800.000	1800.000	1800.000	1800.000	3600.000	3600.000	3600.000
RX-ZQ	2000.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	1800.000	1800.000	1800.000	1800.000	3600.000	3600.000	3600.000
RX-ZQ	6900.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	1800.000	1800.000	1800.000	1800.000	220.000	20.000	20.000
RX-D6m	1260.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	1800.000	1800.000	1800.000	1800.000	20.000	20.000	20.000
RX-ZQ	3000.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	3600.000	1800.000	1800.000	1800.000	1800.000	20.000	20.000	20.000

MODELO

#### YIELD POR MODELO

Part Number	Yield
RX-XH	95.000%
RX-ZQ	85.000%
RX-ZQ	98.000%
RX-D6m	75.000%
RX-ZQ	80.000%

Figura 23 – Representación de Estructura de Datos

### 3.3. Diagrama de Proceso

#### DIAGRAMA GENERAL DE PROCESO

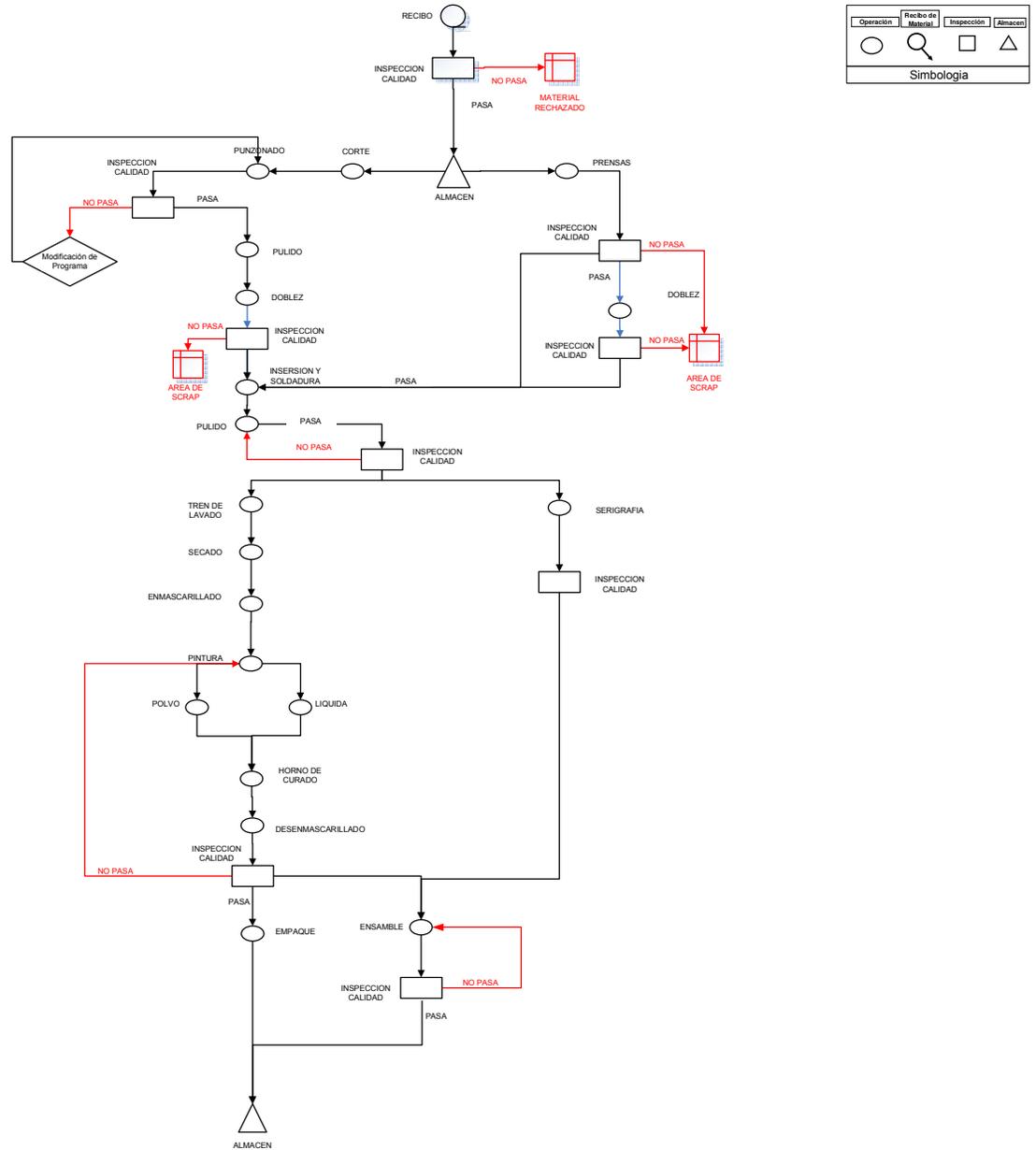


Figura 24 – Diagrama General de Procesos de la Planta de Manufactura Metal Mecánica

### 3.4. Representación gráfica del modelo conceptual

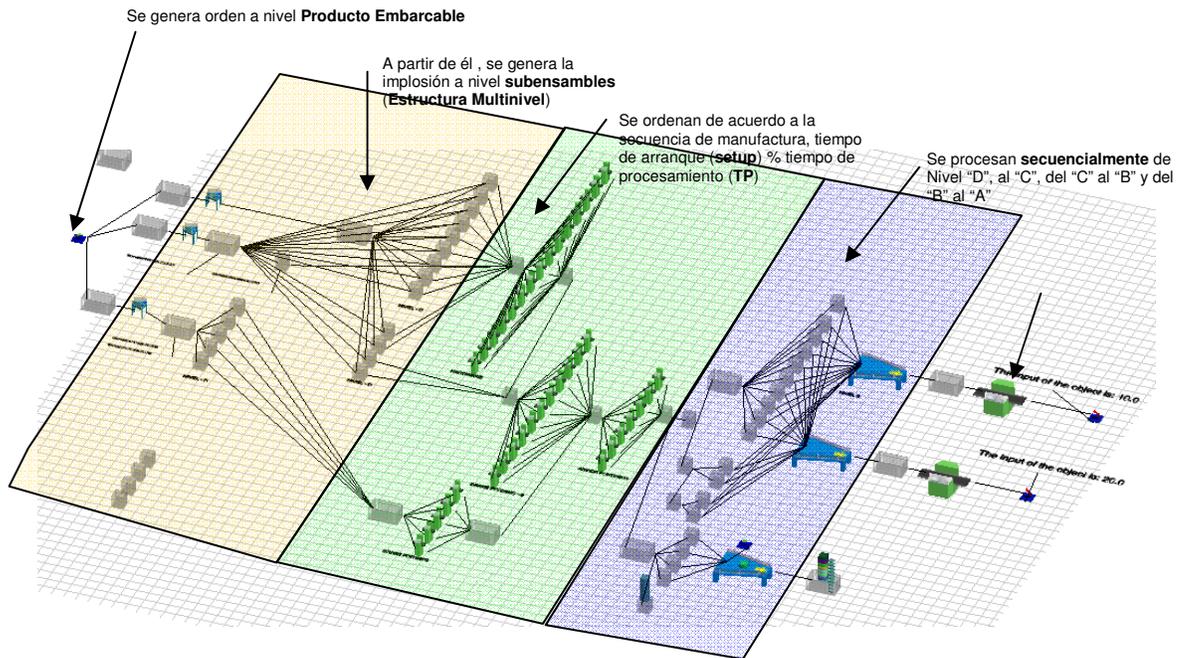


Figura 25 – Representación Gráfica del Modelo Conceptual (Estructura Multinivel)

### 3.5. Objetivo del Modelo:

Generar la secuencia óptima de manufactura que maximice las utilidades de la planta, sujeta a restricciones de demanda, tiempo de entrega, capacidad disponible y secuencia de manufactura (estructura multinivel).

Las utilidades son el resultado de la diferencia aritmética entre los ingresos por ventas generados (producto del volumen de cada ensamble por su respectivo precio de venta) menos los costos incurridos. Se tienen 5 tipos de costos: (1) Costo de transformación también conocido como costo de venta, (2) Costo del inventario, (3) Costo de entregas tardías, (4) Costo de tiempo extra y (5) Costo de arranque.

### 3.6. Datos de entrada:

- 1) Inventario Inicial de producto
- 2) Tiempo de preparación<sup>5</sup> (setup), es específico a cada número de parte y es de suma importancia para la correcta planeación de recursos, tiene un impacto directo en la eficiencia.
- 3) Tiempo de procesamiento en cada estación de trabajo
- 4) Eficiencia del proceso, la cual. en este caso, ha sido calculada a partir de un análisis histórico de 12 meses y se refleja en el modelo como un promedio → 90%
- 5) Secuencia de Manufactura
- 6) Estructura del Producto en niveles (BOM Indexado Multinivel)

---

<sup>5</sup> Se divide entre el MOQ (*Minimum Order Quantity*) de cada subensamble y se le suma al tiempo de procesamiento en cada uno de los procesos por los que el producto será transformado

- 7) Factores de Uso (número de veces que cada subensamble es utilizado en el producto embarcable)
- 8) Tamaño de Lote Mínimo a Construir (MOQ – **Minimum Order Quantity**), la planta no debe producir un número inferior al MOQ ya que no alcanzaría su punto de equilibrio, es decir, que los costos involucrados sean cubiertos por la absorción generada por dicha producción
- 9) Margen de utilidad bruta estándar (SGPM – **Standard Gross Profit Margin**)

### 3.7. Variables de Decisión:

$X_{i,j}$  Producción de i-ésimo producto en el j-ésimo día de la semana  
 $i=1, 2, \dots, 267$   
 $j=1, 2, \dots, 7$

$I_{i,j}$  Inventario Inicial de i-ésimo producto en el j-ésimo día de la semana  
 $i= 1, 2, \dots, 267$   
 $j=1, 2, \dots, 8^6$

---

<sup>6</sup> El  $I_{i,8}$  es el inventario del producto i en el día 8, esto es, el **inventario final** al término de la semana

$Y_k$  Demanda Insatisfecha del  $k$ -ésimo producto, donde  $k$  identifica a los productos padre  
 $k= 1, 2, \dots, 56$

$Z_{i,j}$  Es una variable binaria no negativa, que indica si el producto  $i$  se produce en el día  $j$ .

$$Z_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } X_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{si } X_{i,j} = 0 \end{cases}$$

$$i= 1, 2, \dots 267$$

$$j=1, 2, \dots 7$$

Nota: El Lote Mínimo permisible del  $i$ -ésimo producto está en función del MOQ (*Minimum Order Quantity* por sus siglas en inglés) y utiliza una Restricción tipo **Diodo** que activa o desactiva esta variable binaria en función a la cantidad total a producir, esta cantidad deberá ser mayor o a lo sumo igual al MOQ para poder ejecutar la producción.

$D_j, d_j$  Son variables utilizadas para realizar el **balanceo de la producción neta por día** y expresa precisamente la diferencia de volúmenes de producción entre el día  $j+1$  y el día  $j$ . Esta diferencia aritmética puede ser positiva, negativa o cero. A fin de poderlas utilizar en un modelo de programación lineal como el creado en este proyecto de tesis, se definen como la diferencia de dos variables no negativas. En el planteamiento de las restricciones se detalla la lógica seguida.

$$j= 1, 2, \dots 7$$

Nota: Estas variables aparecen en la F.O. con un coeficiente negativo que penaliza la utilidad y por lo tanto el modelo las fuerza a tomar valores de cero o muy pequeños.

### 3.8. Restricciones:

- 1) **Restricción de capacidad**, cantidad de equipos y sus respectivos horarios de servicio (tal como se muestra en la Tabla 4) donde TP es el *Tiempo de Procesamiento* del i-ésimo producto en el recurso de capacidad limitada respectivo *m*. Está planteada a nivel subensamble.

TABLA RESUMEN DE CAPACIDAD REQUERIDA VS. CAPACIDAD DISPONIBLE

DIA	CORTE DE PRECISION			PUNZONADO RNCN 58		
	TIEMPO NECESARIO	SIGNO	TOTAL CAPACIDAD	TIEMPO NECESARIO	SIGNO	TOTAL CAPACIDAD
1	3.64	<=	1440.00	2870.02	<=	10080.00
2	1.91	<=	1440.00	518.34	<=	10080.00
3	1.91	<=	1440.00	518.34	<=	10080.00
4	1.91	<=	1440.00	518.34	<=	10080.00
5	1.91	<=	1440.00	518.34	<=	10080.00
6	1.91	<=	1440.00	518.34	<=	10080.00
7	1.91	<=	1440.00	513.26	<=	10080.00

**Tabla 4** – Muestra la capacidad requerida por los productos demandados por el cliente vs. la capacidad disponible por día por proceso

$$\sum TP_i X_{i,j} < \text{Capacidad}_m \quad [N^\circ \text{ de restricciones } 10 * 7]$$

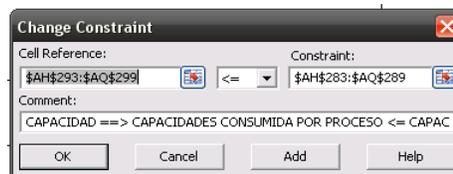
$$i = 1, 2, \dots, 267$$

$$j = 1, 2, \dots, 7$$

$$m = 1, 2, \dots, 10; \quad (m = \text{recursos, por ejemplo, doblez})$$

En el modelo:

L.I.	SIGNO	L.D.
SAH\$293 : SAQ\$299	<=	SAH\$283 : SAQ\$289
CAPACIDAD CONSUMIDA		CAPACIDAD DISPONIBLE



2) **Restricción de Balance**, esta restricción se asegura de que el inventario inicial más la producción menos el inventario final sea siempre cero, lo anterior permite mantener la igualdad matemática entre entradas y salidas. Se definen fórmulas específicas para cada parte considerando el nivel que guarda con respecto al producto embarcable, esta restricción ha sido creada para controlar estructuras multinivel en el que la dependencia del subensamblable y el producto embarcable contempla factores de uso y por supuesto, el nivel (A, B, C o D) de la parte en la estructura. Es una restricción que prácticamente, define secuencia de manufactura en función al nivel de cada subensamblable en la estructura. Esta planteada a nivel subensamblable.

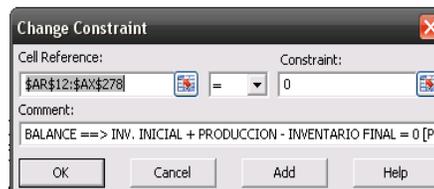
$$I_{i,j} + X_{i,j} - FU_i * X_{i',j} - I_{i,j+1} = 0; i \text{ es subensamblable de } i' [N^\circ \text{ de restricciones } 267 * 7]$$

$$i = 1, 2, \dots, 267$$

$$j = 1, 2, \dots, 7$$

En el modelo:

	LADO IZQUIERDO	SIGNO	LADO DERECHO
	\$ARS12 : \$AXS278	=	0
EMBARCABLE	INV. INICIAL + PROD. - INV. FIN		CERO
SUBENSAMBLE	INV. INICIAL + PROD. - (F.U.) (PROD. PADRE) - INV. FIN		CERO



- 3) **Restricción de demanda**, el inventario final de la semana ( $I_{k,8}$ ) más la demanda insatisfecha debe ser mayor o a lo sumo igual a la demanda del cliente. Está planteada a nivel producto embarcable, es la única restricción que solo trabaja con los productos embarcables.

$$I_{k,8} + Y_k \geq \text{Demanda } k \quad [\text{N}^\circ \text{ de Restricciones } 56]$$

$k = 1, 2, \dots, 56;$        $k$  representa a los productos embarcables, “top level” o producto padre

En el modelo:

LADO IZQUIERDO	SIGNO	LADO DERECHO
\$BC\$12 : \$BC\$67	>=	\$BD\$12 : \$BD\$67
INV. FINAL DE LA SEMANA ( $I_{i,8}$ ) + DEMANDA INSATISFECHA		DEMANDA DEL CLIENTE



4) **Restricción de balance de producción por día.**

$$Y_j = D_j - d_j$$

[N° de Restricciones

4]

$$\sum_i X_{i,j} - \sum_i X_{i,j+1} = D_j - d_j$$

De tal forma que si:

$$\sum_i X_{i,j} > \sum_i X_{i,j+1} \quad \text{Entonces} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_j > 0 \\ d_j = 0 \end{array} \right.$$

Y:

$$\sum_i X_{i,j} < \sum_i X_{i,j+1} \quad \text{Entonces} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_j = 0 \\ d_j > 0 \end{array} \right.$$

Además:

$$\sum_i X_{i,j} = \sum_i X_{i,j+1} \quad \text{Entonces} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_j = 0 \\ d_j = 0 \end{array} \right.$$

### 3.9. Función Objetivo:

Se plantea la función objetivo para la semana 28 (Julio 19 a Julio 25 del 2009), en la cual existe una demanda solo para 16 **productos embarcables** tal como se describe en el TAB de “Demanda” del archivo de trabajo al que denominaremos “**Modelo de programación Matemática**” (incluido en el CD anexo a este proyecto de Tesis Profesional). Esta demanda debe satisfacerse en los días hábiles laborables de la planta, es decir, Lunes, Martes, Miércoles y Jueves, esto es,  $j=1, \dots, 4$ ; si este tiempo no fuera suficiente, se podrán utilizar los días Viernes, Sábado y Domingo, esto es,  $j=5, \dots, 7$ ; para ello, se requerirá de tiempo extra (TE) el cual tendrá un costo adicional ya que el personal de esta planta labora jornadas de 12 horas durante 4 días, esto es, 48 horas a la semana, cualquier hora adicional a éstas, tendrá un costo adicional denominado “*Costo de Tiempo Extra*”, tal como se muestra en la tabla de costos del mismo archivo, sección coeficientes.

$$\text{MAX } Z = \left( \sum_{k=1}^{56} C1_k * D_k - \sum_{k=1}^{56} C1_k * Y_k \right) - \left( \sum_{i=1}^{267} C2_i * \sum_{j=1}^7 X_{ij} \right) - \left( \sum_{i=1}^{267} C3_i * (I_{i,0} - I_{i,1}) \right) - \left( \sum_{k=1}^{56} C4_k * Y_k \right) - \left( \sum_{i=1}^{267} C5_i * \sum_{j=5}^7 X_{ij} \right) - 175 * \left( \sum_{i=1}^{267} C6_i * \sum_{j=1}^7 Z_{ij} \right) - 100 * \left( \sum_{j=1}^3 D_{jt} * t_j \right)$$

Donde:

$C1_k$ = Precio de Venta del producto k-ésimo,  $k= 1, \dots, 56$

$C2_i$ = Costo de Transformación del producto i-ésimo,  $i=1, \dots, 267$

$C3_i$ = Costo de Inventario del producto i-ésimo,  $i=1, \dots, 267$

$C4_k$ = Costo de Entregas Tardías del producto k-ésimo,  $k=1, \dots, 56$

$C5_i$ = Costo de Tiempo Extra del producto i-ésimo,  $i=1, \dots, 267$

$C6_i$ = Costo de Arranque del producto i-ésimo,  $i=1, \dots, 267$

## PLANTEAMIENTO FUNCION OBJETIVO

$$\text{MAX } U=I-C$$

### INGRESO

PRODUCTO DEL PRECIO DE VENTA POR LA CANTIDAD DE PRODUCTO EMBARCABLE DEMANDADO POR EL CLIENTE

### COSTOS

#### C2

**COSTO DE TRANSFORMACION:** PRODUCTO DE LA CANTIDAD PRODUCIDA ( $x_i$ ) POR SU RESPECTIVO COSTO DE TRANSFORMACIÓN TAMBIÉN LLAMADO, COSTO DE VENTA, ESTE COSTO PROVIENE DEL ERP DE LA EMPRESA Y ESTÁ DEBIDAMENTE CALCULADO POR EL ÁREA DE COSTOS DE LA PLANTA, EL COSTO DE TRANSFORMACIÓN INCLUYE, COSTO DE MATERIA PRIMA, LABOR & GASTOS INDIRECTOS DE FABRICACION (GIF).

#### C3

**COSTO DE INVENTARIO:** PRODUCTO DEL INVENTARIO FINAL DEL SUBENSAMBLE ( $I_{i,8}$ ) Y EL 2.5% DEL SU CORRESPONDIENTE COSTO DE TRANSFORMACION. ESTE 2.5% ES REPRESENTATIVO DEL COSTO DE INVENTARIO EN LA PLANTA, SEGÚN LOS DATOS HISTÓRICOS ANALIZADOS EN LOS ULTIMOS 6 MESES.

#### **C4**

**COSTO DE ENTREGAS TARDÍAS:** PRODUCTO DE LA DEMANDA INSATISFECHA ( $Y_k$ ) Y EL 5.0% DE SU CORRESPONDIENTE COSTO DE TRANSFORMACION. ESTE 5% ES REPRESENTATIVO DEL COSTO DE ENTREGAS TARDÍAS EN LA PLANTA, SEGÚN DATOS HISTÓRICOS ANALIZADOS EN LOS ÚLTIMOS 18 MESES (PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA).

#### **C5**

**COSTO DE TIEMPO EXTRA:** PRODUCTO DE LA CANTIDAD DE SUBENSAMBLE ( $X_i$ ) PRODUCIDO LOS DIAS 5, 6 Y/O 7 (VIERNES, SÁBADO Y/O DOMINGO) Y EL 1.0% DE SU CORRESPONDIENTE COSTO DE TRANSFORMACION. ESTE 1.0% ES REPRESENTATIVO DEL COSTO DEL TIEMPO EXTRA EN LA PLANTA, SEGÚN LOS DATOS HISTORICOS ANALIZADOS EN LOS ÚLTIMOS 18 MESES (PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA).

#### **C6**

**COSTO DE ARRANQUE:** PRODUCTO DE LA CONSTANTE 150 Y 0.5% DEL CORRESPONDIENTE COSTO DE TRANSFORMACIÓN DE AQUEL PRODUCTO QUE SE HAYA MANUFACTURADO EN LA SEMANA EN CUESTIÓN, ESTO ESTÁ DADO POR LA VARIABLE BINARIA  $Z_{i,j}$ . ESTE COSTO DE ARRANQUE CUBRE LOS COSTOS FIJOS INCURRIDOS POR LA PLANTA AL PRODUCIR DICHO PRODUCTO. ESTE CÁLCULO ESTÁ BASADO EN EL ANÁLISIS DE DATOS EN LOS ÚLTIMOS 18 MESES (PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA).

Lógica de cálculo de cumplimiento de demanda:

$$\text{Inventario Inicial} + \text{Producción Total} + \text{Demanda Insatisfecha} \geq \text{Demanda}$$

Ejemplificación Numérica:

- $I_{k,8} = 100$  → Inventario Final del k-ésimo producto
- $D_k = 80$  → Demanda del k-ésimo producto
- $I_{k,8} - D_k = 20$  → El ingreso por ventas no podrá ser mayor al producto de la demanda ( $D_k$ ) por el respectivo Precio de Venta ( $C1_i$ ), es decir, el modelo no restringe la producción por arriba de la demanda del cliente, sin embargo, esto no implica que el cliente lo comprará, por ello, el ingreso por ventas considera las siguientes restricciones:

$$\text{Si } I_{k,8} \leq D_k \rightarrow \text{Ingreso por Ventas } V = I_{k,8} * C1_k$$

$$\text{Si } I_{k,8} > D_k \rightarrow \text{Ingreso por Ventas } V = D_k * C1_k$$

### **3.10. Método de Optimización:**

Programación Lineal, la optimización implica determinar la producción qué se debe fabricar y en qué cantidades para que se obtenga el máximo beneficio teniendo en cuenta las limitaciones técnicas y humanas.

Entregables del Modelo de Optimización:

1. Secuencia de producción a Nivel Subensamble que minimice el makespan (genere por tanto el mayor margen de contribución marginal) y maximice el número de órdenes cerradas en tiempo y cantidad.
2. Productos Embarcables cumplidos (cantidad y tiempo)
3. Utilidad Bruta alcanzada con la secuencia óptima propuesta (considerando Ingresos, Costo de Transformación, Inventario, Tiempo Extra y Entregas tardías)

### 3.11. Flujo del Modelo:

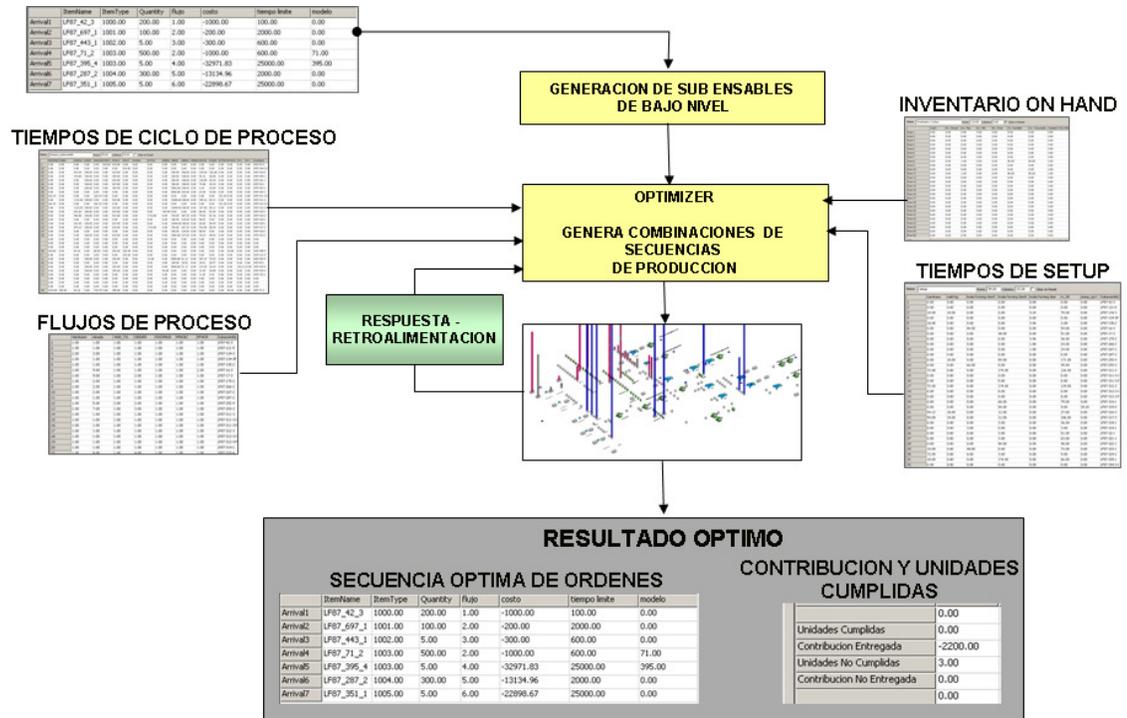


Figura 26 – Flujo del Modelo de Optimización

## CAPITULO IV

### RESULTADOS DEL MODELO Y CONCLUSIONES DE LA PRIMERA PARTE

Se ha creado un modelo de programación matemática que genera el plan de producción óptimo, organizando la manufactura de ensambles con estructuras multinivel y considerando tiempos de preparación, de procesamiento, tamaños de lote, capacidad instalada, costos de operación, disponibilidad de maquinaria, horarios de servicio y la demanda. Este modelo resuelve de manera eficiente el problema de programación de la producción en escenarios complejos, caracterizados por la alta mezcla de modelos y el bajo volumen; HM-LV-HC, por sus siglas en Inglés (***High Mix – Low Volume – High Complexity*** → Alta Mezcla-Bajo Volumen-Alta Complejidad) y representativos de la nueva realidad que enfrenta desde hace ya al menos un lustro, la industria electrónica en México. Lo anterior hace que la actividad de planeación de la producción dependa de un cúmulo de variables que interactúan dinámicamente creando escenarios complejos en los que fácilmente se pierde el control y se eliminan posibilidades de creación de valor.

El modelo matemático desarrollado ha generado soluciones factibles permitiendo, en cuestión de minutos, obtener el plan de producción óptimo por día y por subensamble.

Así mismo, facilita la gestión de planeación de la producción en la planta de forma tal que ahora, el actual departamento de planeación que invierte de 5 a 8 horas en producir un plan de producción, (1) invertirá únicamente 30" en verificar los parámetros de programación del modelo, entiéndase, el número de máquinas disponibles por proceso, los costos, los precios de venta y los MOQ's, para asegurar que son actuales, (2) Elegirá el proyecto que desea planear, (3) Elegirá la semana que se desea planear y (4) Cargará el Inventario Inicial de cada subensamble; con ello, el modelo correrá y producirá el plan de producción que generará el máximo nivel de utilidad bruta posible.

### DATOS DE ENTRADA

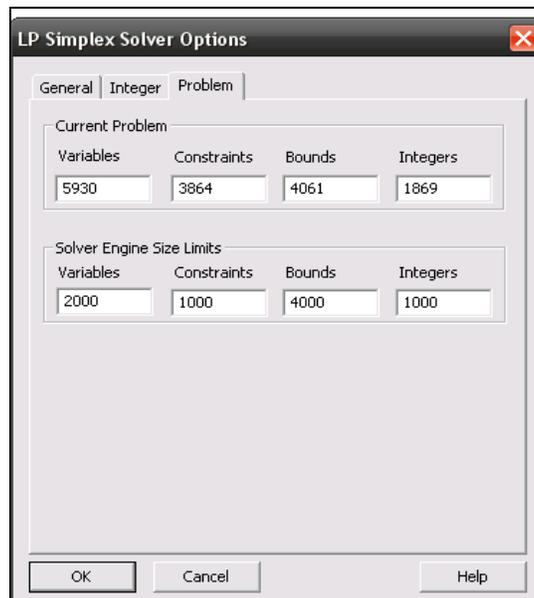
PLANEADOR DEL PROYECTO ALIMENTA EL MODELO CON LOS SIGUIENTES DATOS

1]	PROYECTO A PLANEAR	A
2]	SEMANA A PLANEAR	WW34
3]	INVENTARIO INICIAL DE SUBENSABLES CARGADO	Y
4]	PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN VERIFICADOS	Y

El modelo está cargado en una hoja de cálculo en Microsoft Excel y utiliza **Premium Solver** para resolver el problema y generar la solución óptima, en párrafos posteriores se explica a detalle el origen y uso de esta aplicación la cual resultó muy efectiva dada la naturaleza del modelo.



**Figura 27** – Software utilizado para resolver el modelo matemático: Solver Premium Plus



**Figura 28** – Características del Modelo después de cargarlo en Solver Premium

[A] PROJECT TO PLAN		A	
[B] WORK WEEK TO PLAN		WW34	
Structural Variable	Concept	Classification	Value
$X_{A,j}$	Mix of Shippable Products		16
$D_k$	Total Demand of Shippable Products		2215
$X_{A,j}$	Shippable Products shipped on time		14
$X_{A,j}$	On time delivery		88%
$Y_k$	Unfulfilled Demand		315
$I_{i,s}$	Total Initial Inventory Subassembly		7314
$I_{i,s}$	Total Final Inventory Subassembly		4096
	Revenue		\$ 81,634.88
	Transformation Inventory		\$ 196,777.85
	Delayed Deliveries		\$ 8,183.99
	Overtime		\$ 1,215.00
	Setup		\$ 519.48
	Gross Profit		\$ (124,541.97)
TRADITIONAL			
OPTIMIZATION MODEL			
			Value
			16
			2215
			16
			100%
			0
			7314
			2815
			\$ 132,773.53
			\$ 123,812.69
			\$ 876.87
			\$ -
			\$ -
			\$ -
			\$ 8,083.97
COMPARISON			
	Value	Unit of Measurement	
	0	Products (Mix)	
	0	Units	
	2	Products (Mix)	
	13%	Percentage	
	-315	Products (Mix)	
	0	Units	
	-1281	Units	
	\$ 51,138.66	USD	
	\$ (72,965.16)	USD	
	\$ (7,307.12)	USD	
	\$ (1,215.00)	USD	
	\$ (519.48)	USD	
	\$ -	USD	
	\$ 132,625.94	USD	

**Tabla 5 – Resultados del Sistema de Planeación de la Producción Tradicional vs. Sistema de Planeación utilizando el Modelo Matemático**

Cabe mencionar que el modelo está preparado para correr todos los proyectos de la planta y a través de una macro, actualizar la variables de demanda y capacidad, y programar la producción con total exactitud y vigencia, esto es flexibilidad que permite incluso generar diferentes escenarios de programación de la producción asumiendo distintos escenarios de demanda y/o capacidad, facilitando el proceso de toma de decisiones y gestión administrativa.

Hasta momento, es posible observar el valor de la solución propuesta, a través de la cual, en términos de minutos, es posible conocer con total precisión los subsistemas a producir, las cantidades exactas por día específico e incluso, el tiempo extra que será necesario para satisfacer la demanda del cliente, la utilidad que generará dicha producción y con ello se ha dado un paso fundamental y decisivo en la manera de operar la planta.

Este modelo se convierte en una herramienta de trabajo básica para generar soluciones óptimas que ayuden a elevar las utilidades de la planta, su flexibilidad y con ello, sus ventajas competitivas. El modelo está planteado de forma tal. que el planeador actual será capaz de utilizarlo fácilmente y elegir simplemente, el proyecto y la semana que desea planear para obtener soluciones en fracciones de tiempo, y con alto grado de exactitud. El modelo permite la actualización de coeficientes y restricciones, está planteado de tal forma que pueden ser modificados en cualquier momento y de manera sencilla, es un modelo flexible, escalable y que interactúa con el sistema ERP (***Enterprise Resource Planning***, por sus siglas inglés) lo cual reduce significadamente los costos de operación y mantenimiento del modelo.

El proyecto piloto con el cual se decidió probar el modelo, fue el que actualmente genera el menor nivel de utilidad de la planta (de hecho, genera pérdidas financieras), **Ciente A**, el modelo ha demostrado que es posible maximizar las utilidades a través de programación matemática y esta diseñado para extender el análisis y propuesta de soluciones para el 100% de clientes de la planta.

Premium Solver es la herramienta utilizada para resolver el modelo matemático, se trata de un optimizador desarrollado por la empresa Front Line Systems Inc. soportado en Excel. Es una aplicación totalmente compatible con el Solver estándar del Excel. Esta herramienta permite solucionar problemas de la programación lineal y cuadrática con 40 veces el número de las variables (hasta 8.000) vs. Solver estándar del Excel, problemas de programación entera con 10 veces mas de variables permisibles, y problemas no lineales generales con 2.5 veces el número de las variables permisibles en el tradicional Solver de Excel.

Existe además un aumento considerable de la velocidad lo cual es especialmente sensible en problemas no lineales de todas las clases, y en problemas lineales con restricciones de número entero, donde la plataforma Premium Solver puede ser de 10 a 200 veces más rápida que el tradicional Solver de Excel. También soluciona los problemas cuadráticamente obligados (QCP) que van más allá de la programación cuadrática convencional (QP).

El Solver evolutivo híbrido en la plataforma superior del Solver, que genera una combinación única de algoritmos genéticos y de métodos clásicos de la optimización no lineal, permite optimizar modelos con cualquier función del Excel. El Solver supera otros optimizadores basados en algoritmos genéticos, como se describió en el Capítulo 2 de este proyecto de tesis, con todo es más fácil utilizar y completamente compatible con los modelos existentes creados con el Solver estándar del Excel.

Se está utilizando la versión V8.0 la cual es completamente compatible con el Excel 2007, donde quizá la mejora más grande del Excel en por lo menos de 10 años, es la nueva interfaz "cinta" que permite diseñar hojas de cálculo enormes con 16.384 columnas y 1.048.576 filas, muy lejos del límite de las 256 columnas y de 65.536 filas del Excel tradicional. Esto hace mucho más fácil presentar los modelos complejos como el que representa la presenta tesis, sin tener que dividir las tablas grandes de la información.

## **SEGUNDA PARTE**

*“Diseño de Solución e Implementación de Manufactura Esbelta”*

Hasta este momento, se ha logrado crear un modelo de planeación de la producción el cual se alimenta de datos existentes en el sistema de ERP de la planta (aunque también puede ser alimentado con datos de tablas provenientes de una hoja de calculo), procesa los datos pasando por un escrutinio matemático rígido el cual contempla, los tiempos de ciclo, la secuencia de manufactura, las fechas y cantidades requeridas por el cliente y a través de la programación lineal. genera una solución factible que permite definir la secuencia, cantidad y modelo de subensamble que habrá de seguirse para obtener la máxima utilidad bruta en la planta.

Este es un paso importante en la búsqueda de la excelencia operativa y financiera, y se permite probar que a través de herramientas de optimización basada en programación matemática, las plantas generan soluciones robustas, objetivas y efectivas que garantizan la creación de estructuras proveedoras de datos infalibles en el proceso de toma de decisiones. Esto es invaluable, ya que es a través de estos datos, como se crea el marco de trabajo para garantizar resultados, ahora y en el futuro, y quizá lo más importante aún, es un modelo flexible, “escalable”, actualizable, que permitirá reflejar nuevos productos, nuevas estructuras de materiales, nuevos tiempos de ciclo, adición de equipo de manufactura, cambios de distribución de planta, etcétera, etcétera, manteniendo exactitud en el cálculo y vigencia en la solución generada por el modelo.

Lo que sigue a continuación es la creación de un “sistema operativo” que genere el marco de trabajo en el que la solución siga siendo óptima, es decir, definir los espacios, los flujos, las políticas de inventario, los equipos de trabajo, labor directa y labor indirecta y los procedimientos en general; para asegurar que los productos son manufacturados con la menor cantidad de recursos y el menor desperdicio posibles.

## CAPITULO V

### MARCO TEÓRICO

#### 5.1. INTRODUCCION

El sector industrial manufacturero es uno de los mayores contribuyentes a la actividad económica mundial. Las empresas integradas en el sector deben afrontar las demandas cada vez más cambiantes y exigentes del mercado con productos cada vez más competitivos en cuanto a precio, calidad y nivel de servicio. Ante esta situación, los procesos productivos de las empresas deben estar adaptados para responder con mayor agilidad, rapidez y al menor costo posible a las exigencias de los clientes.

El **Value Stream Mapping** (VSM) es una técnica desarrollada al amparo del modelo de la producción esbelta (**Lean Production**) con el fin de apoyar a las empresas manufactureras en el proceso de rediseño de sus entornos productivos. Si bien, su nivel de desarrollo teórico y práctico es alto, son limitados los análisis divulgados en el ámbito científico que exploren en profundidad su verdadera aplicabilidad en diferentes entornos de producción seriada. Así, el propósito de esta segunda parte del proyecto de tesis, es el análisis de la aplicabilidad y los respectivos resultados generados de la técnica de VSM.

Se fundamenta en la aplicación secuenciada de las siguientes etapas por parte de un equipo creado para tal fin:

1. Elección de la familia de productos
2. Mapeado o cartografiado del estado inicial referente al flujo de materiales y de su información asociada
3. Mapeado de la situación futura sobre la base de pautas aportadas por la producción esbelta
4. Definición e implantación de un plan de trabajo

El cumplimiento de las fases descritas, habrá de derivar en el rediseño e implantación de un nuevo modelo productivo adaptado en un mayor grado a las exigencias actuales y futuras de costo y nivel de servicio.

El VSM se percibe entonces como una técnica práctica para el fin que se trata de alcanzar: el diseño y creación de entornos productivos flexibles y eficientes donde la solución obtenida de la programación matemática siga siendo óptima y esta combinación generen el nivel de competencia requerido por la planta para subsistir en el tiempo, y convertirse de hecho, en una referencia de productividad y rentabilidad.

## 5.2. LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

Un sistema productivo o manufacturero es una red de procesos orientada a un objetivo a través de la cual fluyen entidades. (Hopp et al., 2000)

- Tiene un objetivo principal. que generalmente será el de ganar dinero.
- Contiene procesos. Estos pueden ser los procesos físicos de fabricación habituales (corte, taladrado, soldadura...), pero también se incluyen otros procesos que soportan y apoyan a los procesos directos de fabricación o transformación de los productos (gestión de pedidos, expediciones, mantenimiento, etc.).
- Las entidades no incluyen solamente las piezas o productos fabricados, sino que también la información que se emplea para controlar el sistema.
- El flujo de entidades a través del sistema describe como se procesan los materiales y la información. La gestión de este flujo es la tarea más importante de un responsable de producción.
- Es una red de partes que interactúan. La gestión de estas interacciones es tan importante como la gestión de los procesos o entidades individuales.

Los entornos manufactureros o productivos varían de una forma importante dependiendo de la estructura de sus procesos, es decir, de la manera en que los productos fluyen por la planta fabril. Una posible clasificación genérica de los entornos manufactureros se refiere a la distinción de cuatro categorías principales (Hayes et al., 1979a, 1979b), (White et al., 2001)

#### 5.2.1. Talleres funcionales o job-shops

Se fabrican lotes pequeños de productos discretos con una gran variedad de rutas a través de la planta. El flujo a través de la planta es complicado, son comunes las diferentes preparaciones de máquinas, y el entorno se asemeja más a una atmósfera de proyecto que a una producción seriada.

#### 5.2.2. Líneas de flujo desconectadas

Los lotes de productos discretos son fabricados en un número limitado de rutas identificables. Las estaciones individuales entre las líneas no están conectadas por un sistema rítmico de manutención de materiales, por lo que se puede acumular inventario entre las estaciones. Se puede afirmar que los sistemas productivos dedicados a la manufactura en serie de lotes de piezas discretas responden a esta configuración.

#### 5.2.3. Líneas de flujo conectadas

La línea de montaje hecha famosa por Henry Ford responde a esta configuración. El producto es fabricado y montado a lo largo de una ruta

rígida conectada por un sistema de movimiento de materiales rítmico. Hoy en día, estas líneas están muy extendidas en las plantas de montaje de automóviles, pero no son muy comunes entre otros sectores.

#### 5.2.4. Procesos de flujos continuos

Productos continuos (comida, productos químicos, aceites, materiales para la construcción...) fluyen automáticamente a través de una ruta fija para conseguir grandes eficiencias y uniformidad de producto.

<i>Etapas ciclo de vida de producto, Estructura de procesos.</i>	<i>I. - Volumen y estandarización bajo una unidad de cada tipo.</i>	<i>II. - Multiplicidad de productos Bajo volumen.</i>	<i>III. - Pequeño catálogo, volumen más alto.</i>	<i>IV. - Alto volumen y estandarización, productos de consumo.</i>
Taller funcional (job-shop)	Imprenta comercial			No permisible
Línea de flujo desconectada (línea)		Equipamiento pesado		
Línea de flujo conectada (línea de ensamble)			Montaje de automóviles	
Flujo continuo	No permisible			Refinería de azúcar

**Tabla 6** – La matriz producto-proceso (Hayes et al., 1979a - 1979b)

La presente tesis se centra en el marco de la mejora de los sistemas productivos en la propia planta y principalmente en el entorno de la producción de partes o piezas discretas en líneas de flujo desconectadas, este es el esquema que mejor describe la situación actual.

### 5.3. EVOLUCION HISTÓRICA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

Desde el siglo XIX los sistemas productivos empleados en el sector industrial han ido evolucionando. Se podrían definir tres sistemas o modelos que han marcado las características principales de los métodos de producción, objetivos de las compañías, roles de los empleados y los tipos de productos a fabricar. Esto son: el sistema de Producción Artesana, la Producción en Masa y la Producción Esbelta.

Dichos cambios han venido impulsados sobre todo por el nacimiento y desarrollo de la industria de la automoción, "la industria de las industrias" según Peter Drucker, una de las que mayor actividad manufacturera ha generado y genera en el mundo (Womack et al., 1990). Las características definitorias de cada sistema o filosofía de producción se resumen a continuación en base a la evolución de la industria de construcción de automóviles.

#### 5.3.1. La producción artesana

La producción artesana es la que inicialmente se aplicó al inicio del desarrollo de la industria automovilística a finales del siglo XIX. Aún hoy en día subsisten unos pocos constructores muy selectos en el mundo con no pocas dificultades para seguir adelante con el sistema. Las características principales se resumen estructuradas en (Dicken, 2003), (Woll, 2003), (Peaucelle, 2000):

## **Roles y capacidades de los trabajadores**

- Profesionales altamente cualificados.
- Comprensión de los principios mecánicos, de diseño y de materiales con los que trabajan.
- En numerosos casos no existe división de trabajo entre mandos y mano de obra.
- Existencia de la figura del “esbeltor”, quien se dedica a ajustar las piezas entre si.
- Curva de carrera larga desde aprendiz a maestro artesano.

## **Métodos de producción**

- Herramientas y maquinaria flexible y multipropósito. . Gran variedad de trabajos.
- Disposición fija del producto base en la planta de fabricación y montaje.

## **Tipo de producto**

- Personalizado para cada diente.
- Chofer y mecánico necesario para el uso.
- Bajo volumen de producción y alto costo.
- Gran cantidad de variantes.
- Notable calidad del producto.

## **Objetivos**

- Hacer exactamente lo que el cliente demanda.
- Lograr las características del producto demandadas y personalización del mismo.

## **Problemas**

- Altos costos de fabricación.
- El costo se incrementa proporcionalmente al volumen de producción.
- Discontinuidad en la producción.
- Ningún sistema estándar de montaje.
- Poca consistencia y fiabilidad del producto.
- Dificultad de adoptar innovaciones tecnológicas.

### 5.3.2. La Producción en Masa

El gran impulsor de este sistema fue Henry Ford con el lanzamiento al mercado del modelo *Ford T* en 1908. Coche diseñado para la fabricación y de fácil uso y mantenimiento. "La clave de la Producción en Masa no fue la cadena de montaje móvil o continua, como creía y cree mucha gente, sino la total y coherente intercambiabilidad de las partes y la sencillez de su ensamble. Estas fueron las innovaciones que hicieron posible la cadena de montaje" (Womack et al., 2002). La Producción en Masa alcanza su cenit con la firma General Motors aproximadamente en 1955.

Las principales particularidades se podrían sintetizar en (Dicken, 2003), (Woll, 2003), (Peaucelle, 2000), (Duguay et al. 1997):

### **Roles y capacidades de los trabajadores**

- Trabajadores muy especializados, profesiones de creación específica (ingenierías industriales, producción, calidad...).
- Mano de obra de calificación baja o media. . Cada trabajador cumple una única tarea.
- Trabajadores intercambiables.

### **Métodos de producción**

- Herramientas de funcionalidades rígidas.
- Máquinas caras de un solo propósito.
- Trabajo aburrido y poco motivador.
- Intercambiabilidad completa y consistente de componentes y simplicidad de montaje.
- Las piezas y componentes son entregados a cada trabajador.
- Se emplea una cadena de montaje móvil.

## **Tipo de producto**

- Productos estandarizados.
- Cualquier usuario puede conducir y mantener un coche.
- Altos volúmenes de producción.
- Bajo costo por producto. A mayor volumen de producción menor costo.
- Baja variedad del producto.
- Baja calidad.

## **Objetivos**

- Marcar metas limitadas para permitieron número aceptable de defectos, una cantidad máxima de inventario y un estrecho margen de productos estándares.
- Altos costos para la mejora de las metas fijadas.
- Reducción de componentes necesarios para la fabricación del coche.

## **Problemas**

- Trabajo poco motivador, curva de carrera corta para los trabajadores.
- Baja calidad de los productos.
- Se elimina el énfasis de la Producción Artesanal en la calidad y en el orgullo del trabajo.

Hoy en día, el mundo industrial se encuentra en un periodo en el que el modelo de Producción en Masa, a pesar de sus desventajas y su cuestionamiento generalizado, sigue imperando en gran cantidad de industrias a lo largo y ancho del planeta. Si bien muchas de ellas han adoptado nuevas técnicas, experiencias o proyectos de mejora en técnicas de producción, su filosofía sigue basándose en los preceptos de la Producción en Masa (Womack et al., 1990), (Holweg et al., 2004).

### 5.3.3. La Producción Esbelta

También denominada con *Lean Production* o *Manufactura Esbelta*. Surge en Japón tras la segunda guerra mundial y la firma que va adaptando este enfoque es, en un inicio, Toyota. Por aquel entonces la economía japonesa mostraba las siguientes particularidades en cuanto al sector de la automoción (Womack et al., 1990), (Hines et a. 2004):

- Mercado doméstico de pequeño tamaño y demandando una amplia gama de vehículos.
- Buena posición de trabajadores y sindicatos en las negociaciones colectivas y no dispuestos a ser tratados como piezas intercambiables, tal y como ocurría con la Producción en Masa.
- Nula inmigración dispuesta a trabajar en condiciones desfavorables.

- Carencia de capital para proveerse de últimas tecnologías occidentales.
- Prohibición por parte del gobierno japonés de inversiones extranjeras directas.

Toyota, Nissan y otras marcas decidieron afrontar esta tesitura en base a producir coches con variedad de modelos nuevos bajo un enfoque diferente al imperante en el mundo occidental. Taiichi Ohno, ingeniero de Toyota y uno de los artífices del proyecto, denominó al nuevo enfoque Sistema de Producción Toyota (TPS) (Ohno, 1993), (Womack et al., 1990), (Womack et al., 1994), (Holweg et al., 2006). El TPS se sustenta en dos claves: El Justo a Tiempo o Just in Time (JIT) y la "autonomatización", Jidoka en japonés.

- La "autonomatización" significa la automatización con un toque humano; las máquinas han de ser capaces de detectar errores y defectos y actuar automáticamente en consecuencia.
- El JIT se refiere a la producción y entrega de los productos correctos, en la cantidad adecuada y en el preciso momento en el que se necesitan en el punto de consumo. El sustento en el que se basa el JIT es el uso del Kankan (tarjeta en japonés) como sistema de petición de materiales aguas arriba en el proceso, o sistema de tirón pull (Ohno, 1993) junto con la nivelación de la

producción (Hopp et al., 2002). El JIT es un término que ha sufrido cierta evolución que se expondrá en el punto 5.3.3.2.

Uno de los factores del éxito de Toyota consistió en la mejora en la reducción de los tiempos de preparación de maquinaria; lo que supuso una reducción significativa en los tamaños de lotes de fabricación, una mejora en la calidad de los productos al ser detectadas las piezas defectuosas antes y con menor costo en las partidas más pequeñas, y una adaptación a la demanda del mercado con diferentes modelos. Por otro lado, la reducción de los tiempos de cambio también supuso la simplificación de los mismos cambios y la posibilidad de que el propio operario pudiera efectuarlos involucrándose en la solución de los problemas que pudieran surgir.

Otros de los factores determinantes, fueron el logro del empleo vitalicio y la consecución de un salario gradual basado más en la antigüedad que en las funciones; a cambio de flexibilidad ante los cambios de puestos e implicación en las iniciativas de mejoras. De este modo, los trabajadores se convirtieron en miembros de la comunidad Toyota. Así, al convertir el costo de la mano de obra en costo fijo, adquirió sentido el aumentar la capacitación de los trabajadores.

Los operarios fueron organizados en equipos dirigidos por un líder en vez de un capataz, estos equipos se implicaban en procesos continuos y acumulativos de mejora llamados **kaizen**<sup>7</sup> en japonés.

Otra de las mejoras fue otorgar a los trabajadores la posibilidad de parar las líneas de montaje en el momento en que surgiese un problema para involucrarse directamente en la resolución del mismo, lo que trajo consigo grandes mejoras de calidad de los productos fabricados.

Hoy en día, Toyota, a diferencia de otras marcas, sigue empleando este sistema en sus cadenas de montaje final de automóviles, ya que divide toda la línea en segmentos de 20 estaciones con “buffers” de 5 unidades entre ellas para que los trabajadores puedan parar el segmento sin comprometer a toda la línea (Baudin, 2002).

La implantación plena del TPS derivó en las siguientes mejoras en estos diferentes aspectos (Womack et al., 1990):

#### **5.3.3.1. La cadena de suministro**

Las innovaciones realizadas en la mejora de toda la cadena logística fueron:

---

<sup>7</sup> Conceptos como kaizen, kanban, pull, takt time, flujo continuo, producción nivelada, heijunka, etc. serán analizados más detalladamente en el apartado 2.7.1. correspondiente al estudio del Value Stream Mapping.

- Organización de proveedores en filas funcionales. Se lanzan proyectos de mejora a la fila anterior de la cadena. Los proveedores de dicha fila colaboran entre ellos.
- Los proveedores participan en el lanzamiento y desarrollo de los productos dando soluciones al requerimiento de especificaciones funcionales por parte de Toyota. Mientras tanto, los productores en masa se dedican al diseño detallado de las piezas a suministrar.
- Hay participación accionarial y financiera entre las diferentes empresas que participan en la red.
- Se comparte personal entre las compañías.
- Se crea un nuevo modo de coordinar el flujo diario de las piezas dentro del sistema de suministro.

#### **5.3.3.2. Ingeniería de producto**

La ingeniería de producto abarcará también a la ingeniería de proceso y a la industrial. Se llevará a cabo el trabajo en equipo con recompensas al trabajo duro dentro del equipo más que en un área funcional en concreto.

### **5.3.3.3. Demanda del consumidor**

El sistema Toyota supuso adaptarse a muchos segmentos de productos siendo la alta fiabilidad del mismo el mayor argumento de venta.

### **5.3.3.4. Trato con los clientes**

Toyota buscó una relación a largo plazo con los clientes tratando de “fidelizarlos” mediante diferentes gamas de productos de acuerdo a la necesidad concreta de cada cliente; para ello se valió de técnicas de venta agresiva y de bases de datos con información pormenorizada de cada cliente. Otra decisión importante, debida a la flexibilidad lograda en las plantas de producción y en la cadena de suministro, fue el tratar de producir coches bajo pedido en lugar de contra inventario.

## **5.4. LOS PRINCIPIOS DE LA PRODUCCION ESBELTA**

Muchos de los acercamientos citados son prescriptivos y en numerosos casos se declaran de aplicabilidad global. También es cierto que existen pocas diferencias entre varios de los sistemas citados y algunos tienden ser demasiado simplistas o se mantienen en descripciones muy cualitativas.

No obstante, hay que tener claro que la solución óptima para cada sistema productivo o logístico, provendrá de un análisis detallado de las variables de entrada, los procesos del sistema y de sus parámetros (Hopp et al. 2000).

Analizando ciertas tendencias y bibliografía científica, es cierto que tanto la TOC así como la Manufactura Ágil y el QRM pueden tener elementos diferenciadores respecto a la Producción Esbelta. De todas formas, la presente tesis aboga por dar máxima validez a la Producción Esbelta por las siguientes razones:

- Su entereza en el corpus, su divulgación científica y su nivel de demostración en aplicaciones prácticas en todo tipo de sectores económicos a lo largo de los últimos años. Aspecto que es principalmente subrayado por Holweg et al. (2004), De Toni et al. (2002), y Zhongjun et al. (2005).
- Todos los acercamientos se muestran como alternativa o complemento a la Producción Esbelta, lo cual justifica su divulgación e importancia como referencia.
- En el contexto base del estudio, sistemas de producción seriada de piezas discretas, la Producción Esbelta es reconocida como un sistema válido.

Pero ¿cuáles son las claves o principios para guiar las acciones de la empresa hacia la Producción Esbelta? Antes de analizar dichos pilares, merece la pena describir la evolución (ver siguiente apartado 5.4.1) que ha seguido dicho movimiento hasta dar con las propiedades que lo identifican actualmente.

#### 5.4.1. Evolución de la Producción Esbelta

La filosofía de la Producción Esbelta ha evolucionado y se encuentra evolucionando a lo largo del tiempo (Hines et al. 2004). Este apartado 5.4.1. trata de dar una visión de los principales hitos históricos hasta dar con las propiedades del corpus actual.

Dichas características básicas que ha adquirido como filosofía productiva serán descritas en el apartado 5.4.2. dedicado a desgarnar el Pensamiento Esbelto o Lean Thinking.

La primera fase comprende las fechas de 1980 a 1990 aproximadamente y se podría identificar con el título de "toma de conciencia". La divulgación literaria de esta etapa se basa en la publicación de prácticas y técnicas a aplicar a nivel de planta productiva (Hall, 1981), (Shingo, 1981, 1985), (Schonberger 1982, 1986), (Monden, 1983), (Ohno, 1993). El enfoque de esta primera fase está centrado en técnicas como el SMED, 5S y Manufactura Celular, siempre buscando la reducción de despilfarros y costos

productivos. Dichas técnicas iban dirigidas sobre todo a las plantas de montaje de automóviles u otro tipo de industrias de producción discreta con enfoques similares en términos de volumen, variedad de producto y naturaleza de montaje.

Una segunda fase centrada en el aspecto de la calidad, comienza en 1990 y finaliza aproximadamente a mediados de la misma década. La divulgación bibliográfica se centra en la publicación de mejores prácticas para el desarrollo de benchmarking que motive a la emulación (Womack et al., 1990), (Hammer, 1990), (Stalk et al. 1990), (Harrison, 1992), (Sakakibara et al., 1993), (Flynn et al. 1997). El enfoque se ajusta no sólo a la reducción del costo, sino que también a los siguientes aspectos: formación y promoción de trabajadores, Gestión de la Calidad Total (TQM), Reingeniería de Procesos Productivos (BPR) y Gestión de Materiales. El sector industrial se amplía en una mayor medida a los proveedores de automoción.

La tercera fase está concentrada no solamente en el aspecto de la calidad, sino que también en costo y entrega; se desarrolla desde mediados de la década de los 90 hasta el año 2000 aproximadamente. La bibliografía se abre a temas como el flujo o la cadena de valor, las características de la empresa esbelta y a la colaboración de toda la cadena de suministro (Womack et al., 1994, 1996a, 1996b, 1997), (Rother et al. 1998), (Mac Beth et al. 1994),

(Lamming, 1993). El enfoque de esta etapa se centra en aspectos de reducción de costo pero con una perspectiva de proceso para el logro de flujos esbeltos. El proceso tratado de forma más importante es el de cumplimiento de pedido. El sector industrial al que se dirige es el manufacturero en general pero frecuentemente centrado en producción repetitiva.

Por último, a partir del año 2000, la evolución del lean se encuentra en la fase que se puede denominar Sistema de Valor. La literatura se centra en aspectos como la capacidad de las organizaciones a nivel de sistema. (Holweg et al. 2001). El enfoque de esta fase se despliega en aspectos como el valor y costo desde perspectivas tácticas a estratégicas, en la que se buscan potenciar las integraciones de cadenas de suministros como de procesos, tales como el de cumplimiento de pedido y el de desarrollo de nuevos productos. Los sectores de actividad económica se amplían a subsectores industriales como el de la producción de bajo volumen y al sector servicios.

Como se ha podido observar, la evolución de la Producción Esbelta parte de un enfoque más centrado a problemática de planta de producción seriada hasta llegar a convertirse en una filosofía más global de organización y cadena de suministro con unos pilares dados que serán expuestos en el siguiente apartado 5.4.2. Una de las razones de dicha evolución ha sido la respuesta necesaria a dar a las

críticas recibidas a lo largo de su historia hasta llegar a convertirse en un modelo reconocido (Hines et al., 2004) y con amplia literatura en el área de conocimiento de la Dirección de Operaciones (Pilkington et al., 2006). En el apartado 2.6. dedicado a describir los resultados alcanzados por la Producción Esbelta se dará una muestra de dichas críticas y de la respuesta dada por el movimiento lean.

#### 5.4.2. Las claves de la Producción Esbelta: El Pensamiento Esbelto

El **Pensamiento Esbelto** (Lean Thinking) es un pivote o proceso de pensamiento que da sentido a todos los métodos y técnicas específicas, de cara a guiar a la dirección en la consecución de la Producción Esbelta avanzando más allá de la Producción en Masa (Womack et al. 1994, 1996a 1996b, 1997). (Hines et al., 2000). El Pensamiento Esbelto puede ser estructurado en cinco etapas:

1. Especificar el valor para cada producto determinado.
2. Identificar el flujo<sup>8</sup> de valor para cada producto.
3. Hacer que el valor fluya sin interrupciones.
4. Dejar que el diente “jale” del valor.
5. Perseguir la perfección.

---

<sup>8</sup> Flujo: como traducción de stream.

Mediante la comprensión de estos principios y la creación de una interconexión entre ellos, la Dirección puede hacer un uso completo de las técnicas lean y mantener un desarrollo de proyectos estable. Los principales autores afirman que pasar de un sistema de lotes y colas (***batch and queue***) a uno de flujo continuo con un tirón efectivo desde el cliente puede, con inversiones modestas o nulas (Womack et al., 1994, 1996a 1996b, 1997). (Hines et al., 2000) logra:

- Doblar la productividad laboral. Reducir los periodos de maduración en un 90%.
- Reducir los inventarios en un 90%.
- Reducir los defectos a la mitad.
- Reducir los accidentes laborales a la mitad.
- Reducir el periodo de lanzamiento a la mitad.
- Ampliar las gamas de productos dentro de una misma familia con apenas incrementos de costos.

Estas mejoras serán el fruto inicial de un realineamiento radical del flujo de valor (proceso denominado kaikaku en japonés). Si se continúa con un proceso de mejora continua (kaizen) en camino de la perfección, aún se puede:

- Doblar la productividad con mejoras incrementales en 2 o 3 años.
- Reducir a la mitad de nuevo los inventarios, los errores y el periodo de maduración en el mismo espacio de tiempo.

En el apartado 5.5. se analizarán los resultados reales obtenidos por la implantación de la Producción Esbelta.

## 5.5. RESULTADOS ALCANZADOS POR LA PRODUCCION ESBELTA

A continuación se exponen los resultados obtenidos por la Producción Esbelta en el ámbito de la mejora de la organización de las plantas productivas, consecuencia del diseño o rediseño del sistema productivo (manufacturing system design). Por tanto, se dejan de lado aspectos como la coordinación de la cadena de suministro, la relación con los clientes, la gestión de la empresa esbelta y el diseño del producto. Si bien este último aspecto tiene una implicación vital en el diseño y funcionamiento del sistema productivo (Oyarbide, 2003), la presente tesis no se va a centrar en el diseño del producto por considerarlo separado del proceso productivo relacionado con el flujo de materiales (Hopp et al., 2000).

Este estudio se presenta estructurado en dos grandes grupos. Por un lado, los resultados alcanzados a nivel mundial en el sector de la automoción, industria originaria de la Producción Esbelta y tractora de estos conceptos (ver apartado 5.5.1.). Por otro lado, los resultados alcanzados por la Producción Esbelta en el resto de sectores manufactureros (ver apartado 5.5.2.).

### 5.5.1. La industria de la automoción

De cara a una mejor explicación de la evolución del grado de implantación de la Producción Esbelta, se pueden definir tres etapas históricas claramente diferenciadas.

### 5.5.1.1. ETAPA INICIAL (1960-1990)

A pesar de los resultados demostrados por Toyota desde los años 60, la divulgación inicial del sistema TPS o JIT en la década de los 80 tuvo desiguales resultados de aplicación en la industria occidental. (Hopp et al., 2002). Como muestra obsérvense las dos siguientes tablas 4 y 5. Los resultados de los indicadores denotan que las empresas japonesas, lideradas por Toyota, seguían siendo las más avanzadas en el ámbito en cuestión.

<i>Planta de montaje de Framingham de General Motors vs. planta de Takaoka de Toyota. 1986.</i>		
	<i>Framingham</i>	<i>Takaoka</i>
<i>Horas de montaje bruto por coche.</i>	40,7	18
<i>Horas de montaje ajustado por coche.</i>	31	16
<i>Defectos de montaje por cada 100 coches.</i>	130	45
<i>Espacio de montaje por coche (pies cuadrados por vehículo y año).</i>	8,1	4,8
<i>Existencia de piezas principales (promedio).</i>	2 semanas	2 horas

**Tabla 7** – Ejemplo comparativo entre una planta de Producción en Masa y otra de Producción

<b>Resumen de las características de la planta de montaje grandes fabricantes. 1989</b> <b>(promedio por plantas en cada una de las regiones).</b>				
	<b>Japonesa en Japón.</b>	<b>Japonesa en Norteamérica.</b>	<b>Americana en Norteamérica.</b>	<b>Toda Europa</b>
<b>Rendimiento.</b>				
Productividad (horas/vehículo).	16,8	21,2	25,1	36,2
Calidad (defectos de montaje/100 vehículos).	60	65	82,3	97
<b>Inversión.</b>				
Espacio (pies cuadrados / vehículo y año)	5,7	9,1	7,8	7,8
Tamaño del área de reparaciones (en % del espacio de montaje).	4,1	4,9	12,9	2
Existencias (días para 8 piezas tomadas como muestra).	2	1,6	2,9	2
<b>Mano de obra.</b>				
% de mano de obra en equipos.	69,3	71,3	17,3	0,6
Rotación en el empleo (0= nada, 4= frecuente)	3	2,7	0,9	1,9
Sugerencias por empleado.	61,6	1,4	0,4	0,4
Número de clases laborales.	11,9	8,7	67,1	14,8
Formación de nuevos trabajadores de producción (horas).	380,3	370	46,4	173,3
Absentismo.	5	4,8	11,7	12,1
<b>Automatización.</b>				
Soldadura (% de pasos directos).	86,2	85	76,2	76,6
Pintura (idem).	54,6	40,7	33,6	38,2
Montaje (idem).	1,7	1,1	1,2	3,1

**Tabla 8** – Características de las plantas de montaje en 1989 (Womack 1996).

#### 5.5.1.2. SEGUNDA ETAPA (1990-1995)

La década de los 90, gracias al nuevo empuje dado por el estudio del PIVM dirigido por el MIT y la publicación resultante de "La máquina que cambió el mundo" (ver punto 5.3.3.1.), sirvió para dar grandes pasos en ir introduciendo sus diferentes elementos en las industrias occidentales (Holweg et al., 2004), (Hopp et al., 2000). El sector de la automoción ha sido el motor en este sentido (Dicken, 2003), seguido de muchísimas empresas de diferentes sectores (Marchwinski, 2004).

La tabla 6 muestra que para los años 90, las empresas de automoción occidentales mejoraban sus indicadores de desempeño respecto a la década anterior pero sin alcanzar a los productores esbeltos representados sobre todo por Toyota. Asimismo se observa que las diferencias son más significativas aguas arriba en la cadena de suministro.

<b>Desempeño medio de las plantas de montaje y fabricantes de componentes de automoción. 1993-94.</b>				
	<b>Toyota (Japón)</b>	<b>Japón (media)</b>	<b>EEUU (media)</b>	<b>Europa (media)</b>
<b>Productividad. (Toyota=100)</b>				
Montaje	100	83	65	54
Proveedores 1ª línea (Tier 1).	100	85	71	62
<b>Calidad (defectos entregados).</b>				
Montaje (por cada 100 coches)	30	55	61	61
Proveedores Tier 1 (ppm).	5	193	263	1373
Proveedores Tier 2 (ppm).	400	900	6100	4723
<b>Entregas (% de retrasos).</b>				
Proveedores Tier 1 (ppm).	0,04	0,2	0,6	1,9
Proveedores Tier 2 (ppm).	0,5	2,6	13,4	5,4
<b>Stocks (Proveedores Tier 1).</b>				
Horas		37	135	138
Rotaciones anuales de stocks.	248	81	69	45

**Tabla 9** – Desempeño de la industria de la automoción en la década de los 90 (Womack1996)

### 5.5.1.3. TERCERA ETAPA (1995-2005)

Para el año 2000, los fabricantes de automóviles occidentales habían mejorado sus desempeños productivos en la planta y reducido sus diferencias respecto a Japón como consecuencia de la implantación de los conceptos de la Producción Esbelta; fuese cual fuese su acepción en cada firma

(Waurzyniak, 2005). A pesar de los avances, el posicionamiento en el ranking seguía siendo el mismo (ver tabla 10).

<i>Horas de mano de obra por vehículo.</i>			
	<b>1989</b>	<b>1994</b>	<b>2000</b>
<i>Americana en Norteamérica</i>	24,9	21,9	16,8
<i>Japonesa en Japón</i>	16,8	16,5	12,3
<i>Europea</i>	35,5	25,3	20,1
<i>Nuevos países</i>	41	29,7	28,0

**Tabla 10** – Horas de mano de obra por vehículo, 1989, 1994, 2000

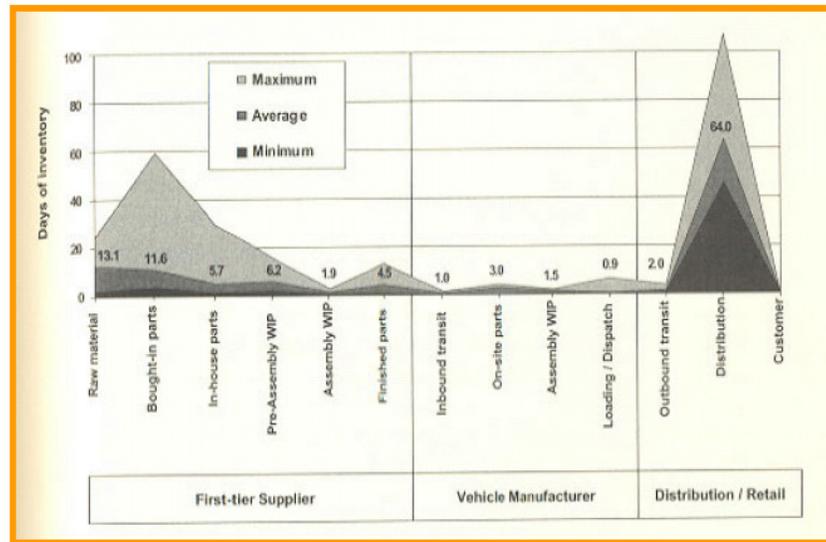
(Holweg et al., 2004).

Aunque pueda llevar a equívocos, esta reducción significativa no se debe a un posible aumento de la automatización de las labores humanas, ya que la mayor cantidad de horas de trabajo se da en los procesos de montaje final, donde la automatización sigue teniendo una presencia limitada (Holweg et al., 2004).

Por otro lado, y como un indicador fiable, se constata que en EEUU los inventarios de las firmas automovilísticas han aumentado sus rotaciones de 15 a 20 desde 1992 hasta el año 2003 (Marchwinski, 2004). En el siguiente punto se explica con mayor detenimiento la importancia de este indicador global.

De todas formas, Holweg y Pil (2004) reseñan que el enfoque de mejoras llevadas a cabo en el sector de automoción han conseguido grandes resultados, pero solamente a nivel de las

plantas de montaje, o a lo sumo en proveedores de primera línea, con lo que se han creado islas de excelencia con poco impacto global en toda la cadena de suministro de la producción y distribución de automóviles. Sirva de ejemplo la figura 29.



**Figura 29** – Distribución del inventario en la cadena logística.

(Holweg et al., 2004).

Precisamente, dichos autores argumentan que a pesar de que ha habido mejoras considerables a nivel de planta en la industria de la automoción, aún hay inventarios de vehículos terminados durante semanas en los concesionarios y centros de distribución de todo el mundo. Los flujos de valor de la industria aún están enraizados en la Producción en Masa y habría que dar el siguiente paso de extender el lean más allá de la fábrica: hay que conectar al cliente a la cadena de valor.

Las firmas automovilísticas triunfadoras serán aquellas que logren construir automóviles al gusto del cliente a través de estrategias innovadoras cercanas a la producción bajo pedido.

Por tanto y a modo de conclusión, se pueden resumir los logros alcanzados en las plantas de automoción en los siguientes puntos:

- Las plantas de occidente, sobre todo a partir del inicio de los 90, han ido mejorando sus desempeños mediante el empleo e implantación de conceptos y herramientas referidas a la Producción Esbelta. No obstante, las plantas japonesas lideradas por Toyota siguen siendo las más competitivas en cuanto a indicadores relacionados con el desempeño de sus sistemas productivos.
- A pesar de los logros alcanzados a nivel de planta o sistema productivo, estos no han podido extenderse ni “aguas arriba” ni “aguas abajo” en la cadena de suministro. Incluso se ha comprobado en muchos casos, que los problemas de la planta de montaje ha sido trasladados aguas arriba a los proveedores por simple relación de poder (Holweg et al., 2004).

### 5.5.2. Otros sectores manufactureros

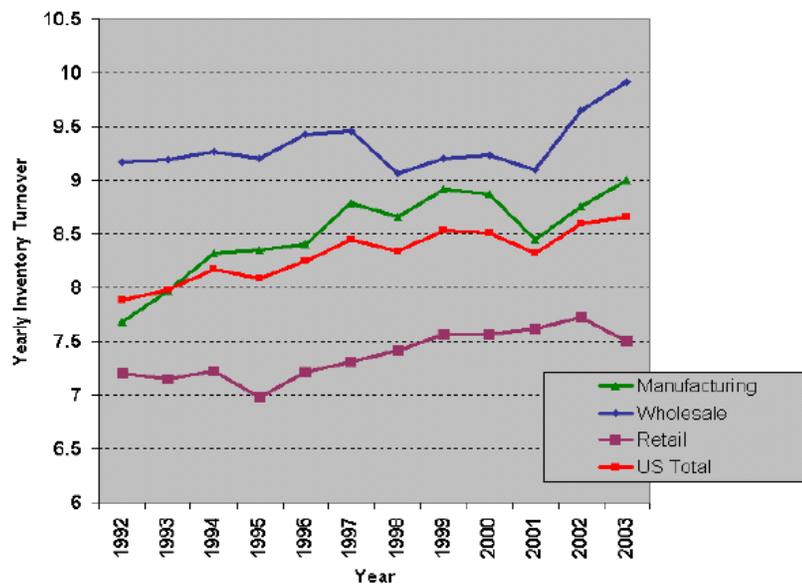
¿Y qué ha ocurrido en la implantación de estas medidas en otros sectores industriales y económicos? ¿Ha obtenido éxito la Producción Esbelta? ¿Cuáles son las necesidades y los retos actuales?

Para analizarlo, en primer lugar se propone el análisis de la evolución de las rotaciones de inventario en la economía estadounidense durante los últimos años. Las rotaciones de inventario muestran claramente la velocidad del producto a través del negocio. Por otro lado, todos los negocios necesitan medir sus inventarios periódicamente. Las rotaciones anuales se contabilizan mediante el cociente entre el costo de las ventas y el inventario medio durante el año o en un determinado momento (qué año a año habrá de ser el mismo) (Marchwinski, 2004), (Marchwinski et al., 2003).

Si se analizan la figuras 3 y 4, se observa que las rotaciones han aumentado durante los últimos años, pero la tendencia no ha sido la que auguraban los propios impulsores de la Producción Esbelta. Diversos autores reconocen la importancia de la Producción Esbelta en la mejora del indicador en los diferentes sectores económicos (Chenet et al., 2005), pero incluso los principales impulsores reconocen que el éxito ha sido relativo (Womack, 2002a). Sterman añade que una de las razones ha

sido el traslado del inventario a proveedores (Sterman, 2000), similar razonamiento al argumentado anteriormente por Holweg para el sector de la automoción (2004). Sakakibara et al. (1997), añaden y demuestran que la aplicación de las técnicas de la Producción Esbelta o JIT por si solas, sin construir un modelo o infraestructura previa, no tienen una incidencia clara en la mejora de los indicadores de desempeño logístico, (a pesar de que Shah et al., 2003, argumentan lo contrario). Hayes et al. (2005) aseguran que la aplicación de dicha filosofía tampoco garantiza crear una ventaja competitiva a lo largo del tiempo.

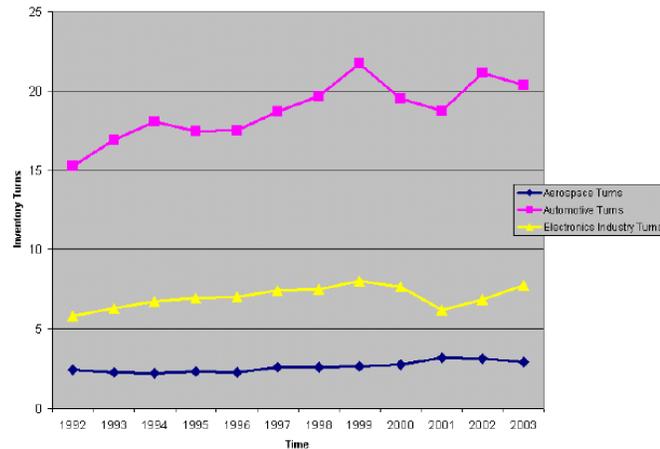
### Rotación de Inventario en la Industria Norteamericana



**Figura 30** – Rotaciones anuales de inventario en EEUU por sectores económicos.

(Marchwinski, 2004).

### Rotación de Inventario por Industria



**Figura 31** – Rotaciones anuales por tipo de industria manufacturera. (Marchwinski, 2004).

La figura 31 muestra claramente que la mejor tendencia la refleja el sector de la automoción frente a sectores como la electrónica o industria aeroespacial. Lo cual conduce a otra pregunta: ¿Cuáles son las verdaderas razones de este éxito relativo en sectores no relacionados con la automoción?

Algunos autores afirman que la Producción Esbelta no responde adecuadamente a las particularidades de otros sectores, inclusive a propios proveedores de automoción. Realmente, la Producción Esbelta se ajusta a características de producto y mercado similares a la del sector de la automoción, como demanda relativamente estable,

producción seriada o repetitiva, o incluso productos para reposición de complejidad baja o media (Naruse, 2003).

Otros autores citan la dificultad de aplicar los conceptos y herramientas lean de una forma sistemática y purista. Es decir, la Producción Esbelta se muestra como una disciplina demasiado exigente para su aplicación correcta por las empresas manufactureras (Hopp et al., 2000). En este sentido, también se ha publicado diversa literatura sobre las posibles vías con las que se podrían implantar dichas herramientas (Hancock et al., 1998).

Ante estas críticas, autores de renombre relacionados con la Producción Esbelta afirman que la Producción Esbelta, o llámese sistema JIT, es perfectamente aplicable en todo tipo de sectores industriales, e incluso no industriales (Shingo, 1981), (Sohal et al., 1988, 1993), (Sakakibara et al., 1993), (Womack et al., 1996), (James-Moore et al. 1997), (Ward et al., 2006). Para demostrarlo, por un lado se reseñan las numerosas aplicaciones prácticas exitosas logradas en diferentes ámbitos y por otro lado, refutan una a una cada crítica a la que es sometida la Producción Esbelta, como puede observarse en la tabla 8.

<b>Los 10 "no sólo..." del Pensamiento Ajustado</b>		
1	No sólo para fabricación de componentes	La gestión del flujo de valor puede ser aplicada igualmente a un amplio espectro de empresas manufactureras y de servicios, aunque las herramientas de implantación puedan variar.
2	No sólo una serie de herramientas	La gestión del flujo de valor no comienza con una serie de herramientas a aplicar sino que mediante una necesidad de negocio. Para ello se empleará una serie diferente de herramientas...y no se utiliza siempre el kanban.
3	No sólo para innovaciones a nivel de planta.	No se aplica exclusivamente al taller y además con un enfoque grandilocuente; El lean se puede aplicar a todos los procesos empleando una serie de aproximaciones de Mejora Continua e Innovación.
4	No sólo para operarios directos.	Si se quiere aplicar la Producción Ajustada, es necesario que en los equipos participen equipos multifuncionales de personal directo e indirecto.
5	No sólo para cumplimiento de ordenes	Aunque el 90% del esfuerzo se dedique al proceso de pedido a entrega, este es sólo uno de los procesos en los que se puede aplicar.
6	No sólo para bienes predecibles de movimiento rápido.	Un fallo común (o un malentendido por parte de la escuela Anti-lean) es que sólo se puede aplicar en industrias de demanda estable como la de automoción. Esto es incorrecto, la industria de la automoción está lejos de ser estable, así la aproximación lean trata de reducir la amplificación de la demanda, pero aunque ésta no se pueda lograr, la Producción Ajustada se puede conseguir eligiendo adecuadamente las herramientas a aplicar.
7	No sólo enfocado a nivel interno.	Aunque mucha literatura esté centrada en la propia planta productiva, la Producción Ajustada debe y puede extenderse a toda la cadena de suministro.
8	No sólo una formula estándar.	Aunque muchas firmas consultoras vendan el lean como una formula y una serie de herramientas estándar, no es así, en cada caso hace falta una aproximación diferente.
9	No sólo de implantación rápida.	Puede requerir de un plan a largo plazo de tres años como mínimo.
10	No sólo sobre procesos.	Se puede enfocar a procesos, equipos, personal, productos y competencias.

**Tabla 11** – Los 10 "no sólo..." del Pensamiento Esbelto (Holweg, 2000).

Por tanto, al no darse una razón clara y consensuada sobre las razones de los resultados en base a las rotaciones de inventarios, se ve necesario ahondar en mayor medida en el análisis de los resultados obtenidos centrando el estudio en las opiniones derivadas de las propias empresas.

Para ello, es importante resaltar la información proveniente de un estudio realizado por la Lean Enterprise Institute mediante una encuesta distribuida por vía electrónica a las empresas industriales pertenecientes a la Lean Community en Enero de 2004 y obtenida a partir de las 999 respuestas recibidas (Marchwinski, 2004).

Del tratamiento de varias respuestas se pueden obtener conclusiones interesantes para el presente estudio.

Ante la pregunta de cuál es el nivel de implantación de la Producción Esbelta en cada empresa, se obtienen las siguientes respuestas:

- El 18% contesta que se encuentra en etapa de planificación sin ninguna implantación todavía.
- El 46% contesta que se encuentran en etapas iniciales de implantación de algún proyecto piloto con algún resultado positivo.

- El 28% caracteriza su esfuerzo de expansión de técnicas lean a otras áreas y reportan progresos sólidos.
- Sólo un 4% afirma que sus implantaciones se encuentran en una etapa avanzada.
- El resto no responde.

De estos resultados se pueden obtener varias conclusiones importantes, siempre teniendo en cuenta que las empresas pertenecientes a la comunidad muestran cierto interés mínimo por la Producción Esbelta. Es decir, entre estos miembros existirá probablemente más predisposición hacia la aplicación de las técnicas lean que en empresas no relacionadas con dicha comunidad de Internet creada por James Womack.

Una de las conclusiones es que entre estas empresas predispuestas aún hay un 18% sin ninguna implantación realizada y un 46% en sus etapas iniciales; por lo que se puede afirmar que la Producción Esbelta todavía tiene mucho camino por recorrer tanto entre estas empresas interesadas como entre las no pertenecientes a estos grupos.

La segunda conclusión es que, las que han aplicado alguna técnica relativa a la Producción Esbelta se muestran satisfechas con los resultados obtenidos, siendo empresas de todo un abanico de sectores.

Ante la pregunta dirigida a resolver la cuestión de porqué fracasan las experiencias *lean* lanzadas, las empresas se acogen a diferentes razones:

- Tendencia hacia los sistemas tradicionales de trabajo: 36%.
- Falta de conocimiento para la implantación: 25%.
- Falta de crisis para crear una sensación de urgencia: 24%.
- El sistema de contabilidad de costos tradicional no reconoce el valor financiero de los las mejoras a nivel de planta: 22%.
- Resistencia de los mandos intermedios: 21%.
- La Producción Esbelta se ve como una moda: 19%.
- Fracaso al intentar desplazar responsables de poner frenos al cambio: 18%.
- Resistencia de los trabajadores: 11%.
- Resistencia de los supervisores: 10%
- Fracaso de anteriores proyectos relacionados con la Producción Esbelta: 6%.

Aunque no haya una razón muy destacada por encima de las demás, si debería reseñarse de cara al presente estudio la segunda razón más votada: **falta de conocimiento para la implantación**. De donde se deduce una necesidad de formación en conceptos y técnicas *lean* por parte de las firmas respondientes.

Este argumento es asimismo defendido en el campo académico por Hancock et al. (1998) que aducen una gran necesidad de formación en este ámbito.

La tercera pregunta de interés corresponde a que las empresas muestren sus necesidades en lo referente a herramientas que las ayuden a mejorar las siguientes diferentes áreas de actuación; las respuestas se muestran a continuación:

- Diseño del sistema productivo: 51%.
- Liderazgo del cambio: 43%.
- Indicadores de desempeño: 42%.
- Logística: 34%.
- Desarrollo de producto: 29%.
- Almacenamiento: 21%.
- Desarrollo de políticas: 19%.
- Mantenimiento: 16%.
- Otros: 13%.
- Recursos Humanos: 11%.

De las respuestas se deduce la importancia del primer aspecto. Es decir el 51% de las empresas que han respondido necesitan herramientas *lean* que apoyen al diseño o rediseño del sistema productivo.

### 5.5.3. Necesidades del sector en México

Así como en el apartado anterior se han enumerado las necesidades del mundo empresarial y académico, un estudio de la situación del sector manufacturero en México puede reforzar la necesidad de tener que abordar proyectos de mejora en los sistemas productivos.

La industria manufacturera en México está sufriendo una gran competencia por parte de países tanto desarrollados como por aquellos en vías de desarrollo, lo cual está trayendo consigo los fenómenos conocidos como la **desindustrialización** y la **deslocalización**. Es decir, pérdida de puestos de trabajo relacionados con el sector en el seno del país; tanto directos, como indirectos del sector servicios relacionados con la manufactura.

Por tanto, según el mismo estudio, para asegurar el empleo, es importante garantizar la competitividad del sector manufacturero mediante nuevos modelos de negocios en los que:

- Exista una coordinación estrecha entre clientes y proveedores.
- Se de una innovación continua de tecnologías y procesos en paralelo al desarrollo de nuevos productos de cara a reducir los periodos de maduración de lanzamiento al mercado.
- Se invierta en tecnologías que aumenten el nivel de automatización y productividad que superen la desventaja del costo laboral.
- Se comparta el conocimiento dentro y entre compañías.
- Las cadenas de suministro adquieran la forma de colaboraciones flexibles, redes de Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) y empresas virtuales.
- Se empleen procedimientos y especificaciones bien definidos para maximizar eficiencias.
- Las consideraciones sociales, medioambientales y económicas tengan igual peso en las tomas de decisiones.
- La provisión de servicios más que la de bienes facilite la transición hacia la sostenibilidad.

En lo que concierne a las mejoras en los sistemas productivos, la investigación debe centrarse en una radical transformación de los procesos de fabricación para que se conviertan en sistemas adaptativos (flexibles). Es decir, deben ser capaces de responder automáticamente a cambios del entorno operativo.

Deben integrar procesos innovadores, superar las limitaciones existentes en procesos mediante combinaciones inteligentes y gestionar la transferencia de **know-how** en nuevos métodos relacionados con la manufactura. Ya no tiene sentido invertir en grandes y monolíticas plantas basadas en la Producción en Masa que buscan hacer beneficio con economías de escala.

La manufactura basada en el conocimiento necesita de empresas flexibles que empleen redes paralelas de proveedores y que recluten las competencias necesarias para entregar productos personalizados en una base de tiempo para afrontar la demanda cambiante.

Aunque la transformación radical de la industria debe ser un objetivo a largo plazo, se tiene que asegurar mientras tanto, que México siga siendo competitivo en áreas de manufactura maduras, donde la principal guía de actuación no sean la innovación radical, las nuevas patentes, etc.; sino que una mejora continua, una aplicación gradual de nuevas tecnologías y el aseguramiento de la competitividad mediante los preceptos de la Producción Esbelta y otros, bien conocidos pero poco utilizados, principios.

Estos argumentos recién citados, son reforzados por Hopp et al. (2004), quienes exponen que las empresas manufactureras actuales se encuentran ante el reto de la estructuración del medio productivo para lograr la velocidad y el bajo costo de las líneas de alto volumen mientras se mantiene la flexibilidad y personalización potencial de un taller funcional de bajo volumen. Lo que implica:

1. Identificar oportunidades para mejorar los sistemas productivos existentes.
2. Diseñar nuevos sistemas productivos efectivos.
3. Alcanzar los compromisos necesarios para coordinar políticas e intereses diferentes funciones.

#### 5.5.4. Resumen de los resultados alcanzados

Lo analizado hasta ahora indica que el mercado se encuentra en una tesitura muy competitiva, hay más razones que nunca para abordar la reducción del despilfarro en las diferentes compañías y mejorar el desempeño de los sistemas productivos.

La adopción de técnicas relacionadas con la Producción Esbelta puede ser una vía de mejora, ya que en la mayoría de los casos en las que éstas se han aplicado se ha obtenido cierto éxito.

Sin embargo, la Producción Esbelta tiene aún asignaturas pendientes en el sentido en que hay áreas de actuación y divulgación importantes sin explorar, sobre todo en los siguientes aspectos:

- Numerosas empresas, o aún no conocen las bases de la Producción Esbelta, o han lanzado de una manera vaga los diferentes proyectos *lean*.
- Aquellas empresas que conocen y tiene aplicaciones piloto todavía tienen áreas de actuación importantes donde aplicar las diferentes técnicas de Producción Esbelta.
- Las empresas demandan formación y disposición de herramientas para apoyar el proceso de implantación de la Producción Esbelta, sobre todo en lo referente al rediseño de sistemas productivos.

## 5.6. RESUMEN

Este capítulo dedicado a la revisión de la literatura y exploración del marco teórico, ha servido para dar a conocer el principal propósito de la presente disertación con base al desarrollo de los siguientes puntos de análisis:

- Estudio del sector manufacturero. Su importancia al nivel de la economía global y su necesidad cada vez mayor de adaptación a las crecientes exigencias por parte del mercado.
- Presentación de los sistemas productivos como las plataformas físicas y de información dedicadas a la manufactura de bienes.
- Evolución histórica de los diferentes modelos existentes de cara organizar los sistemas productivos.
- Presentación de la Producción Esbelta y su evolución como modelo base de cara a la mejora del desempeño productivo.
- Análisis de los resultados reales obtenidos por la Producción Esbelta con lo que se demuestra su validez sobre todo en entornos de manufactura seriada.
- Mostrar la carencia, necesidad y demanda por parte de las empresas manufactureras así como del sector académico, de herramientas que apoyen el proceso de rediseño de sus sistemas productivos.

- Exponer las condiciones que han de cumplir tales modelos para asegurar su practicidad.
- Presentación y análisis de la técnica VSM propuesta por la Producción Esbelta de cara al rediseño y mejora de los sistemas productivos.
- Revisión de otras técnicas, herramientas y metodologías existentes relacionadas con el rediseño de los sistemas productivos con las que subrayar la particularidad del VSM.

Así, si bien se conocen y se han divulgado experiencias particulares de aplicación del VSM, no es evidente la existencia de un análisis cruzado que explore en profundidad la verdadera aplicabilidad y potencialidad del mismo en diferentes entornos fabriles de producción seriada. Es decir, el análisis de aspectos tales como, las verdaderas fortalezas y debilidades de la técnica, su contexto práctico de aplicación, el tiempo, esfuerzo y la formación requerida, los recursos necesarios y las posibilidades de combinación y adaptación con otras técnicas y conceptos productivos.

En definitiva, el principal propósito del presente estudio es comprobar la mejora radical de los resultados de una empresa a través de la optimización de procesos utilizando programación matemática como herramienta para la planeación de la producción y la conversión del sistema tradicional de producción caracterizado por el flujo *batch and queu* (lotes) en el que las separaciones artificiales creadas en la planta, los centros de trabajo, se

transformen en **value streams** (cadenas de valor) en los que se maximiza el **throughput** y la productividad, y con ello, los niveles de competitividad de la planta que amplíen sus posibilidades de éxito ahora y en el futuro, éxito medido en función a la realización de los objetivos definidos por los respectivos grupos de interés, a saber, clientes, accionistas, empleados y sociedad en general.

## CAPITULO VI

# **IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRODUCCION DE MANUFACTURA ESBELTA A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DEL VALUE STREAM MANAGEMENT EN PLANTA DE MANUFACTURA METAL MECANICA**

### 6.1. INTRODUCCION

En todo proceso se realizan ciertas actividades de transformación cuya eficacia se mide por sus indicadores de productividad. Esta se ve afectada por una gama muy amplia de problemas que limitan los recursos que se pueden obtener a partir de los recursos disponibles. Los ingenieros japoneses han clasificado estas limitantes en tres grupos, a los que llamaron las “3 Mu’s”: Muri (sobrecarga), Mura (Variabilidad) y Muda (Desperdicio).

Sobrecarga o Muri: La productividad de los negocios y las personas disminuyen cuando se les imponen una carga de trabajo que rebasa su capacidad. Si a los operadores se les exige que produzcan por arriba de sus límites normales, o cuando las máquinas se les hacen producir por encima de su capacidad, se provoca un agotamiento de los recursos más valiosos de la organización disminuyendo así la productividad.

Variabilidad o Mura: Se refiere a la falta de uniformidad generada desde los elementos de la entrada de los procesos, como los materiales, las especificaciones, el entrenamiento, las habilidades, los métodos y las condiciones de la maquinaria. Cuando la variabilidad de un cierto proceso y de sus resultados es natural, se dice que el proceso está controlado. Pero si se introduce una fuente de variación nueva al proceso, entonces se dice que el proceso salió de control.

Desperdicios o mudas: Se refiere a los siete tipos de desperdicios que afectan negativamente la productividad, que deben de ser bien entendidos, detectados y eliminados o minimizados. Estas actividades no agregan valor. Las actividades que agregan valor son aquellas que producen directamente un cambio que el cliente desea, al grado que esté dispuesto a pagar por ese esfuerzo. Desperdicio o exceso será cualquier otro esfuerzo realizado en la empresa que no sea absolutamente esencial para agregar valor al producto o servicio, tal como lo requiere el cliente.

- 1) Sobre Producción: Significa básicamente producir más de lo que se necesita.
- 2) Sobre Inventario: Es cualquier material, producto en proceso o producto terminado que exceden a lo que se necesita para satisfacer la demanda del cliente.

- 3) Productos defectuosos: Se refiere a la pérdida de los recursos empleados para producir un artículo o servicio defectuoso, ya que se invirtieron materiales, tiempo-máquina y tiempo de una persona para realizar un trabajo que, a fin de cuentas, no sirvió para agregar valor al cliente.
- 4) Transporte de materiales y herramientas: Consiste en todos aquellos traslados de materiales que no apoyan directamente el sistema de producción. Mover los productos de un lado a otro de la planta no se traduce en un cambio significativo para el cliente, pero sí implica un costo e incluso pone en riesgo la integridad del producto.
- 5) Procesos innecesarios: En las empresas podemos encontrar siempre muchos procesos bien estandarizados. Éstos no siempre agregan directamente valor para el cliente. Muchos trabajos son consecuencias de las necesidades del taller, de la calidad de manufactura o de la mala planeación de las entregas.
- 6) Esperas: Se refiere al tiempo que se pierde cuando un operador espera a que su máquina termine su trabajo, cuando las máquinas se detienen en espera de que el operador haga algún ajuste, o incluso cuando tanto el operador como la máquina están en espera de materiales, herramientas o instrucciones.

- 7) Movimiento innecesarios del trabajador: Se refiere al traslado de personas de un punto a otro en su lugar de trabajo o en toda la empresa, sin que ello sea indispensable para aportar valor al público y sin que contribuya a la transformación o beneficio del cliente.

## 6.2. SELECCIÓN DEL CASO

En este capítulo se lleva a cabo el proceso de implantación de un sistema de producción en la modalidad de manufactura esbelta en una empresa metal mecánica (EMM) localizada en la Zona Metropolitana de Guadalajara; misma que por la tipología de su sistema productivo y su problemática; se considera representativa de la realidad que otras tantas empresas pueden estar experimentando y por ende, la aplicabilidad de este proyecto puede ser directa y de impacto inmediato como los que se observa en la EMM.

Por efectos de confidencialidad se ha denominado genéricamente como EMM a la empresa en la cual se desarrolla este proyecto de implantación de sistema de manufactura esbelta, EMM pertenece a un importante grupo transnacional dedicado a la **manufactura electrónica por contrato** con matriz en San José, California en los Estados Unidos de Norteamérica.

Fue fundada en 1998 y agrupa a un total de 1,450 empleados con una inversión en activos de trabajo superior a los 45 millones de dólares. EMM fabrica componentes metálicos y de plástico para la industria electrónica, siendo los segmentos: automotriz, telecomunicaciones, multimedia y electrónica de consumo el 80% de su actual mercado. Desde el punto de vista de diversificación y tamaño de sus activos de trabajo, EMM es líder nacional en el ramo de manufactura electrónica metal mecánica por contrato y es proveedor de los principales OEM (por sus siglas en inglés Original Enterprise Manufacturer) en America.

Cuenta con los siguientes procesos de manufactura:

- Estampado
- Punzonado
- Formado y doblado
- Inserción de Hardware
- Pintura en polvo y líquida
- Ensamble electromecánico

La forma en que ha respondido a la demanda creciente por parte de sus clientes es a través de la adición de recursos y la especialización total, llegando a un nivel de departamentalización en el que las líneas de comunicación son frágiles en el mejor de los casos, o completamente inexistentes.

Como se verá en el desarrollo de este capítulo, el enfoque no ha sido sistémico ni orientado a la flexibilidad y eliminación de desperdicios; sino que en base a **compartir** en gran medida los recursos, en un ambiente de producción por lotes, EMM no cuenta con un sistema productivo propio ni eficiente, las diferentes operaciones se encuentran disgregadas por toda la planta productiva y con elevados niveles de inventario en todas sus formas y configuraciones (materia prima, producto en proceso, producto terminado) con un modelo de producción por lotes absolutamente funcional y administrado aisladamente por departamentos.

EMM es un caso representativo y valido por dos condicionantes:

- Empresa dedicada a la manufactura en serie de productos discretos. En este caso, componentes metal-mecánicos para la industria electrónica.
- Problemática logístico-productiva enmarcada dentro de la propia planta fabril.

La tabla 12 muestra en síntesis las características principales de la empresa y de su sistema productivo que lo hacen apto para el estudio del caso.

<b>Empresa</b>	EMM
<b>Actividad</b>	Transformación de piezas metal-mecánicas
<b>Descripción del Proyecto</b>	Rediseño del sistema de producción de piezas metal-mecánicas bajo la filosofía de producción ajustada
<b>Número de Operarios en Línea de Negocio</b>	1200
<b>Línea de Negocios</b>	Enclosures Chassis y Miscellaneous, Familia A
<b>Procesos Principales</b>	Punzonado, Formado, Insertado, Pintado y Ensamble
<b>Configuración Producto-Proceso IVAT<sup>9</sup></b>	V (Bajo número de materias primas, elevado número de productos terminados)
<b>Número de referencias en familia de productos</b>	56 (Productos Embarcables Activos)
<b>Tipo de distribución de planta</b>	Funcional con líneas de flujo desconectadas en montaje
<b>Producción contra stock, bajo pedido</b>	Contra Pedido
<b>Nivel Lean<sup>10</sup></b>	3

**Tabla 12 – Validación de caso**

<sup>9</sup> La configuración producto-proceso está basada en la estructura IVAT descrita por Hines et al., (1997)

<sup>10</sup> El nivel lean es una calificación global basada en otros indicadores de la empresa (ver formulario del Anexo B)

Se realiza el planteamiento de la aplicación del VSM en la empresa mediante una reunión concertada en la que se expone el VSM como una vía posible de abordar para lograr el rediseño del sistema productivo y con ello, la mejora de métricos operativos y financieros. El responsable de la empresa mostró su interés de inmediato y se inició el siguiente proceso de definición del equipo.

La tabla 13, proveniente de una entrevista realizada al equipo constituido tras la reunión, resume el perfil del mismo; como datos a destacar, se observa que la figura del facilitador tiene cierta liberación para la aplicación del VSM y que el nivel de formación y convencimiento inicial es prácticamente insuperable. Por otro lado, se observa una predisposición inicial a que las mejoras sean justificadas en base a criterios e indicadores logísticos sin necesidad de estudios económicos exhaustivos.

Empresa EMM	Criterios para inversiones: Mejora significativa a nivel de desempeño productivo con impacto directo a los resultados financieros					
Figura	Cargo	Titulación	Años de Experiencia	Liberación VSM (si/no)	Nivel Inicial Lean (1 a 5)	Convencimiento tras formación (1 a 5)
Rble. Del flujo de valor	Gerente de Program Management	Ingeniería Industrial	5	No	3	5
Facilitador	Spte. de Producción	Técnico en Metal-Mecánico	3	No	2	5

**Tabla 13** – Perfil de equipo EMM. Entrevista definición de equipo.

EMM tiene un total de 10 clientes que demandan un total de más de 500 productos embarcables de estructura multinivel, tal como fue descrito y abordado en la primera parte de este proyecto de Tesis, la selección del proyecto en cuestión es el denominado **Cliente A**, el cual es representativo de la realidad de la planta entera, al reunir en sí mismo las siguientes características: Alta Mezcla de Productos con Bajos Volúmenes, Nivel de Complejidad de Manufactura Medio Alto, Variación de demanda Alta (arriba del 25% por mes) y finalmente, con un desempeño financiero menor al 2,5% de GPM (por sus siglas en inglés *Gross Profit Margin*).

Este cliente maneja dos grandes tipos de productos, chasis y partes sueltas, denominadas, misceláneos; que se venden como tal al cliente quien posteriormente las integra en un producto mayor en sus instalaciones.

Referencia Gráfica de los productos que se fabrican:

### **Chasis**



**Figura 32** – Rack ALX1000 Almacenamiento de Datos

### **Misceláneos**



**Figura 33** – CPU ALZ500 Router

Por lo tanto, el presente capítulo, muestra áreas de oportunidad identificadas en la empresa EMM, bajo la perspectiva de la Manufactura Esbelta y Six Sigma (3 Mu's: Mura, Muri, Muda). En el rubro de la sobrecarga se analiza el desgaste forzado que actualmente están incurriendo las máquinas cuando no tienen un adecuado balance de producción y el mantenimiento autónomo y preventivo. En cuanto a la variabilidad se analizan mejoras para la estandarización en máquina, mano de obra, métodos y materiales, a fin de crear un sistema robusto de planeación y producción, que reditúe en la calidad de los productos.

Por último se analizan los diversos desperdicios que aún se tienen, sobre todo en el piso de producción y que son grandes áreas de mejora y de reducción de costos, dado el alto costo de conversión que se tiene por hora, como lo son la sobre producción, el exceso de inventario, los productos defectuosos, el transporte de material y herramientas, los procesos innecesarios, las esperas y los movimientos innecesarios.

### 6.3. Definición

#### 6.3.1. Problema:

La división del trabajo y el grado de especialización generado en los procesos y en la mano de obra, han sido el principal ingrediente de la actual, prácticamente, nula flexibilidad que caracteriza el proceso de manufactura de EMM; el cual requiere de gran cantidad de recursos para hacer frente a la

cambiante demanda de sus clientes; la adición de equipo, maquinaria, herramientas, espacio, gente y tiempo es la manera típica en como EMM responde a su realidad, generado niveles de desempeño operativo caracterizados por una lado, por una rotación de personal directo arriba del 12%, baja moral, altos niveles de frustración en mandos intermedios y, por otro; altos niveles de inventario que se pueden medir, al inicio del proyecto, en meses de “cobertura”; MOQ’s muy elevados que reducen aún más la flexibilidad de la planta; niveles de eficiencia menores al 45%; niveles de desperdicio del orden del 15% vs. ventas; y con un desempeño financiero caracterizado por pérdidas que se miden en cientos de miles de dólares mes a mes.

6.3.2. Objetivo del Proyecto:

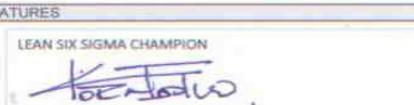
Indicador	Frecuencia de Medición	Documento Oficial Referencia	Actual	Planeado después de la Transformación
1. Índice de satisfacción del cliente	Mensual	<u>CSI (Customer Satisfaction Index):</u> Calidad [FPY] Entregas [OTD] Lead Time <u>Costos:</u> Mano de Obra Scrap MOQ	<b>64%</b>  <b>69%</b>  <b>81%</b>  <b>115 días</b>	<b>95%</b>  <b>95%</b>  <b>95%</b>  <b>10 días</b>
2. Elevar el nivel de utilidades	Semanal	Estado de Pérdidas y Ganancias (P&L)	<b>-4,5%</b>	<b>2,5%</b>
3. Elevar el nivel de ventas	Mensual	Estado de Pérdidas y Ganancias (P&L)	<b>X</b>	<b>1,25X</b>

**Tabla 14** – Indicadores de efectividad del proyecto de tesis

### 6.3.3. Definición del equipo de trabajo:

Iván F. Rodríguez	Líder
Sergio Sandoval	Ingeniería
Carlos De la Torre	Ing. Industrial
Matthew Morley	Materiales
Teresa Muñoz	Compras
Pedro Niebla	Finanzas
Víctor Macías	Calidad
Gabriel Franco	Producción

### 6.3.4. Project Charter:

Project Charter Template				
<b>Project General Information</b>				
<b>Project Name</b>	IMPLEMENTACION DE PROYECTO DE MANUFACTURA ESBELTA EN PLANTA DE FABRICACION DE PRODUCTOS METAL-MECANICOS PARA LA INDUSTRIA ELECTRONICA			
<b>Project Sponsor</b>	Iván F. Rodríguez			
<b>Project Manager</b>	Iván F. Rodríguez			
<b>Email Address</b>	direccion@comprasony.com			
<b>Phone Number</b>	(52) 1 333 952 4533			
<b>Process Impacted</b>	Todo el proceso productivo			
<b>Expected Start Date</b>	January 5, 2009			
<b>Expected Completion Date</b>	July 31, 2009			
<b>Expected Savings USD</b>		\$2,500,000		
<b>Estimated Costs USD</b>		\$450,000		
<b>Black Belt Assigned</b>	Carlos Dela Torre			
<b>Black Belt Assigned</b>	Iván F. Rodríguez			
<b>Describe the Problem or Issue, Goals, Objectives, and Deliverables of this Project</b>				
<b>Problem or Issue</b>	Pérdidas financieras en Planta Metal Mecánica del orden de -4,5% vs. Ventas caracterizadas por altos niveles de inventario, MOQ's muy elevados que reducen aún más la flexibilidad de la planta; niveles de eficiencia menores al 45%; niveles de desperdicio del orden del 15% vs. ventas.			
<b>Purpose of Project</b>	Mejorar el desempeño operativo de la planta y por ende, el desempeño financiero.			
<b>Business Case</b>	La fuente de empleo de más de 1000 familias depende de la velocidad de transformación de esta operación, la permanencia de esta en duda ya que el ritmo de pérdidas financieras rebasa la capacidad de los stake holders para mantenerla, pese al potencial de crecimiento que puede tener en función al volumen de negocio disponible en este particular segmento de la actividad de manufactura, la nula flexibilidad de su actual modelo caracterizado por flujo discontinuo, la acumulación de inventario, el exceso de recursos en general para para balancear la velocidad de transformación y el nivel de servicio demandado por los clientes; hacen impostergable el cambio.			
<b>Goals / Metrics</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elevar el Índice de Satisfacción de Clientes de un 64% promedio en los últimos 12 meses, a un 95%; este índice está formado por 3 métricos: Entregas a Tiempo, FPY y Tiempo de Entrega.</li> <li>2. Reducir los costos de operación, ajustando la plantilla de 1,450 personas en total, a menos de 850.</li> <li>3. Reducir el nivel de Scrap, del 15% promedio en los últimos 12 meses, a un 0,5%.</li> <li>4. Reducir los niveles de MOQ de un promedio actual de 180 unidades a 15 unidades.</li> <li>5. Aumentar el espacio disponible para actividades productivas en al menos un 25%.</li> </ol>			
<b>Expected Deliverables</b>	Proyecto detallado siguiendo la metodología DMAIC con el soporte teórico necesario que justifique las soluciones propuestas con datos objetivos y verificables.			
<b>Define the Project Scope and Schedule</b>				
<b>Within Scope</b>	Este proyecto esta limitado al proceso de manufactura de EMM, los datos, estadísticos y demás información utilizada en el mismo proviene de fuentes primarias y se asumen correctas para los efectos prácticos de implementación de las soluciones presentadas.			
<b>Outside of Scope</b>	Nuevos proyectos/clientes que se unan a los actuales, no son considerados de forma directa en los cálculos de beneficios, no obstante, como uno de los entregables lo detalla, estos proyectos serán positivamente influenciados una vez implementado el modelo de manufactura esbelta propuesto.			
<b>Tentative Schedule</b>	<b>Key Milestone</b>		<b>Start</b>	<b>Complete</b>
	Form Project Team / Preliminary Review / Scope		01/05/09	
	Finalize Project Plan / Charter / Kick Off			01/21/09
	Define Phase			02/02/09
	Measurement Phase			03/01/09
	Analysis Phase			04/01/09
	Improvement Phase			05/01/09
	Control Phase			06/01/09
	Project Summary Report and Close Out			07/31/09
<b>Prepared by:</b>	Ivan Rodríguez	<b>Date:</b>	January 5, 2009	
<b>APPROVAL SIGNATURES</b>				
<b>PLANT MANAGER</b>		<b>LEAN SIX SIGMA CHAMPION</b>		
<b>PLANT CONTROLLER</b>		<b>PROJECT LEADER</b>		

### 6.3.5. Layout Inicial

Operadores	1,150
Ventas Anuales	US\$80M
Área de Manufactura	120,000 sq. ft.
Dedicada	75%
Compartida	25%
Distancia promedio recorrida	3,500 <sup>11</sup> ft.
Tiempo de Manufactura Promedio	191 días
Tiempo de Cambio de Modelo Promedio	184 min.
Desempeño de la calidad	28,260 PPM

---

<sup>11</sup> Distancia promedio recorrida por persona por semana



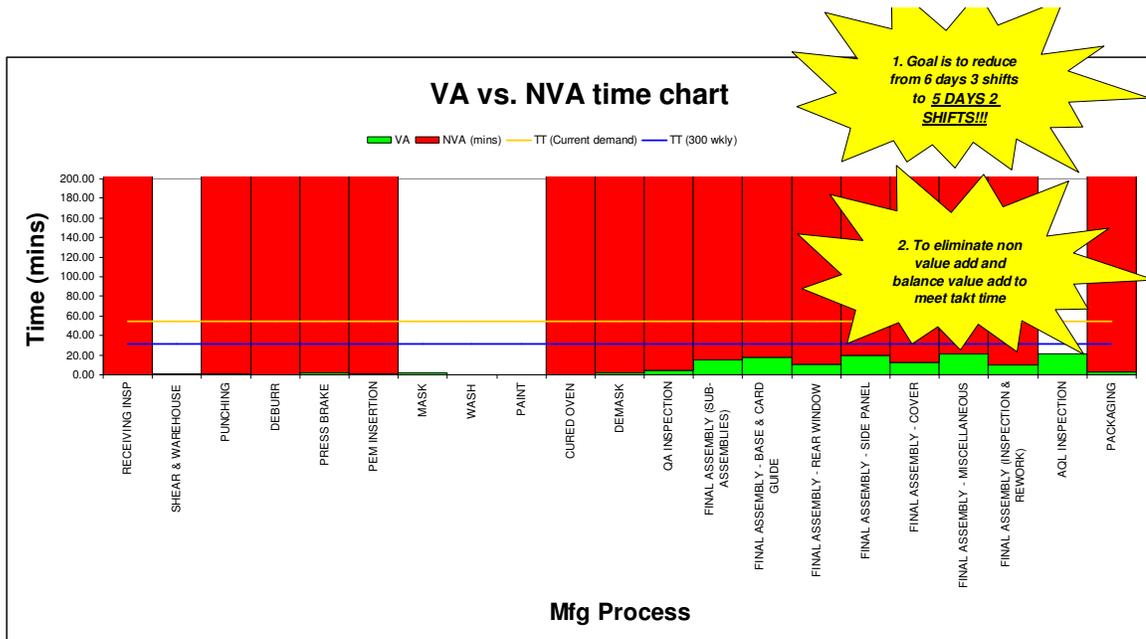


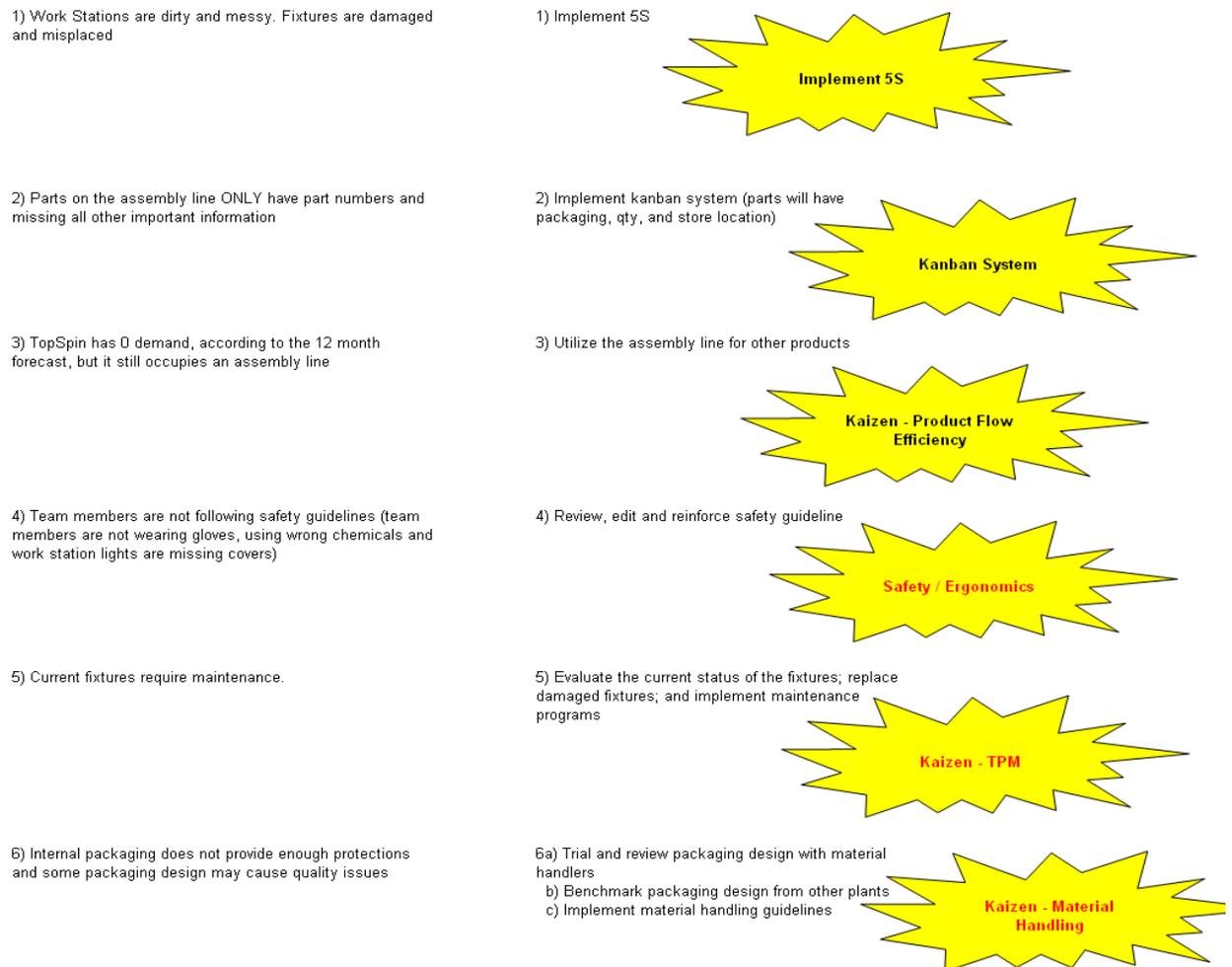
Figura 36 – Análisis de Actividades VA vs. NVA

<b>VA:</b>	mins	143.87	hours	2.40	days	0.11
<b>Inventory cycle time + Mudras detected, NVA is:</b>	mins	124712.33	hours	2078.5388	days	95.565
<b>Total Lead time (VA+NVA):</b>	mins	124856.2	hours	2080.9366	days	95.675
<b>Total distance traveled:</b>	Ft	1259.4				
<b>Total space required:</b>		2483.85				
<b>VA Ratio:</b>		0.12%				

Tabla 15 – Análisis de Actividades VA vs. NVA Estado Actual

### 6.3.7. Definición de Plan de Acción

Con base al análisis de la situación actual se identifican las áreas de oportunidad y se definen las actividades a realizar para transformar los resultados negativos en positivos, predecibles y enmarcados en un esquema de mejora continua.



**Figura 37** – Identificación de áreas de oportunidad y plan de acción de efecto inmediato y sostenido

### 6.3.8. Cadena de Valor Futura

Como resultado del análisis los datos y procesos observados, se define el flujo de valor que habrán de seguir las materias primas, sub-ensambles e información en general para generar el menor tiempo de manufactura y el menor costo.

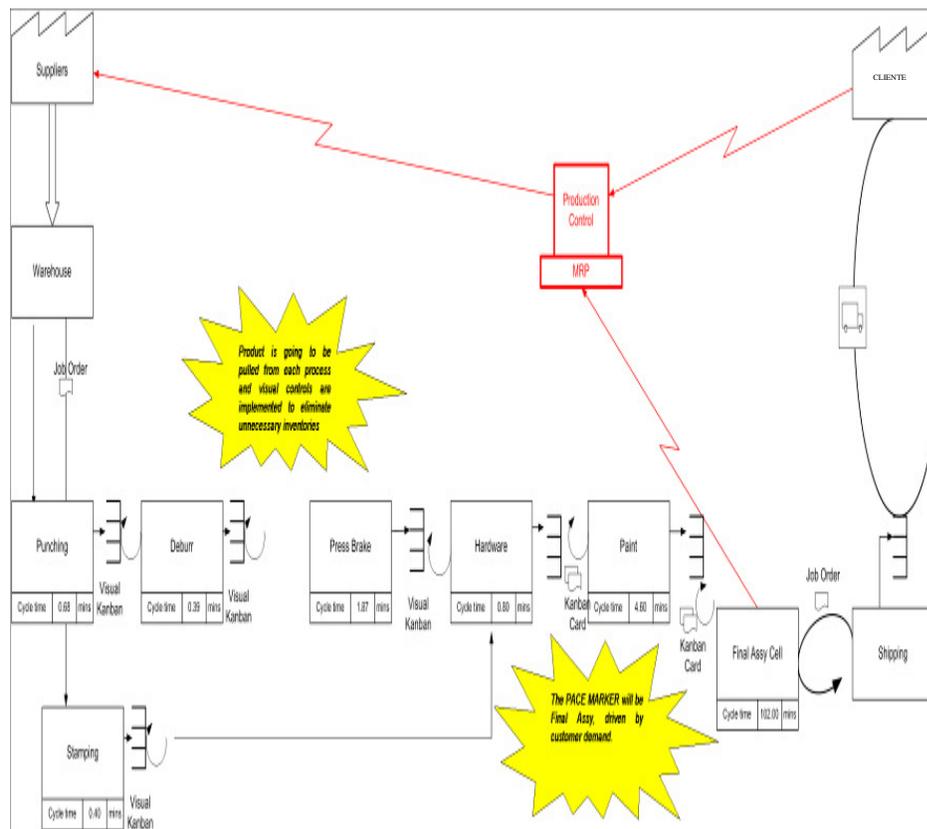


Figura 38 – Value Stream Map Futuro

### 6.3.9. Definición de nuevo Layout

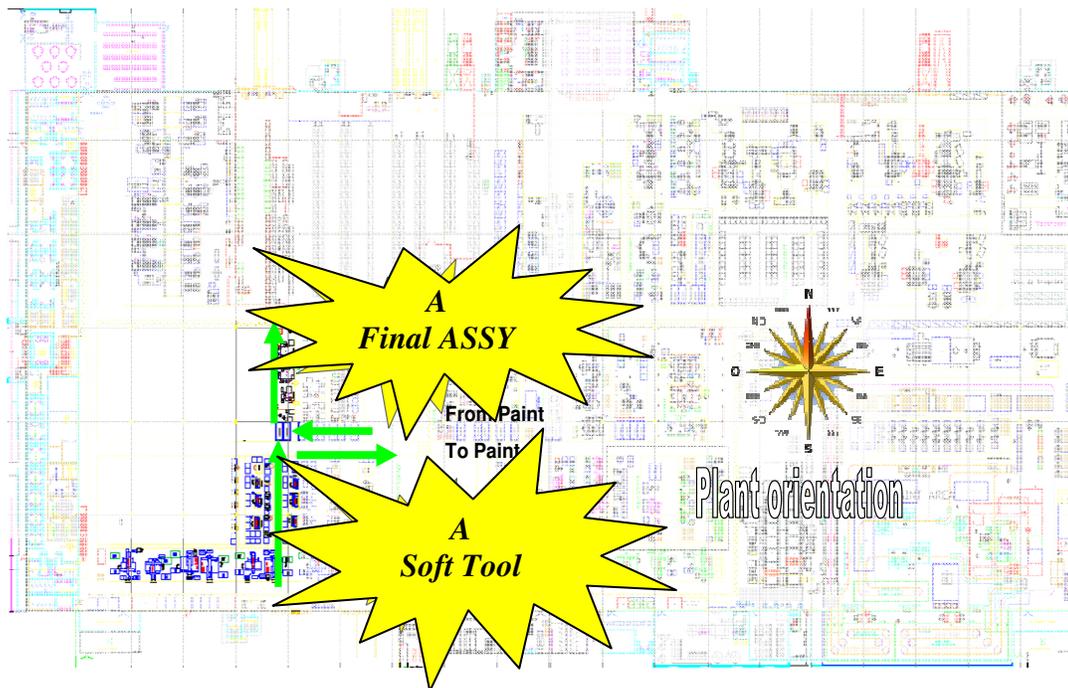


Figura 39 – Nueva Distribución de Planta

6.3.10. Ilustración Gráfica de la Transformación

**ANTES**



**DESPUES**



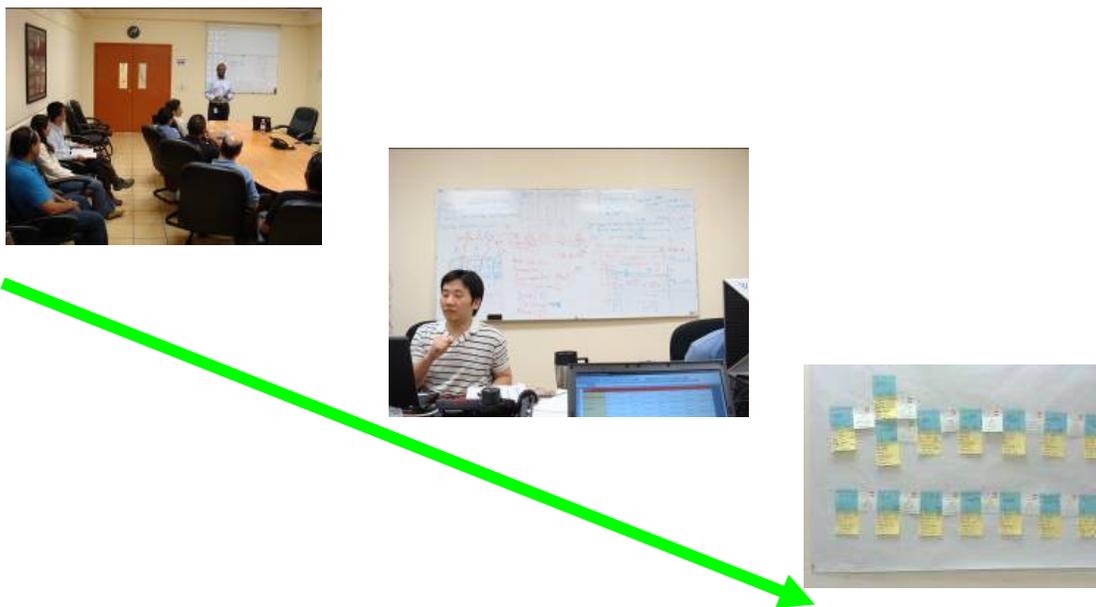
**Figura 40** – Flujos Lógicos y Secuenciales



**Figura 41 – Movimiento de Maquinaria**



**Figura 42** – Definición de flujos y áreas de trabajo



**Figura 43** – Entrenamiento a la platilla total de la planta (labor directa e indirecta)

### 6.3.11. Presentación de Resultados

A continuación se presentan las tablas de resultados de cada una de los silos transformados en cadenas de valor.

#### a. Ensamble de Racks I

Metric	Before	After	Improvement	
WIP Inventory (K\$)	\$754	\$63	91.6%	Reduction
WIP Inventory (Days)	60	7.0	88.3%	Reduction
Cycle Time (Minutes)	933	933	0.0%	Reduction
Set-Up Time (Minutes)	210	40	81.0%	Reduction
Lead Time (Days)	60	7.7	87.3%	Reduction
Daily Line Capacity	39	60	53.8%	Increase
Floor Space (Sq Feet)	28,064	13,342	52.5%	Reduction
Distance Traveled (Feet)	6,617	1,669	74.8%	Reduction
Defect Rate (%)	32.0%	5.0%	84.4%	Reduction
Quality Yield (%)	68.0%	95.0%	39.7%	Increase
Direct Labor (Heads)	96	62	35.4%	Reduction
Indirect Labor (Heads)	17	8	52.9%	Reduction

**Tabla 16 – Resultados de la ejecución del proyecto**

Antes



Después



Figura 44 – Área de Ensamble de Racks

b. Hard Tool

Metric	Before	After	% Improvement
WIP Inventory	22.6 days	3.8 days	83.2%
Set Up	2.2 hours	1.45 hours	34%
Efficiency	N	65.2%	N
Availability	N	98.2%	N
OEE	N	65.2%	N

Tabla 17 – Resultados de la ejecución del proyecto Hard Tool

Antes



Después



**Figura 45** – Cargado de MP en Prensas Hidráulicas



**Figura 46** – Almacen de MP



**Figura 47 – Creación de Supermarket en el área de Hard Tool**

d. Area de Pintura

Metric	Before	After	% Improvement
WIP Inventory	60 days	7.0 days	88.3%
Cycle Time	933 minutes	933 minutes	0.0%
Set Up	210 minutes	40 minutes	81.0%
Floor Space	28,064 sq/ft	13,342 sq/ft	52.5%
Distance Traveled	6,617 ft	1,663 ft	74.9%

**Tabla 18 – Resultados de la ejecución del proyecto Pintura**



**Figura 48 – Area de Almacenamiento de Producto en Proceso**



**Figura 49 – Area de Desenmascarillado**

e. Ensamble de Productos Misceláneos

<b>Metric</b>	<b>Before</b>	<b>After</b>	<b>% Improvement</b>
<b>WIP Inventory</b>	<b>97 days</b>	<b>8.4 days</b>	<b>91.3 %</b>
<b>WIP Inventory (K\$)</b>	<b>\$1,101.0</b>	<b>\$127.7</b>	<b>88.4 %</b>
<b>Floor Space</b>	<b>34,219 sq/ft</b>	<b>6,598 sq/ft</b>	<b>79.5 %</b>
<b>Distance Traveled</b>	<b>3,349 ft</b>	<b>2,046 ft</b>	<b>38.9 %</b>

**Tabla 19** – Resultados de la ejecución del proyecto Ensamble de Misceláneos

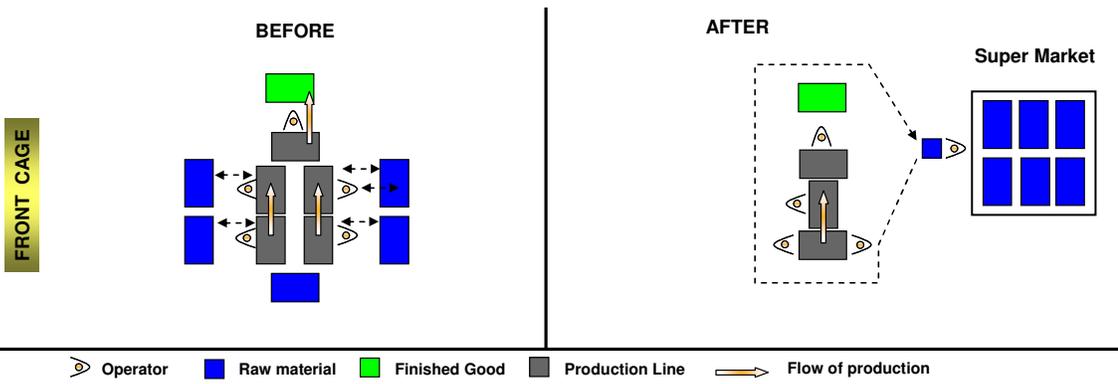


Figura 50 – Área de Integración de Misceláneos

f. Ensamble de Productos de Aluminio

<b>Metric</b>	<b>Before</b>	<b>After</b>	<b>% Improvement</b>
<b>WIP Inventory</b>	<b>37 days</b>	<b>12.5 days</b>	<b>66.2%</b>
<b>Cycle Time</b>	<b>22 minutes</b>	<b>18 minutes</b>	<b>18.2%</b>
<b>Set Up</b>	<b>180 minutes</b>	<b>43 minute</b>	<b>76.1%</b>
<b>Floor Space</b>	<b>3,543 sq/ft</b>	<b>2,551 sq/ft</b>	<b>28%</b>
<b>Distance Traveled</b>	<b>4,390 ft</b>	<b>2,665 ft</b>	<b>39.3%</b>

**Tabla 20** – Resultados de la ejecución del proyecto Racks de Aluminio



**Figura 51** – Flujo de una sola pieza integración de Racks de Aluminio

g. Área de Plásticos

<b>Metric</b>	<b>Before</b>	<b>After</b>	<b>% Improvement</b>
<b>WIP Inventory</b>	<b>97 days</b>	<b>8.4 days</b>	<b>91.3%</b>
<b>WIP Inventory (K\$)</b>	<b>\$1,101.0</b>	<b>\$127.7</b>	<b>88.4%</b>
<b>Direct Labor</b>	<b>153</b>	<b>110</b>	<b>28.1%</b>
<b>Floor Space</b>	<b>34,219 sq/ft</b>	<b>6,598 sq/ft</b>	<b>79.5%</b>
<b>Distance Traveled</b>	<b>3,349 ft</b>	<b>2,046 ft</b>	<b>38.9%</b>

**Tabla 21** – Resultados de la ejecución del proyecto Plásticos



**Figura 52** – Área de Inyección de Plásticos

#### 6.4. Comentarios Finales

Se ha concluido la fase de implementación del sistema de manufactura esbelta en la planta EMM. Los resultados alcanzados son significativos, esta planta tiene mayores probabilidades de supervivencia.

Los tiempos de ciclo se han reducido un promedio de 72%, los cambios de modelos se han reducido en un 78%, pasando de una media de 190 min, a 70 min.; lo cual ha permitido reducir los MOQ y aumentar así la flexibilidad del sistema productivo.

El espacio ocupado para garantizar el nivel de ventas actual se ha reducido en 53,000 sq. ft. generando una oportunidad de crecimiento en el nivel de ventas de 2X, i.e. se tiene suficiente espacio para prácticamente duplicar las ventas con una inversión de capital de trabajo marginal; los flujos son lógicos, se han roto los silos, las divisiones virtuales han sido eliminadas; ha mejorado significativamente la calidad y velocidad de información; se tienen operadores capaces de garantizar la calidad de su trabajo, capaces de tomar decisiones en tiempo real sobre la velocidad del proceso.

El nivel de DPPM ha mejorado abruptamente, pasando de una media de casi 29K a menos de 400 y con ello, los costos de la calidad (internos y externos). EMM ha proporcionado los datos siguientes en cada uno de los indicadores definidos para medir la efectividad de este proyecto.

Indicador	Frecuencia de Medición	Documento Oficial Referencia	Actual	Planeado después de la Transformación	Real
1. Índice de satisfacción del cliente	Mensual	<u>CSI (Customer Satisfaction Index):</u>	<b>64%</b>	<b>95%</b>	<b>98%</b>
		Calidad [FPY]	<b>69%</b>	<b>95,0%</b>	<b>97,0%</b>
		Entregas [OTD]	<b>81%</b>	<b>95%</b>	<b>98.5%</b>
		Lead Time	<b>115 días</b>	<b>10 días</b>	<b>7 días</b>
		<u>Costos:</u>			
		Mano de Obra	<b>1,450</b>	<b>850</b>	<b>795</b>
		Scrap	<b>15%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,25%</b>
		AVG MOQ	<b>180</b>	<b>45</b>	<b>15</b>
		<b>Unidades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Unidades</b>	
2. Elevar el nivel de utilidades	Semanal	Estado de Pérdidas y Ganancias (P&L)	<b>-4,5%</b>	<b>2,5%</b>	<b>3,5%</b>
3. Elevar el nivel de ventas	Mensual	Estado de Pérdidas y Ganancias (P&L)	<b>X</b>	<b>1,25X</b>	<b>2X</b>

**Tabla 22 – Resultados de la Implementación de Proyecto de Tesis**

## CONCLUSIONES

El mundo de la empresa estaba dividido en dos partes, como lo había estado el Mar Rojo. Una parte hacía grandes cosas a partir de pequeñas cosas, encontraba clientes, cuidaba el dinero, vendía productos y se quejaba de lo que hacía la otra parte. Las dos porciones de la compañía no tenían nada en común y tenían poco interés la una en la otra. A lo largo de los años se descubrió que no hay partes separadas en una organización, es un cuerpo que necesita que todos sus componentes funcionen a la vez, como una unidad, si se quiere obtener una vida próspera. Las diferentes funciones operativas solían ser responsables de cualquier actividad que encajara bajo su denominación. Fabricación de lo fabricado, compras de lo comprado, personal de los empleados, y la calidad la obtenía el departamento de calidad.

La empresa esbelta implica el rediseño radical de los procesos de negocios, dado que con esbelta suceden varias circunstancias como la de que los oficios que eran estrechos y orientados a una tarea, como la exclusividad del personal calificado en punzonado o doblez en nuestro caso, pasan a ser multidimensionales. Individuos que antes hacían lo que se les ordenaba toman ahora decisiones por sí mismos; pues tienen la responsabilidad de administrar de principio a fin su cadena de valor y ganan conforme esos resultados. El trabajo en serie desaparece.

Los departamentos funcionales pierden su razón de ser, no hay distancia entre planeadores, representantes de servicio al cliente, finanzas, calidad, etc. Los gerentes dejan de ser supervisores para convertirse en entrenadores. Los trabajadores piensan más en las necesidades de los clientes y menos en las de sus jefes. Actitudes y valores cambian en respuesta a nuevos planes de incentivos.

Cambian las unidades de trabajo de departamentos funcionales a equipos que administran cadenas de valor. Lo que hacen realmente las compañías que rediseñan es volver a unir el trabajo de Adam Smith y Henry Ford, que alguna vez dividieron en diminutas fracciones. Una vez reestructurado, los equipos de la cadena de valor (grupos de personas que trabajan juntos para realizar un proceso total), resultan ser la manera más lógica de organizar al personal que realiza el trabajo y a su vez, reemplazan la antigua estructura departamental de punzonado, estampado, insertos, formado, doblez, pintura, ensamble, etc.

En cierto modo solo se está volviendo a reunir un grupo de trabajadores que habían sido separados artificialmente por la organización. Cuando se vuelven a unir, los llamamos equipo de la cadena de valor o equipo de proceso. En otros términos, un equipo de cadena de valor es una unidad que se reúne naturalmente para completar todo un trabajo o proceso desde su inicio a fin.

Los oficios cambian de tareas simples a trabajo multidimensional. Los equipos de la cadena de valor comparten con sus colegas de equipo la responsabilidad conjunta del rendimiento del proceso total. no sólo de una pequeña parte de él. Todos los miembros de equipo tienen por lo menos algún conocimiento básico de todos los pasos del proceso, y probablemente realizan varios de ellos. Cuando el trabajo se vuelve más multidimensional también se vuelve más sustantivo. Esbelta no sólo elimina el desperdicio sino también el trabajo que no agrega valor. Lo cual significa que la gente destinará más tiempo a hacer trabajo real.

Después de la reestructura:

- Los trabajadores tienen sensación de terminación, cierre y realización.
- Los trabajadores comparten retos y recompensas con la empresa.
- Están orientados al cliente.
- Trabajo más gratificante (desarrollo personal y aprendizaje).
- El trabajo es más exigente y difícil.

Con la estructura esbelta:

El papel del trabajador cambia de controlado a facultado. Las compañías que se han rediseñado no buscan empleados que sigan reglas, quieren empleados que sigan sus propias reglas. Esto es lo que buscamos también aquí, en EMM.

Cuando la administración confía a los equipos la responsabilidad de completar un proceso total, administrar una cadena de valor, necesariamente tiene que otorgarles también la autoridad para tomar medidas conducentes.

A los trabajadores de equipos de la cadena de valor se les permite y exige que piensen, se comuniquen y obren con su propio criterio y tomen decisiones. Los equipos Kaizen que son de varias personas, deciden cómo y cuándo hacer las cosas pero dentro de los límites de la organización (fechas límite convenidas, metas de productividad, normas de calidad, etc.).

La preparación para el oficio cambia de entrenamiento a educación. Si los oficios en procesos rediseñados no requieren que el trabajador siga reglas, sino que las cree, a fin de hacer lo que debe de hacer, entonces los empleados necesitan suficiente educación y capacitación para discernir lo que deben de hacer. El entrenamiento aumenta las destrezas y la competencia y les enseña a los empleados el “cómo” de un oficio, la educación aumenta su perspicacia y la comprensión, y les enseña el “por qué”, de manera que todos en la cadena de valor estemos en el mismo contexto, con el mismo enfoque de proceso.

El enfoque de medidas de desempeño y compensación se desplaza de actividad a resultado. En las compañías que se han rediseñado ya no se les paga a los empleados por su tiempo o por las actividades que realizan, sino por su desempeño en la organización, es decir con base a los resultados logrados.

Un ejemplo de esto es un estructurador de negociaciones de IBM Credit, a este no se le mide por el número de hojas que maneja, sino por la rentabilidad de los negocios que termina y por su calidad, esto se refleja en las encuestas de satisfacción de los clientes.

En la estructura esbelta de EMM también se debe modificar lo referente a las remuneraciones. Las recompensas por rendimiento serían en forma de bonificaciones, no aumento en los sueldos. Se deben eliminar algunos supuestos en el área de compensaciones como:

- Pagar con base en la antigüedad.
- Pagar con base en el rango, entre mas alto, mas sueldo.
- Con base en los sistemas tradicionales de puntos.
- Con base en el número de subordinados.
- Con base en jerarquías.

En las compañías rediseñadas el rendimiento se mide por el valor creado, y la compensación debe fijarse de acuerdo con ello.

Cambian los criterios de ascenso de rendimiento a habilidad. El ascenso a un nuevo puesto dentro de una organización es en función a las habilidades de la persona, no de antigüedad, para ello la matriz de habilidades nos será una clara guía. Es un cambio, no una recompensa. “Pagar con base en el desempeño y promover por habilidad”

Los valores cambian de proteccionistas a productivos. Una empresa esbelta implica un cambio tanto en la cultura organizacional como en su configuración estructural. Exige que los empleados de la cadena de valor se convencen de que trabajan para satisfacer a sus clientes, y no a sus jefes, esto se debe reforzar con la práctica de recompensas de EMM. Y el foco de los gerentes debe ser “maximizar la satisfacción de la clientela”, tanto interna como externa.

Los sistemas administrativos de la organización son los formadores de los valores y las creencias de los empleados, por lo tanto una declaración de valores tiene que ser reforzada por los sistemas administrativos de la compañía. Y la alta administración, además de apoyar la implantación, debe ella misma vivir esos valores que pretende que los empleados adopten, o sea la alta dirección debe poner el ejemplo en la práctica. Cambiar los valores es parte tan importante de esbelta como cambiar los procesos.

En una compañía rediseñada los empleados deben tener creencias como:

- Los clientes pagan nuestros salarios.
- Todo oficio en esta compañía es esencial.
- La responsabilidad es mía.
- Yo pertenezco a un equipo.
- Nadie sabe lo que nos reserva el mañana.

Los gerentes cambian de supervisores a entrenadores. En una empresa esbelta los procesos complejos se vuelven simples, pero los oficios simples se vuelven complejos.

Los gerentes deben ayudar a sus empleados a realizar un trabajo más valioso y más exigente.

Los equipos de la cadena de valor no necesitan jefes, necesitan entrenadores que les ayuden a resolver problemas, por ejemplo de punzonado, de soldadura, de pulido, de insertos, de dobléz; no están en la acción pero sí suficientemente cerca para asistir al equipo. Los jefes tradicionales diseñan el trabajo y lo asignan; supervisan, controlan y verifican el trabajo a medida que pasa de un realizador a la tarea siguiente.

Después de una reestructura esbelta, los gerentes tienen que pasar de sus papeles de revisoría a actuar como facilitadores, capacitadores cuyo deber es el desarrollo del personal de manera que esas personas sean capaces de realizar ellas mismas procesos que agregan valor. Para ello requieren fuertes destrezas interpersonales y tienen que enorgullecerse de las realizaciones de los otros.

Las estructuras organizacionales cambian de jerárquicas a planas. Todo un proceso se convierte en el trabajo de un equipo. Las decisiones que antes requerían juntas de gerentes ahora las toman y las resuelven los equipos en el curso del trabajo normal. Por lo tanto cualquier estructura organizacional que quede después de la reestructuración tiende a ser plana.

Después de la estructuración ya no se necesita tanta gente para volver a reunir procesos fragmentados. Con menos gerentes hay menos niveles administrativos. Mientras que un gerente puede supervisar sólo a unas siete personas, puede entrenar a cerca de treinta.

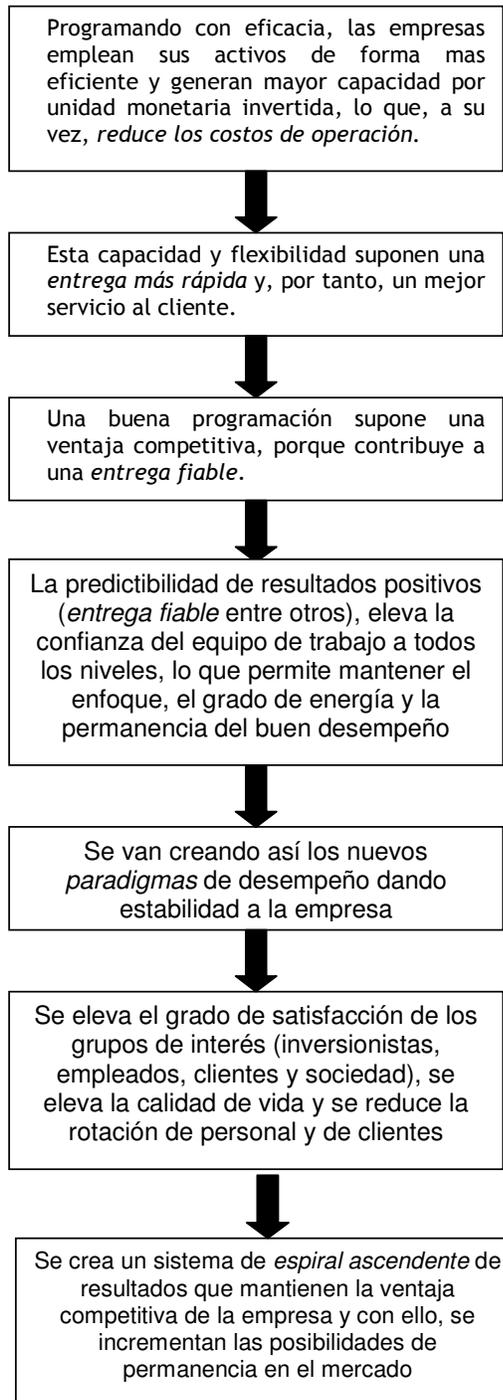
En la compañía tradicional la estructura organizacional es una cuestión importante porque es el mecanismo por el cual se resuelven muchas cuestiones y se contestan muchas interrogantes.

Los ejecutivos cambian de anotadores de tantos a líderes.

- Tienen que ser líderes capaces de influir y reforzar los valores y creencias de los empleados con sus palabras y sus hechos.
- Poseen la responsabilidad global del desempeño de los procesos rediseñados (sin tener control directo sobre las personas que los ejecutan y que trabajan más o menos en forma autónoma).
- Vigilan que los procesos se diseñen de tal forma que los trabajadores puedan hacer el oficio requerido y que estén motivados por los sistemas administrativos de la empresa (medición del rendimiento y compensaciones)
- Se interesan íntimamente en cómo se hace el trabajo.

La hipótesis planteada se ha satisfecho plenamente. Se probó que existe una relación directa entre el sistema operativo de una planta de manufactura y los resultados que ésta genera; y que a través de la aplicación de ingeniería industrial y de técnicas de optimización matemática, fue posible crear un modelo de generación de resultados predecibles que hoy por hoy ya garantizan la supervivencia de EMM en el tiempo.

La esquematización del proceso hipotético planteado al inicio de este proyecto se verifica en cada uno de sus fases.



Proceso Virtuoso Iván F. Rodríguez

## GLOSARIO DE TERMINOS

Administración de la calidad total (*Total Quality Management: TQM*): Visión integral para que una empresa mejore todos los aspectos de calidad y satisfacción a clientes -incluyendo velocidad de respuesta y servicios-. Esta comienza en la alta dirección de la empresa y asigna responsabilidades tales como el control estadístico de procesos (SPC), grupos de acción correctiva, análisis causa-efecto y metodologías para la solución de problemas, entre otros.

Administración de información del producto (*Product data management: PDM*): Programa basado en sistemas que vincula, administra y organiza la información relativa a producción de varias fuentes -interna y externa de proveedores- a lo largo de una plataforma computacional en diferentes áreas funcionales y localizaciones físicas.

Administración del mantenimiento asistida por computadora (*computerized maintenance management*): Programa basado en sistemas que analiza las condiciones de operaciones del equipo de producción genera información para programar el mantenimiento y la rutina para la ejecución de tal actividad.

Cálculo sistemático de costos para cada operación (*Activity-based costing system*): Sistema que asigna costos basados en las operaciones específicas de un proceso de producción.

Comparación y evolución de prácticas empresariales (*Competitive Benchmarking*): Programas formales que comparan las prácticas y resultados de desempeño con los mejores competidores o con los que realizan operaciones similares.

Control de procesos y de especificaciones de diseños (*Cpk Process capability measurements*): Medición estadística de la validación de los procesos de producción respecto de las especificaciones de diseño. Un buen valor indicado por la medición estadística refleja que el proceso se encuentra bajo control de manera consistente, dentro de las especificaciones límite o sobre el valor objetivo o meta.

Control estadístico de procesos asistido por computadora en tiempo real (*Computerized SPC with real time feedback*): Sistema asistido por computadora en donde la información y datos del proceso pueden ser accesadas en todos momentos.

Conexiones Intranet (*Intranet connections*): Sistema de comunicación que integra los recursos de información en el interior de una empresa.

Conexión extranet (*Extranet connections*): Sistema seguro que vincula a clientes y proveedores al Intranet de la planta para poder proporcionarle información más detallada.

Distribución justo a tiempo (*JIT*): Distribución de insumos, partes y accesorios en pequeños lotes y sobre un esquema o flujo continuo esbelto a las necesidades del sistema de producción.

Diseño y manufactura asistido por computadora (*computer-aided design and manufacturing: CAD/CAM*): Sistema de diseño de productos por computadora. Muchos sistemas capturan la geometría y otras características para la administración de datos para ingeniería, productividad, análisis de costos y desempeño. Asimismo se generan, datos/instrucciones para máquinas con sistema de control numérico por computadora (CNC).

Integración con proveedores (*Supply chain/logistic systems*): Programa diseñado para optimizar el proceso de programación y de otras actividades colaterales con proveedores, incluyendo las funciones de transporte y distribución.

Intercambio electrónico de datos con clientes/proveedores (*EDI links*): Sistema de intercambio de información basado en protocolos de comunicación y formatos

preestablecidos de documentos que permiten la comunicación entre computadoras (por ejemplo: ordenes de compra, factura y otras transacciones).

Manufactura integrada por computadora (*computer integrated manufacturing: CIM*): Vincula funciones de administración con ingeniería, procesos de manufactura y operaciones de apoyo. En la planta controla la secuencia de operaciones de producción, control de operaciones de equipo automatizado y sistemas en cadena; transmite instrucciones de manufactura al equipo y operadores; captura información de procesos y facilita registro y análisis de resultados

Planeación avanzada de procesos para la manufactura (*MRP II advanced*): Programa que convierte estimaciones de demanda en programas de producción, genera listas de insumos, crea ordenes de trabajo para cada paso del proceso, registra niveles de inventarios, coordina compras de materiales con los requerimientos de producción, genera reportes de problemas y otra información para propósitos financieros, de acuerdo a la configuración del programa.

Planeación de recursos (*Enterprise resource planning: ERP*): Extensión del software MRP II diseñado para operar una empresa con gran número de clientes y actividades dispersas. Vincula gran variedad de áreas funcionales incluyendo la administración de materiales, de canales con proveedores, producción, ventas y mercadeo, distribución, finanzas, servicios y recursos humanos.

Prácticas de manufactura ágil (*Agile manufacturing strategies*): Técnicas e iniciativas que hacen posible el éxito bajo condiciones de cambio no predecibles. Estas no sólo permiten a una planta responder rápidamente a las necesidades de los clientes, si no incluyen la habilidad para reconfigurar prontamente las operaciones y llevar acabo alianzas estratégicas para hacer frente a cambios imprevistos en los mercados. También incorpora la habilidad para reaccionar velozmente a los cambios técnicos o eventos en el medio ambiente.

Prácticas de mantenimiento predictivo (*Predictive or preventive maintenance*): Actividades de mantenimiento programado a inventarios regulares para conservar el equipo en buenas condiciones de trabajo; y el predictivo sirve para prevenir paros de operaciones no previstas a través de la búsqueda y análisis de datos (vibración, temperatura, presión, ruido y condiciones de lubricación) sobre las condiciones del mismo. Este análisis es utilizado para predecir las fallas, definir el plan de mantenimiento y restaurar las buenas condiciones de operación de la maquinaria. La inversión más desarrollada de estas prácticas incluye sistemas de administración de mantenimiento computarizado (*Computerized maintenance management system: cmms*).

Prácticas de cambio rápido (*Quick changeover Techniques*): Variedad de técnicas, tales como SMED (Single - minute exchange of dies) que permiten reducir e incrementar más frecuentemente los cambios de modelos/tiempos de arranque (setups), mejorando la flexibilidad, reduciendo el tamaño de lotes y los ciclos de tiempo para la manufactura.

Proceso de manufactura celular (*Cellular manufacturing*): Visión de los procesos de manufactura en la cual el equipo y las estaciones de trabajo son combinadas para facilitar la producción de pequeños lotes y mantener flujos de producción continuos. Todas las operaciones necesarias para producir de pequeños lotes y mantener flujos de producción continuos. Todas las operaciones necesarias para producir un componente o el subensamblaje de partes son realizadas cerca para permitir la retroalimentación entre operadores ante problemas de calidad u otros. Los trabajadores en la manufactura celular están tradicionalmente entrenados para funciones diversas y por tanto son capaces de atender diversas interrogantes.

Programa de mejoramiento de la seguridad (*Safety-improvement programs*): Prácticas tendientes a mejorar constantemente la seguridad dentro de la planta incluyendo, pero no limitado, a grupos de seguridad, premios, entrenamiento, programas y comunicaciones y el establecimiento de metas cuantitativas de seguridad.

Programas de estimaciones/administración de la demanda (*Forecast/demand management Software*): Programas que provee sistemas de programación de producción y ayuda a planear la optimización de inventarios, a partir de la demanda proyectada calculando el impacto causado por la variación de sus factores explicativos.

Programación de capacidad finita (*finite capacity scheduling*): Sistema que permite la programación de producción basada en cada paso de su rutina, compensando los supuestos utilizados en los módulos del tradicional sistema MRP II.

Políticas proactivas respecto al medio ambiente (*Proactive environmental compliance*): Los esfuerzos de una planta o una empresa en adoptar prácticas que reduzcan, entre otros los contaminantes, emisiones, antes que los establezca la autoridad reguladora.

Recepción de órdenes en línea (*On line order entry system*): Sistema basado en computadoras que facilita que los distribuidores, representantes de ventas y clientes realicen ordenes de compra - en el internet o intranet corporativo - sin la intervención de personal de ventas.

Simulación de procesos asistida por computadora (*Computerized process simulation*): Utilización de simulación en computadoras para facilitar la secuencia de operaciones de producción, análisis de flujos de producción y el trazado - ubicación de los servicios para manufacturera.

Sistemas de producción enfocados (*Focused-factory production*): Configuración y estructura de la organización de la planta en la cual el personal y el equipo son agrupados para crear pequeños negocios, cada cual con una línea de productos o grupos de clientes. Una planta puede ser dividida en muchas unidades,

diseñadas alrededor de flujos de procesos, cada una de las cuales tienen el control sobre la provisión de servicios tales como el mantenimiento, compras, programación, ingeniería de manufacturas y servicio a clientes.

Sistema de ejecución de la manufactura (*Manufacturing execution system: MES*): Programa que establece vínculos entre las diferentes áreas de piso/áreas de producción: programación, monitoreo, control de equipo, programas e historias de mantenimiento y la administración de la calidad.

Trabajo: Conjunto de operaciones (actividades).

Operación: Procesamiento de un trabajo sobre una determinada máquina.

Máquina: Recurso utilizado por las operaciones.

Restricciones tecnológicas: Definen el orden en el que cada trabajo debe usar las máquinas.

Restricciones disyuntivas: Indican que las operaciones correspondientes a una misma máquina no pueden procesarse simultáneamente.

Ready time: Tiempo a partir del cual un trabajo está listo para ejecutarse.

Due time: Tiempo límite para realizar la última operación de un trabajo.

Patrón de flujo: Indica el orden en que los trabajos utilizan las máquinas.

Flow-shop scheduling: Todos los trabajos usan las máquinas en el mismo orden.

Job-shop scheduling: Cada trabajo usa las máquinas en un cierto orden que puede ser distinto de otros trabajos.

Makespan: Tiempo total en el que todos los trabajos completan su ejecución

Problema  $n \times m$  – Instancia job-shop o flow-shop scheduling en la que  $n$  es el número de trabajos y  $m$  el número de máquinas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] HILLER F. y LIEBERMAN G. J.. Introducción a la Investigación de Operaciones. 3ra Edición, Mc Graw Hill, México, 1982
- [2] SALAZAR María Angélica. RÍOS Roger. Minimización Heurística del número de tareas tardías al secuenciar Líneas de Flujo. Revista de la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad autónoma de Nuevo León México. Vol. VII, No 23, abril-junio 2004.
- [3] HOYOS, Mario. Memorias del Primer Encuentro Nacional de Automática. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. Noviembre 24-27 de 1993. Cali. Colombia.
- [4] MOCELLIN. Joao Vitor, BUZZO Walter Rogerio. Programacao da Producao em sistemas Flow-Shop utilizando um Método Heurístico Híbrido Algoritmo Genético- Simulated Annealing. Revista Gestao & producao. Brasil. VII. No 3, diciembre 2000.

- [5] TORO E., GRANADA M., ROMERO R. Algoritmo Memético aplicado a la solución del problema de Asignación Generalizada. Revista Tecnura. Año 8 No 16 semestre I -2005.
- [6] DIAZ Adenso.GLOVER Fred y otros. Optimización Heurística y Redes Neuronales. Editorial Paraninfo s.a. Magallanes España 1996.
- [7] REEVES Colin. A generic Algorithm for Flowshop Sequencing. Pergamon. Computers Ops Res. Vol 22 No 1, pp 5-13, 1995 Great Britain.
- [8] BEASLEY, J.E. CHU, P.C. A Genetic Algorithm for the Generalized Assignment Problem. Computers and Operations Research, 24(1), pp 17-23, 1997.
- [9]. SCHEDULING INSTANCES. <http://ina.eivd.ch/Collaborateurs/etd/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>

## ANEXOS

- A. Función Objetivo
- B. Modelo Matemático y Estructuración de Datos
- C. Resultados de la Implementación