

DISEÑO DE UN MODELO GENERAL PARA LA PLANEACIÓN OPERATIVA Y  
LA SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN PEQUEÑAS EMPRESAS CON  
PROCESOS DE MANUFACTURA INTERMITENTES.

GUILLERMO AUGUSTO CASTILLO TATIS  
OSCAR ANTONIO FANDIÑO HURTADO

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
2005

DISEÑO DE UN MODELO GENERAL PARA LA PLANEACIÓN OPERATIVA Y  
LA SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN PEQUEÑAS EMPRESAS CON  
PROCESOS DE MANUFACTURA INTERMITENTES.

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES:

GUILLERMO AUGUSTO CASTILLO TATIS  
OSCAR ANTONIO FANDIÑO HURTADO

DIRECTOR:

GUSTAVO ALFREDO BULA  
INGENIERO INDUSTRIAL

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
2005

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b><u>PARTE I GENERALIDADES DEL PROYECTO.....</u></b>	<b><u>15</u></b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
<b>3. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
4.1. PLANEACIÓN, PROGRAMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN LA ORGANIZACIÓN	20
4.2. TIPOS DE PROCESOS O CONFIGURACIONES PRODUCTIVAS	24
4.2.1. Configuración por Proyecto.....	27
4.2.2. Configuración de Taller (Job-Shop). .....	28
4.2.3. Configuración por Lotes. ....	29
4.2.4. Configuración en Línea. ....	29
4.2.4.1. Configuración en Línea Acompasada por el Equipo (LAE): .....	29
4.2.4.2. Configuración en Línea Acompasada por Operarios (LAO). ....	30
4.2.5. Configuración de Flujo Continuo.....	30
4.3. MATRIZ PRODUCTO-PROCESO	31
4.4. PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN DETALLADA DE LA PRODUCCIÓN EN AMBIENTES GENÉRICOS DE MANUFACTURA.	36
4.5. SISTEMA DE MANUFACTURA INTERMITENTE	39
4.5.1. Características Del Sistema De Producción Intermitente.....	40
4.5.2. Etapas de la Programación.....	41
4.6. EL PROBLEMA DE SCHEDULING	43
4.6.1. Conceptos Básicos de Scheduling.....	44

4.6.2. Tipología de problemas de Scheduling .....	46
4.6.3. Patrones de Flujo .....	49
4.6.3.1. Open-Shop: .....	49
4.6.3.2. Job-Shop: .....	49
4.6.3.3. Flow-Shop: .....	49
4.6.3.4. Permutation Flow-Shop: .....	49
4.6.4. Conceptos Avanzados Sobre Scheduling .....	51
4.7. EL PROBLEMA DE LA SECUENCIACIÓN .....	58
4.8. EL ARTE DEL MODELAMIENTO .....	60
4.9. OPTIMIZACIÓN Y SOLUCIÓN DE UN MODELO DE UN PROBLEMA COMBINATORIO .....	62
4.9.1. Programación Matemática .....	63
4.9.2. Aproximación Heurística .....	64
4.9.2.1. Heurísticas basadas en Cuellos de Botella. ....	68
4.9.2.2. Recocido Simulado.....	69

## **PARTE II MODELO GENERAL PROPUESTO .....75**

<b>5. ETAPAS DEL MODELO PROPUESTO.....</b>	<b>76</b>
5.1. ETAPA 0: ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO. ....	77
5.2. ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA PRODUCTIVO. ....	79
5.2.1. Productos.....	80
5.2.2. Materias Primas .....	81
5.2.3. Inventarios .....	82
5.2.4. Operaciones.....	82
5.2.5. Secuencia .....	83
5.2.6. Máquinas .....	83
5.2.7. Lote de Transferencia .....	84
5.2.8. Tiempos de Producción .....	85
5.2.9. Políticas de Inventarios .....	87
5.2.10. Recepción y Despacho .....	87
5.2.11. Programas de Mantenimiento .....	88

5.2.12. Clientes .....	89
5.2.13. Restricciones Gerenciales y del Sistema .....	89
5.3. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LA TOMA DE DECISIONES.	90
5.4. ETAPA 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	93
5.5. ETAPA 4: SOLUCIÓN DEL MODELO	95
5.5.1. Aplicación del Shifting Bottleneck Heuristic .....	96
5.5.2. Aplicación de Tardy Jobs .....	100
5.5.3. Recocido Simulado Aplicado .....	101
5.6. ETAPA 5: VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE SOLUCIÓN	107
5.7. ETAPA 6: ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO	108
5.7.1. Base de Hechos.....	109
5.7.2. Base de Conocimientos .....	110
5.7.3. Motor de Inferencia .....	111
5.7.4. Interfaz con el usuario.....	112

### **PARTE III DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....114**

<b>6. EXPERIENCIA EN LA EMPRESA D’CARTÓN .....</b>	<b>115</b>
6.1. ETAPA 0: ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO	115
6.2. ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA PRODUCTIVO.	116
6.2.1. Tipo de Flujo del Sistema Productivo de D’Cartón.....	116
6.2.2. Aspectos Claves del Sistema.....	117
6.2.2.1. Productos .....	117
6.2.2.2. Materias Primas.....	121
6.2.2.3. Inventarios .....	122
6.2.2.4. Operaciones .....	123
6.2.2.5. Secuencia.....	133
6.2.2.6. Máquinas .....	134
6.2.2.7. Lote de Transferencia.....	134
6.2.2.8. Tiempos de Producción y Respuesta .....	135
6.2.2.9. Políticas de Inventarios .....	136

6.2.2.10. Recepción y Despacho .....	137
6.2.2.11. Programas de Mantenimiento .....	138
6.2.2.12. Clientes .....	139
6.2.2.13. Restricciones Gerenciales y del Sistema .....	139
6.3. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LA TOMA DE DECISIONES	140
6.4. ETAPA 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	141
6.5. ETAPA 4: SOLUCIÓN DEL MODELO	143
6.6. ETAPA 4: VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE SOLUCION	145
6.7. ETAPA 6: ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO	157
6.7.1. Base de Hechos .....	157
6.7.2. Base de Conocimientos .....	158
6.7.3. Motor de Inferencia .....	159
6.7.4. Interfaz con el Usuario .....	160
6.7.4.1. Módulo de Productos .....	162
6.7.4.2. Módulo de Producción .....	167
6.7.4.3. Módulo de Solicitudes .....	174
6.7.4.4. Módulo de Inventarios .....	176
6.7.4.5. Módulo de Ayuda .....	178
<b><u>PARTE IV CONSIDERACIONES FINALES .....</u></b>	<b>179</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>180</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>182</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>16</b>

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Niveles de la planificación empresarial.	22
<b>Figura 2</b> Matriz producto-proceso.	32
<b>Figura 3</b> Planeación y Programación de la producción y la Matriz P- P.	35
<b>Figura 4</b> Flujo de información en un sistema de manufactura.	38
<b>Figura 5</b> Diagrama de Gantt de un Flow Shop 3 X 3.	50
<b>Figura 6</b> Diagrama de Gantt de un Job Shop 3 X 3.	50
<b>Figura 7</b> Diagramas de Gantt.	51
<b>Figura 8</b> Fases de la Modelización.	61
<b>Figura 9</b> Diagrama de flujo de algoritmo de Recocido Simulado Estándar.	72
<b>Figura 10</b> Etapas del modelo para la secuenciación de actividades.	77
<b>Figura 11</b> Parámetros claves de un Sistema Productivo.	80
<b>Figura 12</b> Diferencia entre un sistema productivo sin partición de lote y con partición del mismo.	85
<b>Figura 13</b> Información clave para la elaboración de un Modelo Lógico Simbólico de un sistema productivo.	95
<b>Figura 14</b> Diagrama de flujo del procedimiento Shifting Bottleneck Heuristic.	97
<b>Figura 15</b> Diagrama de Flujo de la heurística Tardy Jobs.	102
<b>Figura 16</b> Diagrama de Flujo del Recocido Simulado Aplicado a un Job Shop.	103
<b>Figura 17</b> Representación de la generación del vecindario en SA.	105
<b>Figura 18</b> Estructuración del Sistema Experto.	109
<b>Figura 19</b> Diagrama de las operaciones y secuencia de producción en D'Cartón	125
<b>Figura 20</b> Diagrama representativo de la operación Cortarrollo.	126
<b>Figura 21</b> Diagrama representativo de la operación Guillotina.	128
<b>Figura 22</b> Diagrama representativo de la operación Impresión.	130
<b>Figura 23</b> Diagrama representativo de la operación Barnizado.	131
<b>Figura 24</b> Diagrama representativo de la operación Troquelado.	133
<b>Figura 25</b> Sistema para Gestión del Mantenimiento D'Cartón Ltda.	139
<b>Figura 26</b> Representación de una base de datos en INSTANTDB.	158
<b>Figura 27</b> Página de bienvenida al Software de Programación de la Producción en D'Cartón.	163
<b>Figura 28</b> Página de consulta de producto.	164
<b>Figura 29</b> Hoja de especificaciones para el producto consultado.	164
<b>Figura 30</b> Página de creación de producto.	165
<b>Figura 31</b> Página de modificación de producto.	166

<b>Figura 32</b> Hoja de especificaciones para el producto a modificar.	167
<b>Figura 33</b> Listado de productos en la base de datos.	168
<b>Figura 34</b> Página de introducción de pedidos.	169
<b>Figura 35</b> Página de programación de materias primas.	170
<b>Figura 36</b> Resultado arrojado por el software acerca de la decisión de corte.	170
<b>Figura 37</b> Orden de corte arrojada por el sistema luego de la programación de las materias primas.	171
<b>Figura 38</b> Listado de pedidos sin ser secuenciados.	172
<b>Figura 39</b> Listado Total de pedidos en el sistema.	173
<b>Figura 40</b> Listado de órdenes de corte enviadas a los proveedores.	174
<b>Figura 41</b> Página de configuración del estado de las maquinas.	174
<b>Figura 42</b> Creación de un cartón con el nombre ya existente.	175
<b>Figura 43</b> Creación de un cartón totalmente nuevo.	175
<b>Figura 44</b> Formato de solicitud de planchas.	176
<b>Figura 45</b> Formato de solicitud de troqueles.	177
<b>Figura 46</b> Listado de bobinas registradas en la bodega de D'Cartón.	178
<b>Figura 47</b> Listado de órdenes de corte enviadas a la Cooperativa de Impresores.	179

## TABLA DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Jerarquía de las decisiones aplicadas a la función de producción.	23
<b>Cuadro 2</b> Tipología de Sistemas Productivos según Woodward.	26
<b>Cuadro 3</b> Tipos de configuraciones productivas según Hayes y Wheelwright.	27
<b>Cuadro 4</b> Sistemas de planeación y programación de la producción.	36
<b>Cuadro 5</b> Principales reglas de prioridad para la secuenciación de actividades.	59
<b>Cuadro 6</b> Ventajas y desventajas de los modelos analíticos y de simulación.	62
<b>Cuadro 7</b> Paralelo del proceso termodinámico de recocido con la optimización comb.	71
<b>Cuadro 8</b> Definición del Lateness de un trabajo Ji	93
<b>Cuadro 9</b> Calculo del Lateness para cada Ji	98
<b>Cuadro 10</b> Funciones del Motor de Inferencia.	111
<b>Cuadro 11</b> Elementos de la operación Cortarrollo	127
<b>Cuadro 12</b> Elementos de la operación de Guillotina	127
<b>Cuadro 13</b> Elementos de la operación Impresión.	129
<b>Cuadro 14</b> Elementos de la operación Barnizado	131
<b>Cuadro 15</b> Elementos de la operación Troquelado	133
<b>Cuadro 16</b> Restricciones Gerenciales de D'Carton Ltda.	140
<b>Cuadro 17</b> Restricciones Operativas de D'Carton Ltda.	141
<b>Cuadro 18</b> Restricciones de Secuencia en D'Carton Ltda.	143
<b>Cuadro 19</b> Restricciones de Capacidad de D'Carton Ltda..	143
<b>Cuadro 20</b> Datos para validación del CASO 1.	147
<b>Cuadro 21</b> Resultados de las corridas arrojadas por la aplicación - CASO 1	148
<b>Cuadro 22</b> Resultados arrojados por ILOG del CASO 1.	148
<b>Cuadro 23</b> Datos para la validación del CASO 2.	149
<b>Cuadro 24</b> Resultados arrojados por la primera corrida para el CASO 2	150
<b>Cuadro 25</b> Resultados arrojados por la segunda corrida para el CASO 2	150
<b>Cuadro 26</b> Resultados arrojados por la tercera corrida para el CASO 2	151
<b>Cuadro 27</b> Resultados arrojados por la cuarta corrida para el CASO 2	151
<b>Cuadro 28</b> Resultados arrojados por la quinta corrida para el CASO 2	152
<b>Cuadro 29</b> Resultados arrojados por la sexta corrida para el CASO 2	152
<b>Cuadro 30</b> Resultados arrojados por la séptima corrida para el CASO 2	153
<b>Cuadro 31</b> Resultados arrojados por la octava corrida para el CASO 2	153
<b>Cuadro 32</b> Resultados arrojados por la novena corrida para el CASO 2	154
<b>Cuadro 33</b> Datos en segundos para la validación del CASO 3.	156
<b>Cuadro 34</b> Resultados de las corridas arrojadas por la aplicación para el CASO 3.	157
<b>Cuadro 35</b> Resultados arrojados por ILOG para el CASO 3.	157

## TABLA DE ANEXOS

<b>Anexo A</b> Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Primer Caso	188
<b>Anexo B</b> Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Segundo Caso	190
<b>Anexo C</b> Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Tercer Caso	193
<b>Anexo D</b> Bases de Datos del Sistema Experto de D'Carton	195

TITULO: DISEÑO DE UN MODELO GENERAL PARA LA PLANEACIÓN OPERATIVA Y LA SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN PEQUEÑAS EMPRESAS CON PROCESOS DE MANUFACTURA INTERMITENTES\*

AUTORES: GUILLERMO AUGUSTO CASTILLO TATIS  
OSCAR ANTONIO FANDIÑO HURTADO\*\*

PALABRAS CLAVES:

SISTEMAS INTERMITENTES, SISTEMAS EXPERTOS, SECUENCIACIÓN, HEURÍSTICAS, RECOCIDO SIMULADO, TARDY JOBS, CUELLO DE BOTELLA MOVIL.

DESCRIPCIÓN:

La planificación y programación de la producción en empresas de proceso discontinuo o intermitente es uno de los problemas más complejos e importantes para una amplia variedad de sistemas productivos. A pesar de esta importancia, la planificación de la producción es habitualmente un procedimiento manual que puede conducir a un exceso de inventario, una utilización deficiente de los recursos y un aumento en los costos de producción.

Para todas las pequeñas empresas y más especialmente las de carácter manufacturero, la toma de decisiones referente a inventarios, secuenciación de actividades, programación, etc., juega un papel importante en su desarrollo y generación de utilidades. Dada la complejidad de los problemas de secuenciación se plantea una metodología de solución por medio de procedimientos heurísticos, como es el caso de la heurística de cuello de botella móvil y el recocido simulado.

Este proyecto pretende mejorar el desempeño de las pequeñas empresas de la región, orientándose en la toma de decisiones del empresario con base en sistemas expertos que intenten emular su capacidad de racionamiento y decisión lógica a través de reglas y modelos matemáticos.

La elaboración y aplicación de la metodología a proponer es fruto de la experiencia vivida en la empresa Impresos y Empaques D'Cartón LTDA

\* Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Físico mecánicas – Escuela de Estudios Industriales y Empresariales –  
Dirigido por Gustavo Alfredo Bula

TITLE: DESIGN OF A GENERAL MODEL FOR OPERATIVE PLANNING AND SEQUENCE OF ACTIVITIES IN SMALL COMPANIES WITH INTERMITTENT MANUFACTURING PROCESSES\*

AUTHORS: GUILLERMO AUGUSTO CASTILLO TATIS  
OSCAR ANTONIO FANDIÑO HURTADO\*\*

KEY WORDS:  
INTERMITTENT SYSTEMS, EXPERT SYSTEMS, SCHEDULING, HEURISTICS, SIMULATED ANNEALING, TARDY JOBS, SHIFTING BOTTLENECK.

DESCRIPTION:

Production planning and scheduling in enterprises with intermittent or discontinuous processes is one of the most complex and important problems for a wide variety of production systems. Despite this importance, production planning is habitually a manual procedure that can lead the company to an inventory excess, deficient use of resources and a rise of production costs.

To all of the small enterprises, and specially those with manufacturer processes, the decision making relating to inventories, sequencing of activities, scheduling, etc. plays an important role in its development and generation utilities. Because of the complexity of sequencing problems, this investigation shows a solution methodology using heuristics procedures, as Shifting Bottleneck Heuristic and Simulated Annealing.

This project tries to improve the performance of small enterprises of the region, being orientated by decision making of businessmen based on expert systems that emulate his thinking capacity and logic decision through rules and mathematical models.

The elaboration and application of the methodology, is based on the experience lived in the company Impresos y Empaques D'Carton LTDA.

\* Investigation work.

\*\* Faculty of Physics Mechanics - School of Industrial and Managerial Studies – Directed by Gustavo Alfredo Bula.

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación surge debido a la evidenciada necesidad de herramientas que apoyen la toma de decisiones referentes a planeación operativa y secuenciación de actividades en pequeñas empresas colombianas. La planificación y programación de la producción en empresas de proceso discontinuo o intermitente es uno de los problemas más complejos e importantes para una amplia variedad de sistemas productivos. A pesar de esta importancia, la planificación de la producción es habitualmente un procedimiento manual que puede conducir a un exceso de inventario, una utilización deficiente de los recursos y un aumento en los costos de producción.

En el ambiente colombiano, la información que apoya la toma de decisiones al interior de las pequeñas empresas carece de las características necesarias que aseguran una selección correcta de las alternativas de acción a seguir, esto debido a que los empresarios basan gran parte de sus decisiones en opiniones, creencias, experiencias adquiridas en el cargo, y en el mejor de los casos en algún tipo de información estadística. La imposibilidad de contar con un sistema de apoyo a la toma de decisiones puede privar a las empresas de la oportunidad de defender el mercado nacional y de esta forma perder poco a poco la participación en este, dando lugar así al posicionamiento de nuevas y más avanzadas organizaciones.

Es así como este proyecto pretende mejorar el desempeño de las micro y pequeñas empresas de la región, orientándose en la toma de decisiones del empresario con base en sistemas expertos que intenten emular su capacidad de razonamiento y decisión lógica a través de reglas y modelos matemáticos.

La elaboración y aplicación de la metodología a proponer es fruto de la experiencia vivida en la empresa Impresos y Empaques D'Cartón LTDA, la cual se interesó por este proyecto y facilitó el desarrollo del mismo, prestándose para el diseño de un sistema experto para su área productiva.

**PARTE I**  
**GENERALIDADES DEL**  
**PROYECTO**

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

En Colombia, se ha hecho poco o nada para que las pequeñas empresas entren en el proceso de toma de decisiones inteligentes y que a la vez esto incremente su productividad y competitividad con miras a obtener resultados positivos en el mercado nacional y aprovechar oportunidades en el mercado extranjero. Algunas de las razones por las que no se ha cumplido este objetivo, se deben a los altos costos y poca adaptabilidad al tipo de negocio de los sistemas existentes para este fin, falta de convicción y poca capacitación en este campo.

La globalización de la economía ha generado un ambiente competitivo creciente en la mayoría de los sectores industriales y comerciales. Hoy en día las empresas enfrentan el reto de buscar maneras efectivas para responder a los cambios en el mercado, estableciendo a la vez ventajas competitivas que soporten y faciliten el éxito de la organización. Por lo tanto, los interesados en garantizar su permanencia, han abordado esta nueva situación desarrollando nuevos métodos de control, planeación y programación de las actividades. Los directivos de las pequeñas empresas colombianas deberán cambiar su forma de ver el ámbito productivo, generando así nuevas maneras de proceder en cuanto a toma de decisiones se refiere, intentando adaptarse más rápido a las exigencias de los clientes, para así incrementar el nivel de respuesta hacia los mismos. Este cambio genera la necesidad de una planeación y programación de actividades de una manera eficiente y eficaz al mismo tiempo.

La Dirección Nacional de Planeación (DNP), define para el sector industrial colombiano tres tipos de empresas teniendo en cuenta su infraestructura financiera y su capacidad de generación de empleo directo. La gran empresa que constituye el 23.32% del parque industrial colombiano con capital financiero mínimo de \$ 3.000'000.000 y más de 150 trabajadores directos; la

mediana empresa que es el 31,2% con recursos financieros entre \$ 750'000.000 y \$ 2.999'000.000 y mano de obra directa entre 50 y 149 trabajadores, y la pequeña y microempresa que constituyen el 45,48% con capital financiero entre \$ 50'000.000 y \$ 749'000.000 y entre 10 y 49 trabajadores. Esto significa que las pequeñas empresas representan casi la mitad de la industria colombiana, constituyéndose en el sector más importante de la economía<sup>1</sup>. Por lo tanto todo proyecto emprendido para mejorar la situación de las pequeñas empresas impacta sustancialmente en el desarrollo de la sociedad colombiana.

Para todas las pequeñas empresas y más especialmente las de carácter manufacturero, la toma de decisiones referente a inventarios, secuenciación de actividades, programación, etc., juega un papel importante en su desarrollo y generación de utilidades por lo que no se puede dejar atrás este hecho ya que éstas son generadoras de un altísimo porcentaje de empleo en el país.

Además cabe mencionar que se deben aprovechar los avances tecnológicos de los últimos años (tecnologías de la información), los cuales con ayuda y capacitación por parte de un experto, facilitan el desarrollo de sistemas de apoyo y toma de decisiones que aumenten la productividad y efectividad de las organizaciones así como la reducción considerable de tiempo y costos, generando empresas que a futuro sean competitivas y con una posición ya establecida y fortalecida en el mercado.

Con el ánimo de solucionar esta problemática, se plantea en esta investigación un modelo general para que cualquier empresa, con ciertas características predefinidas, esté en capacidad de desarrollar un software para soportar el proceso de programación y secuenciación de actividades, basado en la

---

<sup>1</sup> TORRES ACOSTA, J. H. Planeacion Agregada en la PYME: Aplicación al sector industrial colombiano. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigación y Desarrollo Científico, Bogota, 2003.

implementación de un campo específico de la Inteligencia Artificial, conocido como Sistemas Expertos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo general para la planeación operativa y secuenciación de actividades en una empresa con procesos de manufactura intermitente a partir del concepto de sistemas expertos, el cual sirva como apoyo en la toma de decisiones del área de producción, basándose en las operaciones de la empresa Impresos y Empaques D'Cartón LTDA.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la dinámica del sistema productivo de la empresa.
- Analizar el proceso de toma de decisiones de la programación detallada.
- Construir la base de hechos del sistema experto fundamentado en el análisis de los procesos y recursos de la empresa.
- Construir la base de conocimientos del modelo, partiendo de la información entregada por el experto.
- Adecuar modelos matemáticos, ya existentes, que permitan la caracterización del sistema productivo, planteando a la vez una serie de reglas lógicas necesarias para el desarrollo del sistema experto.
- Desarrollar la plataforma de Software con su respectivo motor de inferencia e interfaz con el usuario.
- Validar el modelo realizado a partir de una aplicación en software ya existente para el trato de ésta problemática.

### **3. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

La investigación pretende caracterizar una metodología para el diseño, desarrollo y validación de un modelo general para la planeación operativa y secuenciación de actividades, tomando como eje fundamental conceptos de Inteligencia Artificial, por medio de la experiencia vivida en una pequeña empresa con proceso de manufactura intermitente.

La empresa Impresos y Empaques D'Carton LTDA actualmente cuenta con unas bases limitadas para la realización de un sistema experto, producto de proyectos anteriores similares, que aunque son una aproximación a una solución de la problemática, presentan debilidades, ya que se omitieron aspectos relacionados con las prioridades de los clientes y el cumplimiento de las fechas pactadas con los mismos. Además el soporte tecnológico que se tiene para la aplicación de estas herramientas presenta limitaciones con respecto al manejo de datos y la velocidad de procesamiento de los mismos, lo que lo hace muy rígido, disminuyendo así su confiabilidad.

El sistema experto no contará con el módulo de recopilación de conocimientos, es decir que no está en capacidad de aprender de las circunstancias cambiantes del medio externo. Otra limitante del trabajo a realizar es que los modelos y el software resultantes del estudio serán inaplicables a otra empresa pues el motor de inferencia y la base de conocimientos se realizarán bajo medidas de la empresa Impresos y Empaques D'Cartón LTDA. Sin embargo la metodología de desarrollo del sistema es el mismo para cualquier empresa por lo que puede considerarse un modelo válido para la creación de modelos.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. PLANEACIÓN, PROGRAMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN LA ORGANIZACIÓN

Las actividades de planeación de las empresas manufactureras se han enmarcado históricamente dentro de una estructura de largo, mediano y corto plazo, en donde los niveles de gerencia más altos utilizan datos globales para las decisiones de alto nivel, mientras que las decisiones de taller se tomarían utilizando datos detallados<sup>2</sup>, esto es conocido como la *Planeación Jerárquica de la Producción (HPP<sup>3</sup>)*, que tiene como ventaja, que cada nivel sucesivo tiene una base de datos más pequeña y una estructura más sencilla. Las decisiones sobre las operaciones se toman dentro del contexto de la firma viéndola como un todo y analizando el comportamiento y tendencias del mercado para poder configurar la estrategia corporativa de la empresa, como resultado de esta estrategia se plantea la misión corporativa reflejando la manera en que la firma planea explotar sus recursos y funciones (mercadeo, finanzas y operaciones) para obtener una ventaja competitiva logrando la satisfacción del público objetivo (nicho de mercado). La estrategia de operaciones, especifica la forma en que la organización considera utilizar sus capacidades de producción (procesos, personas, planta, etc.) para brindar soporte a su estrategia corporativa. En el ambiente organizacional, las decisiones gerenciales se pueden dividir en tres grandes áreas o niveles<sup>4</sup>:

---

<sup>2</sup> Adaptado de CHASE, AQUILANO, JACOBS. Administración de Producción y Operaciones: Manufactura y Servicios. 8 ed. Bogotá: Mc Graw-Hill Interamericana S.A, 2000, p.6

<sup>3</sup> HPP viene de las siglas en inglés de *Hierarchical Production Planning*, término acuñado por Harlan Meal.

<sup>4</sup> CHASE, AQUILANO, JACOBS. Op. Cit. p.7.

- Nivel Estratégico: Las decisiones que se tomen en este campo impactan sobre la capacidad de la compañía a largo plazo en términos relativos a la manera en que se puedan satisfacer las necesidades del cliente. Las decisiones tomadas a nivel estratégico se convierten en las condiciones fijas o las restricciones operacionales bajo las cuales funcionará la organización tanto a mediano como a corto plazo. Los temas estratégicos suelen ser muy amplios, ya que se tratan aspectos como: ¿Cuáles son los productos a vender? ¿Con qué estrategia de fabricación se competirá (precio, calidad, nivel de servicio, tiempo, etc.)? ¿Dónde es conveniente ubicar las instalaciones? ¿Cuanta capacidad se necesita?
- Nivel Táctico: En este nivel se enmarca todo lo concerniente a la programación eficiente de materiales y la mano de obra dentro de las restricciones impuestas por las decisiones anteriormente citadas. Las preguntas más comunes a resolver en este nivel son: ¿Cuántos empleados son necesarios? ¿Cuándo se necesitan? ¿Se debe trabajar tiempo extra? ¿Cuándo se debe entregar el material? ¿Cuáles son los niveles de inventario que se deben manejar?
- Nivel Operativo: Las decisiones tácticas se convierten en las restricciones operacionales por medio de las cuales se toman las decisiones de sobre planeación y control operacional, en comparación con lo anterior, las decisiones a este nivel son estrechas y a corto plazo. Los temas incluyen: ¿Qué tareas se realizarán hoy o esta semana? ¿A quién se asigna cada tarea? ¿Qué tareas son prioritarias?

La planificación y programación de la producción se caracterizan por contar con un conjunto de decisiones estructurales interrelacionadas, las cuales permiten definir la actividad productiva de la organización a corto y mediano plazo (Domínguez Machuca, J. D., 1995). La interrelación entre el conjunto de decisiones estructuradas permite que exista una coordinación adecuada entre

los objetivos, planes y actividades de los niveles estratégico, táctico y operativo. Según el enfoque holista que caracteriza la teoría General de Sistemas, cada una trabajará sus propias metas, pero persiguiendo el cumplimiento de los objetivos generales (Torres, Acosta, J. H., 1994).

El enfoque jerárquico de planeación y programación de la producción tiene que ver fundamentalmente con las fases del proceso de planeación y decisión que deben desarrollarse en el sistema productivo. En la *figura 1* se bosqueja, a grandes rasgos, las fases y planes que arrojan los distintos niveles de toma de decisión en la organización referente al sistema productivo como tal.

PROCESO DE PLANIFICACIÓN			
	FASE	PLAN A OBTENER	
PLANIFICACIÓN EMPRESARIAL	ESTRATÉGICA	Planificación a largo plazo	Plan de producción a largo plazo
	TÁCTICA	Planificación agregada o a mediano plazo	Plan agregado de producción
	OPERATIVA	Programación Maestra	Programa Maestro de Producción
		Programación de Componentes	Plan de Materiales
		Gestión de Talleres	Programación de operaciones

**Figura 1** Niveles de la planificación empresarial<sup>5</sup>

Dentro de la organización, a medida que se aproxima el periodo de producción, la planeación se vuelve más refinada y detallada (Planeación Operativa) y como fruto de ésta surgen fundamentalmente tres planes o programas: un Programa Maestro de Producción (MPS<sup>6</sup>), el cual genera las cantidades y

<sup>5</sup>Adaptado de DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y los servicios. Madrid: McGraw Hill, 1995, p. 35.

<sup>6</sup> MPS de las siglas en inglés Master Production Schedule.

fechas de los artículos específicos requeridos para cada periodo, un Plan de Materiales, puesto que es necesario que todas las materias primas e insumos estén disponibles en los momentos adecuados, y un Programa de Operaciones en el que se detalla la asignación y los instantes de inicio de las actividades en cada centro de trabajo.

El *cuadro 1* resume las características de cada nivel de decisión dentro de la organización, como afectan específicamente la función de producción y que variables competen a cada nivel generalmente.

Nivel	Estratégico	Táctico	Operativo
<b>Tipo generales de decisión</b>	Planes para la adquisición de recursos	Planes para la utilización de los recursos	Ejecución detallada de programas
<b>Nivel administrativo</b>	Alto	Medio	Bajo
<b>Horizonte</b>	Largo (más de 2 años)	De 6 a 24 meses	Corto (día a día)
<b>Nivel de detalle</b>	Muy General	General	Muy detallado
<b>Grado de incertidumbre</b>	Alto	Medio	Bajo
<b>Variables a controlar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos a vender</li> <li>• Decisión de la ventaja competitiva</li> <li>• Naturaleza del equipo (de propósito general vs. especializado)</li> <li>• Habilidades necesaria de la fuerza laboral</li> <li>• Naturaleza de la planeación de la producción y administración de inventarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de utilización de la planta</li> <li>• Cantidad de horas de mano de obra</li> <li>• Niveles de inventario</li> <li>• Niveles de subcontratación.</li> <li>• Tasa de producción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos a producir.</li> <li>• Cantidades a producir.</li> <li>• Lapsos de producción.</li> <li>• Asignación de máquinas y recursos.</li> <li>• Secuencia de trabajos</li> <li>• Seguimiento y control de los materiales.</li> </ul>

**Cuadro 1** Jerarquía de las decisiones aplicadas a la función de producción.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Tomado de SILVER Edward, PIKE David y PETERSON Rein. Inventory Management and Production Planning and Scheduling. New York : Jhon Wiley & Sons, 1998. p.538.

## 4.2. TIPOS DE PROCESOS O CONFIGURACIONES PRODUCTIVAS

*Deuermeyer* define un sistema de manufactura como una red de procesos orientada y con un objetivo definido, a través de la cual fluyen las entidades<sup>8</sup>. Es decir un sistema de manufactura tiene un objetivo, generalmente se refiere a la generación de dinero gracias al valor agregado a los productos o servicios ofrecidos. Un sistema de manufactura consta de procesos, los cuales incluyen tanto los procesos físicos (corte, moldeo, soldadura, etc.), como otras etapas que soportan directamente el proceso de manufactura (mantenimiento, recepción de materiales, embarque, etc.).

Las entidades no solo incluyen las partes o insumos a ser manufacturadas, también hace referencia a la información que es usada para el control del sistema. El flujo de las entidades a través del sistema describe como los materiales y la información, son procesadas. La administración del flujo es la parte más importante del trabajo del administrador de operaciones. Finalmente es importante reconocer que un sistema de manufactura es una red de partes interrelacionadas y administrar las interrelaciones es tan importante como la gestión y control de las entidades individualmente.

Si se estudia el contexto empresarial, pueden encontrarse que existen distintos sistemas de producción en las empresas manufactureras y de servicio, respondiendo, como es lógico, a características propias de sus procesos y funcionamiento. Así mismo, si se revisa la literatura sobre Administración de la Producción y las Operaciones, se encuentra con una amplia gama de tipologías respecto a la forma de clasificar las configuraciones productivas. Esto se debe, fundamentalmente, a la variedad de enfoque con que los autores tratan estos

---

<sup>8</sup> Tomado de DEURMEYER, B. Interoffice Memorandum on Undergraduate Curriculum in Industrial Engineering, Texas A&M University, 1994.

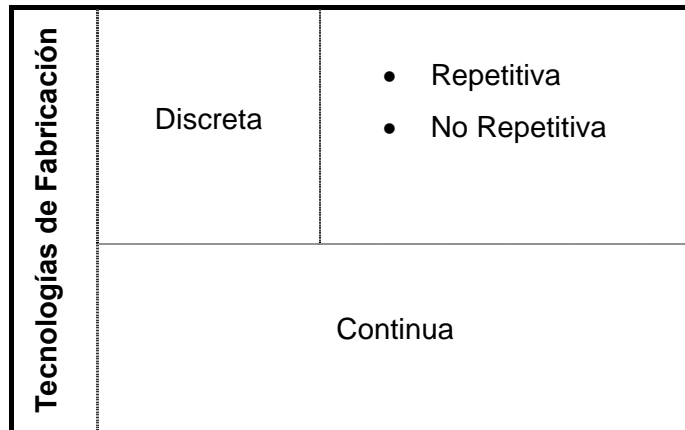
temas en sus trabajos, que lejos de clarificar añaden mayor complejidad a dicha problemática. La gran diversidad de procesos existentes y los potenciales criterios de clasificación a considerar hacen que sea difícil encontrar una clasificación exhaustiva que de manera clara contemple cada caso concreto.

Los sistemas de conversión se pueden clasificar de una manera general como continuos o intermitentes, dependiendo de las características del proceso de conversión y del producto o servicio. Un sistema continuo o del tipo ensamble es aquel en el que se producen cantidades grandes o indefinidas de un producto homogéneo. Por otra parte, los sistemas intermitentes producen una gran variedad de productos, uno a la vez (en cuyo caso se dice que están hechos a la medida) o números finitos de lotes de diferentes productos de acuerdo con el pedido del cliente. Muchas de los sistemas productivos no son estrictamente intermitentes o solo continuos, sino una combinación de ambos.

Woodward<sup>9</sup> fue probablemente el primer autor en tipificar los sistemas productivos (ver *cuadro 2*). Descubrió que las tecnologías de fabricación se podían encuadrar en dos grandes categorías generales: la producción **discreta** y la producción de **proceso continuo**. Dentro de la producción discreta enmarcó dos tipologías claramente diferenciables, la producción artesanal o por unidad (**producción discreta no-repetitiva**), producción mecanizada o masiva (**producción discreta repetitiva o intermitente**). Cada categoría incluye un método distinto de obtener los productos, siendo las principales diferencias, el grado de estandarización y automatización, tipo de proceso y la repetitividad de la producción. La tipología de Woodward distingue entre fabricación unitaria, de pequeños lotes, de grandes lotes, la producción en serie y aquellos procesos de transformación de flujo continuo. La propuesta de Woodward ha marcado pautas en la comunidad de autores.

---

<sup>9</sup> Tomado de WOODWARD, J. *Industrial Organization: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press, 1965



**Cuadro 2** Tipología de Sistemas Productivos según Woodward.

Pérez Gorostegui<sup>10</sup>, ofrece una clasificación distinta, clasificando los sistemas productivos según varias características propias, tales como: el destino del producto (por encargo/para el mercado), la razón de producir (por órdenes/almacén), y la dimensión temporal del producto (intermitente /continua).

Las anteriores clasificaciones son útiles desde el punto de vista de la contextualización y caracterización de las unidades de producción, pero no resultan muy útiles para la realización de análisis competitivo y estratégico en fabricación, además no tratan la interrelación estratégica del binomio «producto-proceso», omitiendo así, las implicaciones potenciales que representa para la empresa la elección de uno u otro sistema de producción.

El proceso, es considerado el factor de mayor relevancia al identificar o caracterizar cualquier sistema de fabricación. Esta relevancia se fundamenta en el hecho de que cada proceso se caracteriza por tener un patrón de flujo material y layout que lo hacen diferente. Quizás por esto, la clasificación basada en la tipología existente de procesos de producción más difundida sea

---

<sup>10</sup> PÉREZ GOROSTEGUI, E. Economía de la Empresa. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A. 1991.

la propuesta por Hayes y Wheelwright<sup>11</sup> en el año de 1984 (ver *cuadro 3*), la cual resulta similar en muchos aspectos a la establecida por Woodward pero con énfasis en las pautas que siguen los flujos de trabajo en la fábrica. Ellos arribaron a cinco tipos de configuraciones productivas bien definidas: **proyecto**, **taller de trabajo** (job-shop), **lotes** o flujo en línea desacoplado, **línea de ensamble** (también denominada en serie, repetitiva o de producción en masa) y **proceso continuo**. Cabe destacar como se pasa de un tipo a otro de configuración a medida que aumenta el volumen de producción, la automatización y homogenización de los procesos, la repetitividad de las operaciones, la inversión en capital y la estandarización del producto, reduciéndose la flexibilidad del proceso y la participación del cliente en éste.

<b>Configuraciones productivas</b>	Por Proyecto
	De Taller de Trabajo
	Por Lotes
	En Línea de Ensamble
	De Proceso Continuo

**Cuadro 3** Tipos de configuraciones productivas según Hayes y Wheelwright.

#### 4.2.1. Configuración por Proyecto.<sup>12</sup>

Producción generalmente de productos únicos de cierta complejidad que requieren gran cantidad de inputs o entradas. Estos deben fabricarse en un lugar definido debido a que es difícil o casi imposible transportarlos una vez terminados. Como resultado, y a diferencia de cualquier otro proceso

<sup>11</sup> HAYES, R.H ,WHEELWRIGHT, S.C. Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing. Nueva York: John Wiley & Sons, 1984.

<sup>12</sup> Tomado de DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y los servicios. Madrid: McGraw Hill, 1995, p. 143.

productivo, los recursos que comprende deben trasladarse al lugar de operación, ya que aquí no existe flujo del objeto de trabajo, sino que son los recursos técnicos y humanos quienes acuden al lugar de trabajo. Las actividades y recursos se gestionan como un todo. Su coordinación adquiere carácter crítico. Existe un principal interés por el control de los costos y las fechas de terminación.

#### **4.2.2. Configuración de Taller (Job-Shop).<sup>13</sup>**

El sistema de producción Job-Shop fabrica muchos productos diferentes en volúmenes que varían entre la unidad y pocas unidades de cada producto. Consiste en una fabricación no en serie, de lotes pequeños, para pedidos únicos o de pequeñas cantidades. Por lo regular implica productos adaptados, diseñados a la medida del cliente y de naturaleza muy poco repetitiva. Se requieren operaciones poco especializadas, las cuales son realizadas por un mismo obrero o por un grupo pequeño de ellos, los cuales tienen la responsabilidad de terminar todo o casi todo el producto. Como se fabrican productos muy diferentes, los recursos son flexibles y versátiles. El flujo material es irregular, aleatorio y varía considerablemente de un pedido al siguiente. Se requiere que el fabricante interprete el diseño y las especificaciones del trabajo, así como que aplique capacidades del alto nivel en el proceso de conversión. En la producción Job-Shop lo que se trata es de obtener un "*producto a medida*" del cliente.

---

<sup>13</sup> Ibíd. p. 144.

### **4.2.3. Configuración por Lotes<sup>14</sup>.**

El sistema de flujo en lotes produce menos variedad de producto en volúmenes más elevados que el caso anterior. El mayor volumen se debe a un aumento de la repetitividad en ciertos artículos que se hacen dominantes. Estos productos se fabrican en lotes, que representan unos pocos meses de requerimientos de clientes. En este caso se requieren más operaciones, y éstas son más especializadas, por lo que difícilmente un mismo operario pueda dominarlas todas con una eficiencia aceptable. En tal sentido, el trabajo se divide en diferentes etapas tecnológicas, en las cuales los lotes sufren distintas operaciones. Así la instalación se suele dividir en secciones o talleres, en los cuales se agrupan los equipos con funciones similares. Se suele emplear una combinación de layouts celulares y funcionales. Los layouts celulares se utilizan cuando es efectivo en cuanto a costos disponer el equipo en células, para producir familias de productos. Como hay muchos productos, el equipo es mayormente flexible, de propósito general. El flujo material es desconectado aunque regular, variable de un pedido a otro, aunque existen pautas de flujo para familias de productos y para grandes lotes. Es el sistema más utilizado.

### **4.2.4. Configuración en Línea.<sup>15</sup>**

Existen dos modalidades de configuraciones en línea: Línea Acompasada por el Equipo (LAE) y Línea Acompasada por Operarios (LAO).

#### **4.2.4.1. Configuración en Línea Acompasada por el Equipo (LAE):**

El equipo y procesos están organizados en una línea o líneas especializadas para producir un pequeño número de productos diferentes o familias de

---

<sup>14</sup> Ibíd. p. 145.

<sup>15</sup> Ibíd. p. 146.

productos. Estos sistemas se usan sólo cuando el diseño del producto es estable y el volumen es lo suficientemente elevado para hacer un uso eficiente de una línea especializada con capacidades dedicadas. Se fabrica a una tasa constante, con un flujo automatizado e intensivo en capital. Los operarios realizan tareas relativamente simples a un ritmo determinado por la velocidad de la línea. El control del ciclo productivo está automatizado, existe alta estandarización y una elevada eficiencia en todo el proceso.

#### 4.2.4.2. Configuración en Línea Acompasada por Operarios (LAO).

Se utiliza cuando el número de productos diferentes es demasiado elevado y los volúmenes de producción demasiado variables para el sistema en línea con flujo acompasado por el equipo. En este sistema, la línea es más flexible que en el caso anterior, y puede funcionar con una variedad de velocidades. La tasa de producción depende del producto particular que se fabrique, del número de operarios asignados a la línea y de la eficacia del trabajo en equipo de los operarios. Aunque los productos sean algo diferentes, son técnicamente homogéneos, usando la misma instalación, personal y la misma secuencia de estaciones de trabajo, aunque alguno de ellos pueda no pasar por alguna que no le es necesaria. El ciclo productivo está controlado por los operarios a diferencia de la LAE donde dicho control está automatizado, esto hace que sea más flexible y versátil que el anterior.

#### **4.2.5. Configuración de Flujo Continuo<sup>16</sup>.**

Este sistema es similar al de línea en flujo acompasado por el equipo. Sin embargo, es más automatizado, más intensivo en capital y menos flexible. Cada máquina y equipo están diseñados para realizar siempre la misma operación y preparados para aceptar de forma automática el trabajo

---

<sup>16</sup> Ibíd. p. 148.

suministrado por la máquina precedente. Está diseñado para fabricar un producto o una familia limitada de productos en volúmenes muy elevados. El diseño del producto es muy estable, a menudo es un producto genérico o “commodity”. El flujo material es continuo, sincronizado e integrado a través de toda la instalación como si fuera un gran proceso tecnológico. Este rígido sistema, se basa en un proceso muy automatizado, costoso y especializado en la obtención de un producto estándar, donde la homogeneidad es total y absoluta, funcionando continuamente con mínima intervención del personal de línea. Generalmente precisa laborar las 24 horas para procurar ser un sistema costeable y eficiente.

En la realidad, se aprecian en gran número configuraciones híbridas, resultantes de combinar aspectos de las distintas configuraciones, esto es producto del proceso evolutivo natural en la gestión de la producción en una economía competitiva. Por lo general y mucho más en los tiempos actuales de alta rivalidad competitiva, las empresas tienden a presentar una combinación de procesos y configuraciones en fabricación a fin de tratar de reflejar y cubrir mejor las diversas necesidades y requerimientos de los productos que proveen y venden. Claro está, se debe prestar mucha atención a estas combinaciones de características para evitar incompatibilidades y disfunciones operativas, y debido también, al hecho de que la elección que puedan hacer está siempre limitada por la dimensión de ingeniería (el proceso deberá poder cumplir con las especificaciones del producto) y por las propias limitaciones técnicas, tecnológicas, económicas, ambientales y empresariales que restringen las posibles opciones.

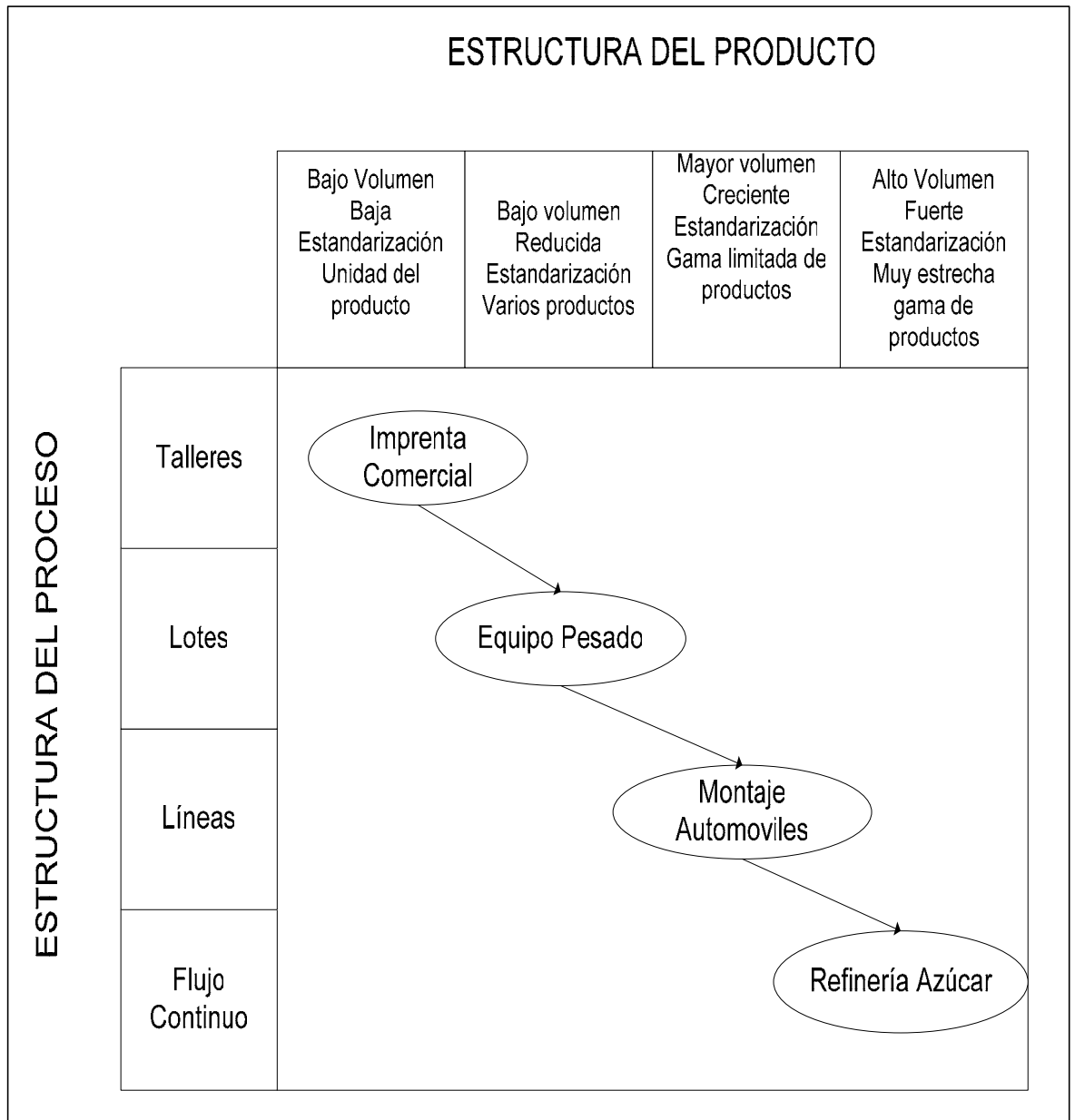
#### **4.3. MATRIZ PRODUCTO-PROCESO<sup>17</sup>**

Para HAYES, R.H, WHEELWRIGHT, S.C en 1984, la matriz producto-proceso es una representación de la interacción existente entre la estructura del

---

<sup>17</sup> DOMÍNGUEZ M, José A, Op. Cit. p. 152.

proceso productivo y la estructura del producto, que facilita la clasificación y caracterización de los sistemas productivos (ver figura 2).



**Figura 2** Matriz producto-proceso<sup>18</sup>

<sup>18</sup> DOMÍNGUEZ M, José A, Op. Cit. p. 152

Las columnas corresponden a las diferentes clases de bienes y servicios, desplazándose desde productos muy variados hasta productos altamente estandarizados. Cada empresa puede ser representada en esta matriz, ocupando aquella situación que mejor refleje la etapa en que se encuentra el producto y el proceso productivo que se haya elegido para su fabricación. Así, una imprenta comercial, en la que cada pedido reviste alguna peculiaridad y se suele emplear una configuración productiva de taller, por ser la más eficaz para atender esta variedad, se sitúa en la esquina superior izquierda. En este taller, los pedidos van llegando aleatoriamente y las operaciones a desarrollar en cada caso presentan una alta diversidad; por lo que los equipos tienden a ser de tipo universal y rara vez suele aprovecharse el cien por ciento de su capacidad. Los operarios reúnen una amplia gama de destrezas y es habitual que el tiempo requerido para concluir un pedido supere el necesario para terminar las tareas; puesto que la mayor parte del tiempo los materiales están esperando o desplazándose.

Un poco más abajo y a la derecha, se aprecia el caso de una planta de maquinaria pesada, para la cual se elige una configuración productiva de tipo lote o "batch". Aunque esta planta puede producir una variedad relativamente alta de productos (siempre hay clientes que solicitan una máquina con condiciones particulares), la búsqueda de economías de escala lleva a que se ofrezca un número limitado de versiones básicas, de las cuales se pueden conseguir un cierto número de opciones distintas. Con ello se produce un desplazamiento desde una configuración de talleres a una incipiente configuración por líneas, en la que los lotes de cada modelo van moviéndose entre las diferentes estaciones de trabajo, e incluso, a través de una línea de montaje diseñada para un bajo volumen de producción. Siguiendo la diagonal de la matriz, un poco más abajo y a la derecha pueden ubicarse, a modo de ejemplos representativos, una fábrica de automóviles o un fabricante de electrodomésticos, entidades que eligen concentrar su producción en un número muy limitado de modelos que se elaboran siguiendo un proceso

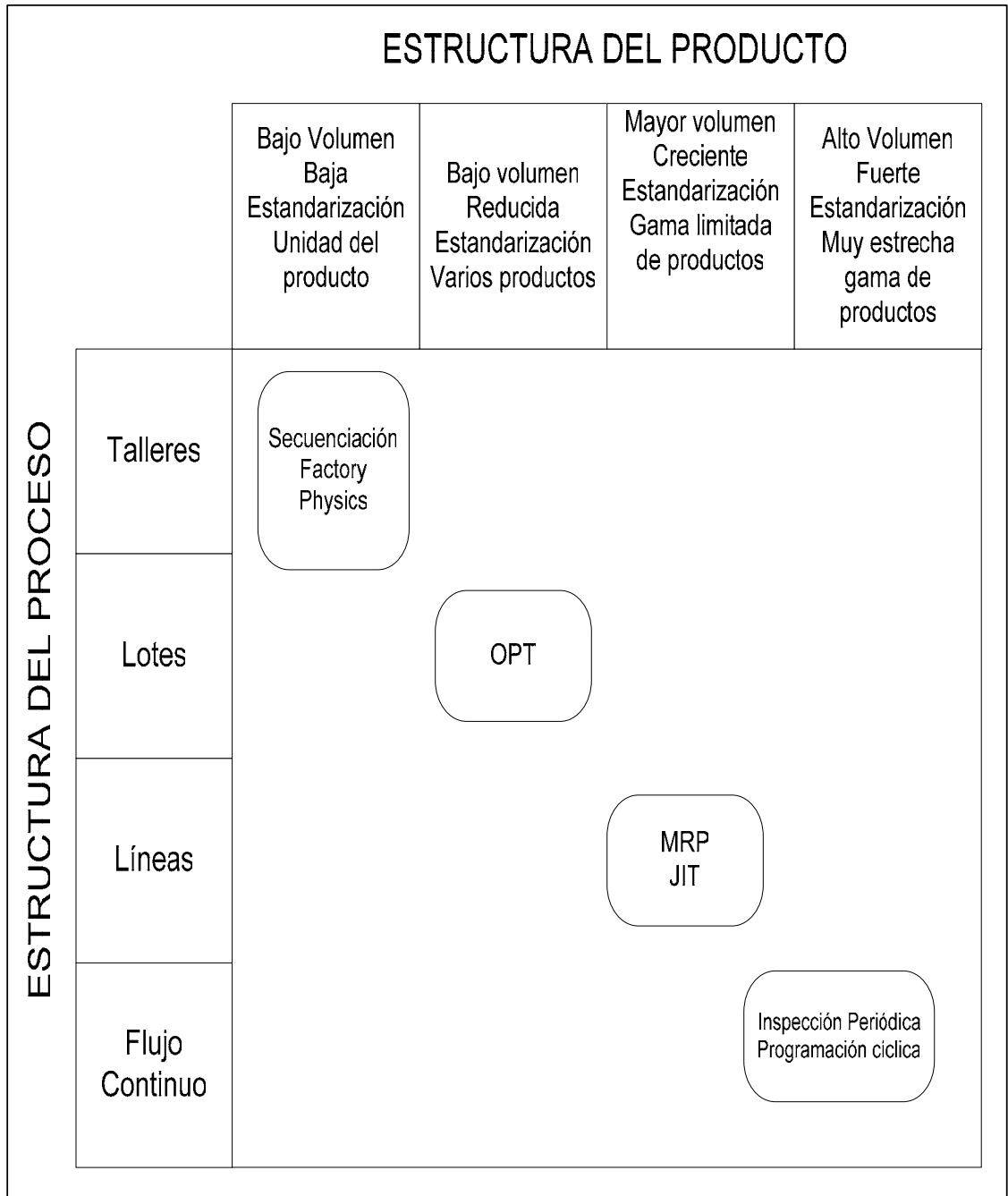
conectado y bastante mecanizado, como es la configuración productiva de líneas; esta es la mejor elección, porque este tipo de proceso ajusta las características de la etapa del ciclo de vida del producto a las economías que pueden obtenerse en virtud de un sistema automatizado y estandarizado.

En el extremo inferior derecho de la diagonal se sitúan las empresas que producen artículos altamente estandarizados, consolidados como bienes básicos y cuyo proceso es continuo. El ejemplo mostrado es una refinería: se trata de operaciones altamente especializadas, inflexibles e intensivas en capital, cuyas desventajas son más que compensadas por los bajos costes variables asociados a los altos volúmenes de producción fabricados.

Como puede apreciarse en la matriz, el nivel de utilización de los equipos alcanza los valores máximos en la esquina inferior derecha y los mínimos en la esquina superior izquierda. Este dato resulta de suma utilidad para medir la eficiencia del proceso y para la toma de decisiones sobre la configuración productiva a seleccionar.

Muchos investigadores han ahondado en la representación de los sistemas productivos a través de la matriz producto-proceso, dentro de este grupo se encuentran Silver, Pike y Peterson, quienes proponen metodologías de planeación y programación adecuadas para cada configuración productiva de acuerdo a su posición en dicha matriz y las características inherentes del sistema (ver *figura 3*).

En el *cuadro 4* se resume el enfoque principal de cada metodología o modelo de planeación y la característica fundamental que debe cumplir el proceso para poder ser abarcado con dicha metodología.



**Figura 3** Planeación y Programación de la producción y la Matriz Producto Proceso<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Adaptado de SILVER, PIKE, PETERSON Op. Cit. p. 43.

Sistema o Metodología Eje	Característica del sistema productivo	Enfoque principal del sistema
Reglas de Secuenciación; <i>Factory Physics</i> <sup>20</sup>	Bajo volumen de fabricación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidad para cubrir diferentes pedidos.</li> <li>• Cumplimiento de fechas de entregas.</li> <li>• Incrementar el rendimiento del sistema.</li> <li>• Predecir tiempos de ciclo.</li> </ul>
Tecnología de Producción Optimizada (OPT)	Producción en Lote; bajos volúmenes de ensamble	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Administración de los cuellos de botella.</li> </ul>
MRP	Mayor volumen de ensambles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coordinación efectiva de los materiales y de mano de obra.</li> </ul>
JIT	Altos volúmenes, fabricación repetitiva y ensambles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimización de tiempos de alistamientos y de niveles de inventarios.</li> <li>• Alta Calidad.</li> </ul>
Revisión periódica Programación cíclica	Procesos continuos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta utilización</li> <li>• Minimización de tiempos de alistamientos (dependientes de la secuencia)</li> </ul>

**Cuadro 4** Sistemas de planeación y programación de la producción.<sup>21</sup>

#### 4.4. PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN DETALLADA DE LA PRODUCCIÓN EN AMBIENTES GENÉRICOS DE MANUFACTURA.

Según Buffa (1972), la programación de la producción es una actividad que consiste en la fijación de planes y horarios de la producción, de acuerdo a la prioridad de la operación por realizar, determinando así su inicio y fin, para lograr el nivel más eficiente. Se considera que está conformado por tres subfunciones que son:

<sup>20</sup> *Factory Physics* es una estrategia de gerencia de manufactura, por medio de la cual se describe sistemáticamente el comportamiento fundamental de sistemas de manufactura y su variabilidad; desarrollada por Hopp y Spearman, 1994.

<sup>21</sup> SILVER, PIKE, PETERSON Op. Cit. p. 43.

**Asignación** (*Shop Loading*): Es la asignación de carga de trabajo a un medio de producción, este medio puede ser personas, equipos o grupos de trabajo.

**Secuenciación** (*Sequencing*): Es la decisión del orden en que deben ejecutarse los diferentes trabajos. Es la parte más compleja de la programación, ya que en la práctica es difícil determinar previamente para todas las operaciones a realizar en un taller una secuencia u orden estrictamente definidas de ejecución. Tiene como objetivo minimizar el tiempo total de producción y para su aplicación se han desarrollados algoritmos y reglas de decisión.

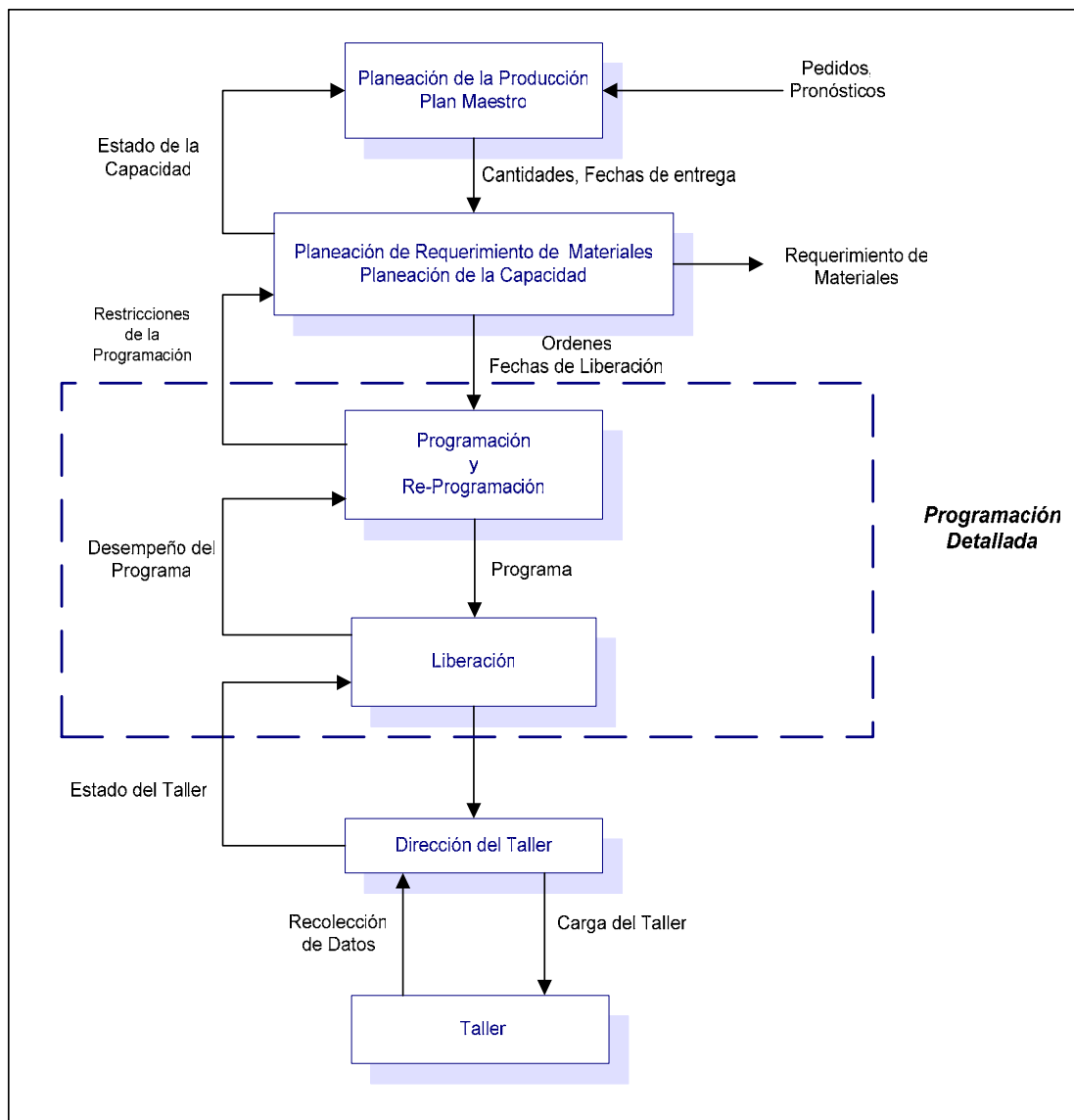
**Temporización o Programación Detallada** (*Scheduling*): Es la definición de las fechas de inicio y terminación de cada orden de producción por las distintas operaciones.

El interés de esta investigación se centra en las dos últimas subfunciones de la programación de la producción: La secuenciación y la temporización (*scheduling*) para el caso de sistemas de manufactura intermitentes, haciendo énfasis en el caso del taller de trabajo (*Job Shop*).

Al considerar un ambiente genérico de manufactura, se puede observar el papel de la programación detallada de actividades (*scheduling*). Las órdenes de trabajo son liberadas para ser traducidas en trabajos con su fecha de entrega asociada. Estos trabajos deben ser procesados en máquinas de un centro de trabajo en un orden o secuencia dada. El procesamiento de los trabajos puede verse retrasado si ciertas máquinas están ocupadas, y se pueden interrumpir si llegan trabajos de mayor prioridad. Daños de máquinas, o tiempos de procesamiento más largo de los esperados deben ser tomados en cuenta debido al impacto de estos hechos en la programación. Es así que desarrollando una programación detallada de las tareas a realizar ayuda a mantener la eficiencia y control de las operaciones.

El taller de trabajo no es la única área de la organización que debe ser analizada en el proceso de programación, ésta además se ve afectada por la

planeación de la producción, que hace referencia a la planeación de mediano a largo plazo para toda la organización. Las decisiones tomadas en un nivel de planeación más alto, pueden impactar el proceso de programación directamente como se ha expuesto en el apartado 4.1. En la *figura 4* se describe como es el flujo de información en un sistema de manufactura genérico.



**Figura 4** Flujo de información en un sistema de manufactura.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Tomado de PINEDO, Michael. Scheduling: Theory, Algorithms and System. 2 ed. New York: Prentice Hall, 2002, p. 5.

#### 4.5. SISTEMA DE MANUFACTURA INTERMITENTE

Dentro de un contexto de manufactura, los sistemas intermitentes se conocen de manera tradicional como *talleres*. Un taller es una organización funcional cuyos departamentos se organizan alrededor de ciertos tipos de máquinas u operaciones<sup>23</sup>. A medida que llegan las órdenes de trabajo, se incrementa la carga de trabajo en la instalación. Algunos centros de trabajo pueden permanecer ociosos, mientras que otros pueden estar bastante sobrecargados. Un centro de trabajo puede tener una gran cantidad de pedidos por procesar. Cuando se ha completado una orden de trabajo, el equipo debe ser reacomodado o ajustado antes de que la orden siguiente pueda procesarse. El reto que se le presenta al taller es administrar estos flujos de órdenes.

En sistemas de producción de alto volumen, el tiempo no utilizado de la instalación y los excesivos inventarios en proceso pueden controlarse con el uso apropiado de técnicas de equilibrio de la línea de montaje. Sin embargo, en un taller, cada orden es diferente, y cada trabajo puede ser único. El sistema debe verificar la existencia de materiales y herramientas antes de enviar una orden a los departamentos<sup>24</sup>. Debe establecer hechos importantes o fechas de vencimiento, para medir el progreso contra las fechas necesarias y tiempos de entrega para cada trabajo. Debe verificar el trabajo en proceso a medida que éste avanza por el taller, y debe proporcionar retroalimentación sobre las actividades de la planta y de la producción. El sistema debe proporcionar también estadísticas de eficiencia del trabajo y captar los tiempos del operador.

La producción por pedidos o “make to order” es la base del sistema de producción intermitente. Aunque la planificación detallada tiene como finalidad establecer las cantidades que deben fabricarse por periodo para cada producto, este procedimiento no es suficiente en el caso de un sistema de

---

<sup>23</sup> Tomado de CHASE, AQUILANO, JACOBS. Administración de Producción y Operaciones: Manufactura y Servicios. 8 ed. Bogotá: Mc Graw-Hill Interamericana S.A, 2000, p. 680

<sup>24</sup> DOMÍNGUEZ M, José A. Op. Cit. p.144.

producción intermitente, por que cada pedido tiene su propia secuencia de producción, su tiempo de ejecución, su cantidad por producir y sus demoras de entrega. Por tal motivo es necesaria una etapa: la referente a la distribución (asignación de los trabajos a máquinas y empleados) y al seguimiento de cada pedido en el transcurso del proceso de fabricación. Esta etapa se conoce como *programación de los pedidos*.

La secuencia en la que se deben de procesarse los trabajos pendientes es importante en la determinación de la eficiencia y en la eficacia del sistema intermitente. La secuencia determina la magnitud del retraso en los trabajos, los costos incurridos en la puesta en marcha o setups y el grado de congestión en las instalaciones. Es un hecho que la programación de sistemas intermitentes presenta un reto para los gerentes de operaciones.

#### **4.5.1. Características Del Sistema De Producción Intermitente**

Las principales características de este tipo de sistema de producción son<sup>25</sup>:

- Bajo volumen de producción por producto.
- Gran diversidad de los productos por fabricar.
- Reagrupamiento de máquinas similares por taller.
- Alto grado de especialización de la mano de obra.
- Desigualdad en la distribución de los trabajos en los diferentes talleres, máquinas o empleados.
- Baja tasa de utilización de ciertas máquinas.
- Flexibilidad de la producción.
- Falta frecuente de materias primas.
- Posibilidad de fabricar ciertos productos estándar durante los periodos de baja demanda.

---

<sup>25</sup> Tomado de TAWFIK L., CHAUVEL A. Administración de la Producción. México: Mc Graw-Hill Interamericana S.A, 1992, p. 222.

#### 4.5.2. Etapas de la Programación

Según Tawfik L., Chauvel A (1992) la programación de los sistemas de manufactura comprende el siguiente conjunto de actividades: distribución de los trabajos, elaboración de las requisiciones de material y de las órdenes, lanzamiento de los trabajos, control y reactivación de los trabajos críticos (atrasados):

- **Análisis de los trabajos:** Para el caso de un producto estándar esta etapa es sencilla, puesto que se trata solamente de precisar los recursos materiales y humanos necesarios para la fabricación del pedido. Para un nuevo producto, el análisis de los planes, presupuestos y la evaluación del tiempo de fabricación, así como de los recursos materiales y humanos exige una mayor investigación, aunque la tarea se puede verse facilitada por una buena organización de la información y el empleo de personas que tengan experiencias en trabajos de estimación.
- **Coordinación y distribución de los trabajos:** En la etapa anterior se responde, para el caso de cada pedido, a la pregunta: ¿Quién hace qué y dónde? Se trata ahora de establecer la secuencia de los trabajos ya asignados a las máquinas y al personal. A primera vista ello parece una operación sencilla, pero se cambia de idea si se trata encontrar la secuencia que reduce al mínimo el tiempo total de fabricación. La mayoría de las empresas pequeñas y medianas establecen para resolver el problema reglas de prioridad tales como “primera llegada, primer servicio” o “primero los pedidos pequeños”, etc. Sin embargo esta forma de proceder no permite descubrir la secuencia que reduzca el tiempo total de fabricación. Para encontrar una respuesta satisfactoria a esta pregunta existen técnicas de optimización que se adaptan a ciertas situaciones, y las cuales son objeto de estudio más adelante.

- Establecimiento del calendario: Una vez se ha establecido la secuencia de la realización, debe elaborarse el calendario en función de los recursos disponibles. En esta etapa la gráfica de Gantt constituye la principal herramienta de trabajo, ya que con esta se puede rastrear el avance de las operaciones para cada máquina, empleado, división o pedido. Además de ser una herramienta de planificación, esta gráfica constituye una herramienta de control.
- Lanzamiento de los trabajos: En esta etapa se hace la preparación de las materias primas y de las herramientas necesarias para la realización de los trabajos según el calendario establecido, las requisiciones de material y las órdenes de trabajo.
- Control y suma: Al final de cada periodo o jornada de trabajo se debe registrar en un diagrama Gantt el avance de los trabajos para cada máquina, empleado, taller o pedido. Estos trabajos se comparan con las previsiones. No es necesaria ninguna modificación al calendario si todas las operaciones se desarrollan tal y como se prevé. Por el contrario, si han ocurrido detenciones (daños de máquinas, ausentismo, etc.) el encargado de programación debe modificar el calendario en consecuencia.
- Reactivación de los trabajos: Esta etapa consiste en acelerar los trabajos que se encuentran atrasados respecto de la fecha de terminación establecida o debido a que el cliente desea obtener su pedido antes de la fecha convenida. En los dos casos debe modificarse el calendario de los trabajos, o recurrirse a la contratación de tiempo suplementario.

#### 4.6. EL PROBLEMA DE SCHEDULING<sup>26</sup>

Se define un problema de *scheduling*, como el proceso de asignar *recursos* a *actividades* a lo largo del tiempo o, alternativamente, la determinación de cuando las operaciones o acciones que componen un plan deben ser realizadas y hacer uso de dichos recursos. Adicionalmente, hay que garantizar que los tiempos asignados a dichas acciones deben cumplir con una serie de restricciones establecidas en el plan, así como con una optimización de determinados criterios<sup>27</sup>. De esta forma, *scheduling* está directamente asociado con la ejecutabilidad y optimalidad de un plan preestablecido. Los recursos y las tareas pueden tomar varias formas:

- Los recursos pueden ser máquinas en un taller, pistas de aterrizaje en un aeropuerto, unidades de procesamiento de un sistema operativo, etc.
- Las tareas pueden ser operaciones de un proceso de producción, llegadas y salidas en un aeropuerto, etapas en la construcción de un edificio, ejecuciones de programas de computadora, etc.

El proceso de *scheduling* es particularmente importante en el campo de la producción y de la gestión de operaciones, y así su terminología más relevante deriva de esta fuente como por ejemplo *trabajos*, *recursos* o *actividades*. En un sistema de manufactura, las órdenes tienen que ser liberadas y traducidas a tareas con fechas específicas. De esta forma el **scheduling** detallado de las tareas es desarrollado, en un sistema de producción, con el propósito de mantener la eficiencia y el control de las operaciones.

---

<sup>26</sup> Adaptado de ALFONSO GALIPIENSO, María I. Un modelo de integración de técnicas de *CLAUSURA* y *CSP* de restricciones temporales: Aplicación a problemas de Scheduling. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Alicante: 2001. pp.32-37.

<sup>27</sup> *Ibíd* ALFONSO GALIPIENSO. p.32.

#### 4.6.1. Conceptos Básicos de Scheduling.

En general, en un problema de *scheduling* intervienen los siguientes elementos:

- Trabajos.
- Actividades o tareas.
- Máquinas.
- Tipo de *scheduling*.
- Objetivos.

Cualquier problema de *scheduling* consta de uno o más **trabajos**. Un trabajo es el término usado para designar un único elemento o una serie de elementos que tienen que ser procesados en los distintos recursos. Normalmente se identifica con un producto a entregar que tiene que alcanzar una cierta calidad. Los trabajos, en la mayoría de los casos, tienen restringido su tiempo de comienzo (***release time***: tiempo a partir del cual puede comenzar la ejecución del trabajo), y su tiempo de terminación (***due time***: tiempo máximo permitido para finalizar la ejecución del trabajo). Si se trata de fabricación por lotes se necesita conocer, además, el número de unidades a fabricar de ese lote.

Cada trabajo, a su vez está compuesto de una o más **actividades, operaciones o tareas**. Se denomina actividad al procesamiento de un trabajo particular sobre un recurso particular, y por lo tanto, constituyen las unidades elementales de procesamiento. Las actividades pertenecientes a un mismo trabajo guardan un orden de precedencia conocido a priori (*restricciones de precedencia, secuencia o tecnológicas*), que debe respetarse, pudiendo haber variaciones en cuanto a posibles solapes entre las actividades de un mismo trabajo, o estar separadas por intervalos de tiempo amplios. El tiempo de procesamiento de cada actividad o duración puede ser fijo o variable en un intervalo. Además, en un problema de *scheduling* puede haber actividades de distintos tipos, que condicionan su procesamiento en un determinado tipo de

máquina. A lo largo de esta investigación se utiliza los términos actividad u operación indistintamente.

Cada actividad se procesa (o es consumida) por una **máquina** (o recurso. Normalmente se asume que una máquina únicamente puede realizar una actividad o tarea a la vez, es decir no hay solapamiento entre actividades que se procesan en una misma máquina, lo cual da lugar a las llamadas *restricciones de interferencia o de capacidad*. A lo largo del trabajo se utiliza indistintamente los términos máquina, recurso, o centro de trabajo.

Es importante conocer el **tipo de scheduling** que se quiere realizar, lo cual define el patrón de flujo del problema, o lo que es lo mismo, la secuencia de utilización de las máquinas por parte de las actividades, en caso de que se trate de un problema de *scheduling* puro.

Finalmente, dependiendo de los **objetivos** perseguidos por el usuario, se puede distinguir los siguientes conceptos:

- *Factibilidad*, relativo a la satisfacción del conjunto de restricciones preestablecidas en un determinado plan. Estas restricciones pueden, típicamente, corresponder a la secuencia de las acciones, capacidad de los recursos y duración o requerimientos de uso de los recursos.
- *Optimalidad*, relativo a la optimización de una o varias funciones objetivo, dependientes del entorno de aplicación o del criterio del usuario. Cuando se persigue la optimalidad, la complejidad de los algoritmos de resolución aumenta, debido a la mayor dificultad del proceso de búsqueda asociado. Uno de los criterios de optimización más comunes, es la minimización del máximo tiempo de finalización del *scheduling* (*makespan*).

Los elementos básicos presentados hasta el momento pueden representarse como un conjunto de restricciones formado por:

- Duración de las actividades ("*La actividad X tiene una duración de Y unidades de tiempo*").
- Restricciones de precedencia para las actividades de cada trabajo ("*El trabajo  $J_i$  está formado por la siguiente sucesión de actividades: primero la actividad R, después la S,...*").
- Restricciones de inicio y terminación para cada trabajo ("*El trabajo  $J_i$  tiene que comenzar a partir del momento V, y terminar antes del momento U*").
- Restricciones de capacidad sobre el uso de recursos ("*La actividad X se ejecuta antes o después de la actividad Y, puesto que ambas utilizan la misma máquina*").

#### **4.6.2. Tipología de problemas de Scheduling.**

Se pueden hacer muchas clasificaciones de los problemas de *scheduling*. Por ejemplo, se pueden caracterizar en función de parámetros como: determinismo frente a estocasticidad (duraciones de las tareas fijas o probabilísticas); requerimientos de tiempo real (restricciones de tiempo real estricto frente a procesos *off-line*); presencia de restricciones sobre los recursos; objetivos del *scheduling* (minimizar el *makespan*, el coste,...); requerimientos de optimalidad frente a satisfactibilidad; etc. Independientemente de los parámetros mencionados, existen dos grandes familias de *scheduling* según los grados de libertad en cuanto a la demanda de recursos en un cierto tiempo y el suministro de dichos recursos:

- Problemas de *scheduling* "puros"
- Problemas de asignación de recursos

En los problemas de **scheduling “puros”**, la capacidad de cada recurso está definida sobre un cierto número de intervalos temporales y el problema consiste en cubrir las demandas de recursos de las actividades a lo largo del tiempo, sin exceder sus capacidades disponibles. En este tipo de problemas se conoce con anterioridad qué recurso va a utilizar exactamente cada una de las actividades.

Además, se puede imponer la restricción adicional de que cada una de las actividades pueda interrumpirse y ser continuada más tarde, después de que el recurso le vuelva a ser asignado. En este caso estaremos hablando de *scheduling con interrupción (preemptive scheduling)*. Si la ejecución de cada actividad tiene que realizarse en su totalidad antes de abandonar el recurso asignado, estaremos ante un tipo de *scheduling* denominado sin interrupción (*non-preemptive scheduling*).

En un problema de *scheduling* pueden existir restricciones adicionales a las tecnológicas y de capacidad, comentadas anteriormente. Por ejemplo, una máquina no tiene por qué procesar todas las tareas de forma ininterrumpida, puede que necesite periodos de mantenimiento o descanso, o incluso periodos de actualización entre dos actividades de distinto tipo (en caso de máquinas que pueden realizar varios tipos de operaciones). En cualquier caso, se trata de restricciones temporales, y que afectarán básicamente a la secuencialidad de las acciones en las distintas máquinas.

Con respecto a los objetivos del proceso de *scheduling*, además de minimizar el *makespan*, pueden ser interesantes otros como:

- Minimización del costo total de realización del *scheduling*
- Minimización del tiempo total de procesamiento para cada trabajo.
- Terminación de los trabajos lo más pronto posible.
- Minimización del máximo retraso en la finalización de los trabajos.

El conjunto de todas las restricciones del problema, incluyendo las derivadas de los objetivos que se persiguen, definen el *espacio o vecindario de soluciones* admisibles.

La *fabricación de lotes*, constituye un caso especial de *job-shop scheduling*. Se trata de fabricar un cierto número de productos, cada uno de los cuales tiene una secuencia diferente de paso por las máquinas. Éstas son utilizadas en el desarrollo de una o varias operaciones de las rutas de algunos de los productos. Además, para cada uno de ellos, la obtención de un lote puede diferir notablemente en términos de materiales necesarios, tiempos de procesamiento en cada máquina, necesidades de preparación, etc.

En los problemas de **asignación de recursos**, disponemos de un conjunto de operaciones, y para cada una de ellas se dispone de un conjunto de recursos idénticos (realizan el mismo tipo de operación), pero no equivalentes (pueden requerir distintos tiempos o costes de procesamiento), que pueden ser utilizados. En este caso, no conocemos a priori qué recurso concreto va a utilizar cada operación, sino que el problema va a consistir en asignar los recursos a tiempo para garantizar que se cumplen todas las demandas.

El tamaño de un problema de *scheduling* varía desde un número reducido de actividades a miles de ellas. Otras características numéricas importantes varían de un entorno a otro. Por ejemplo, la variación de la duración de las operaciones de fabricación depende de los productos a fabricar, y la importancia de los recursos que representan, “cuellos de botella”, varía con la carga global de la fábrica.

Dependiendo del entorno, el tiempo requerido para obtener una respuesta a un problema de *scheduling* varía de unos pocos microsegundos a varios días. Además, puede ser necesario modificar incrementalmente el *scheduling* (*scheduling dinámico*), debido a cambios en el entorno, o porque así se facilita la toma de decisiones. En el caso de entornos dinámicos, existe la dificultad

adicional de que no se conocen a priori todas las restricciones del problema, lo cual exige un proceso de *rescheduling* cuando aparecen restricciones que invalidan el *schedule (programa)* ya obtenido. Este tipo de *scheduling* se conoce también con el nombre de *on-line scheduling*.

#### **4.6.3. Patrones de Flujo**

Un patrón de flujo determina la secuencia de uso de las operaciones para cada máquina. Puesto que cada máquina solamente puede procesar una operación cada vez, un patrón de flujo vendrá representado por un conjunto de restricciones tecnológicas para cada máquina.

Dependiendo del uso de los recursos por parte de las actividades, se pueden distinguir cuatro *patrones de flujo fundamentales*:

##### **4.6.3.1. Open-Shop:**

No existe ninguna restricción en cuanto al orden de uso de los recursos por las actividades de cada uno de los trabajos.

##### **4.6.3.2. Job-Shop:**

Cada trabajo, o conjunto de actividades, debe usar los recursos en un orden determinado (*restricciones tecnológicas*). " $N$ " trabajos deben ser procesados, una sola vez, por " $M$ " recursos, con un orden, y durante un tiempo dado.

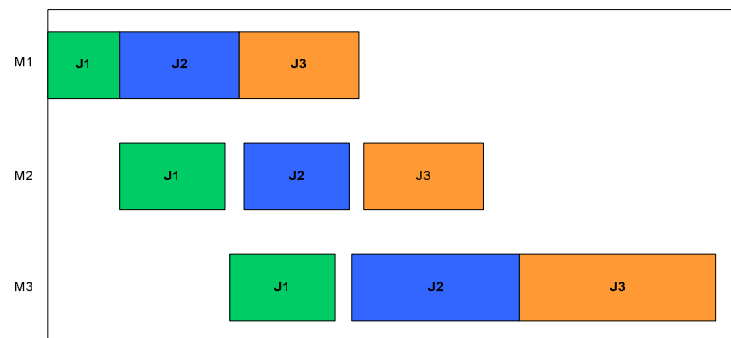
##### **4.6.3.3. Flow-Shop:**

Todos los trabajos utilizan los recursos en el mismo orden. Es un caso particular del job-shop.

##### **4.6.3.4. Permutation Flow-Shop:**

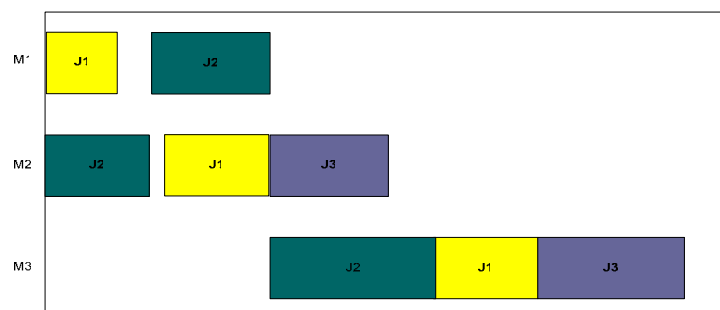
Todos los trabajos utilizan los recursos en el mismo orden. Todos los recursos procesan los trabajos en el mismo orden. Es un caso particular del flow-shop.

Los patrones de flujo más utilizados son los llamados *flow-shop* y *job-shop*. En el caso de **flowshop** todos los trabajos utilizan los recursos en el mismo orden. Si se supone que se tienen tres trabajos  $J_1$ ,  $J_2$ , y  $J_3$ , (ver *figura 5*) formados por la secuencia de operaciones:  $J_1 = (o_{11}, o_{12}, o_{13})$ ,  $J_2 = (o_{21}, o_{22}, o_{23})$ ,  $J_3 = (o_{31}, o_{32}, o_{33})$ . Se dispone de tres máquinas:  $m_1, m_2, m_3$ . Cada uno de los trabajos utiliza las máquinas en el orden  $(m_1, m_2, m_3)$ .



**Figura 5** Diagrama de Gantt de un Flow Shop 3 X 3

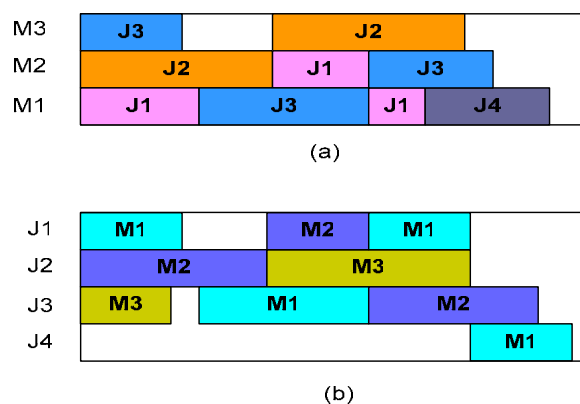
Si el patrón de flujo es **job-shop**, entonces cada trabajo puede tener una secuencia de paso por las máquinas distinta. En la *figura 6* aparecen representados tres trabajos:  $J_1 = (o_{11}, o_{12}, o_{13})$ ,  $J_2 = (o_{21}, o_{22}, o_{23})$ ,  $J_3 = (o_{32}, o_{33})$ , y tres máquinas  $(m_1, m_2, m_3)$ . La secuencia de uso de los trabajos es: para  $J_1$ :  $(m_1, m_2, m_3)$ , para  $J_2$ :  $(m_2, m_1, m_3)$ , y para  $J_3$ :  $(m_2, m_3)$ .



**Figura 6** Diagrama de Gantt de un Job Shop 3 X 3

#### 4.6.4. Conceptos Avanzados Sobre Scheduling

Suponga que  $m$  máquinas  $M_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) tienen que procesar  $n$  trabajos  $J_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Un programa es aquel en el que se determinan los instantes de inicio y terminación para cada trabajo en cada máquina. Los programas pueden ser representados por medio de diagramas de Gantt. Los diagramas de Gantt pueden ser de dos tipos, orientados hacia los trabajos u orientados a las máquinas o recursos (ver figura 7). Un trabajo  $J_i$  consiste en un número  $n_i$  de actividades, tareas u operaciones  $O_{i1}, \dots, O_{i, n_i}$ . Toda tarea  $O_{ij}$  tiene asociado un tiempo de procesamiento  $p_{ij}$ . Si el trabajo  $J_i$  consiste en una sola tarea u operación ( $n_i = 1$ ), entonces se identifica  $J_i$  con  $O_{i1}$  y se denota su tiempo de procesamiento como  $p_i$ . Además en todo problema de scheduling es necesario fijar el **release date**  $r_i$  o el tiempo de comienzo, en el cual la primera tarea u operación de  $J_i$  esta disponible para procesarse. El **due date** y **deadline**  $d_i$ , representan la fecha en que el trabajo debe ser completado. La terminación de una tarea después de la fecha comprometida  $d_i$  se permite solo mediante una penalización. Cuando la fecha comprometida no puede ser violada se dice que se trata de un deadline. El **peso o ponderación**  $w_i$ , de un trabajo  $J_i$  es básicamente un factor de prioridad, denotando la importancia del trabajo  $J_i$  en relación con las otras trabajos en el sistema. Por ejemplo, este peso puede representar el costo real de mantener la tarea en el sistema (por ejemplo, un costo de mantenimiento en el sistema o de inventario).



**Figura 7** (a) Diagrama Gantt orientado a trabajos  
(b) Diagrama Gantt orientado a máquinas

Un problema de Scheduling se describe generalmente por la siguiente tripleta<sup>28</sup>:

$$\alpha / \beta / \gamma$$

El atributo ( $\alpha$ ) es un simple atributo que describe el ambiente de la máquina, y es posible que tome los siguientes valores de acuerdo al tipo de problema:

**1: Una máquina:** Este es el caso más simple de todos los ambientes posibles de máquinas y es un caso especial de todos los otros ambientes de máquinas más complicado.

**$P_m$ : Máquinas paralelas idénticas:** Hay  $m$  máquinas idénticas en paralelo. Los trabajos  $J_i$  requieren una operación simple que pueden ser procesados sobre cualquiera de las  $m$  máquinas o sobre una cualquiera de un subconjunto dado  $M$ . Si no se permite que un trabajo  $J_i$  sea procesado por ninguna máquina que no pertenezca a  $M$ , entonces la designación  $M_i$  aparece en el campo  $\beta$ .

**$Q_m$ : Máquinas en paralelo con diferentes velocidades. Ambiente Uniforme:** Hay  $m$  máquinas con diferentes velocidades  $v_j$ . El tiempo de procesamiento  $p_{ij}$  del trabajo  $J_i$  que se gasta sobre la máquina  $M_j$  es (suponiendo que este es procesado únicamente sobre la máquina  $M_j$ ), igual a  $p_i / v_j$ . Si todas las máquinas tienen la misma velocidad, se obtiene un ambiente tipo  $P_m$ .

**$F_m$ : Flow Shop:** Hay  $m$  máquinas idénticas en serie. Cada trabajo tiene que ser procesado sobre cada una de las  $m$  máquinas.

---

<sup>28</sup>Adaptado de BRUCKER, Peter. Scheduling Algorithms. 4 ed. Berlin: Springer, 1-7 p.

Todos los trabajos tienen el mismo ruteo o secuencia, es decir, tienen que ser procesados primero sobre la máquina 1, luego sobre la máquina 2, etc. Después de que un trabajo se ha completado su parte sobre una máquina, el trabajo, pasa a formar parte de una línea de espera sobre la máquina 2. Es muy común que todas las líneas de espera tengan una disciplina FIFO (first input first output). Si FIFO es la disciplina de la línea de espera, se dice que se tiene un **permutation flow shop** (*flow shop de permutación*) y el campo  $\beta$  incluye una entrada prima ( $F_m^?$ ).

**FF<sub>s</sub>: Flow Shop Flexible:** Un flow shop flexible, es una generalización del flow shop y los ambientes de máquinas paralelas. En lugar de  $m$  máquinas en serie hay  $s$  etapas en serie con un número de máquinas en paralelo en cada etapa. Cada trabajo tiene que ser procesado primero en la etapa 1, luego en la etapa 2,..etc. Se puede concebir un banco de máquinas paralelas en cada etapa y por lo general cualquier máquina puede procesar cualquier tarea. Las líneas de espera entre las diferentes etapas por lo general operan de manera FIFO.

**O<sub>m</sub>: Open Shop:** Hay  $m$  máquinas. Cada trabajo puede ser procesado nuevamente sobre cada una de las  $m$  máquinas. Algunos de los tiempos de reprocesamiento pueden ser cero. No hay restricciones con relación al ruteo de cada trabajo a través el ambiente de máquinas.

Al encargado de la programación se le permite determinar la ruta para cada trabajo diferente, de forma que diferentes trabajos pueden tener rutas diferentes.

**J<sub>m</sub>: Job Shop:** Hay  $m$  máquinas. Cada trabajo tiene su propia ruta a seguir. Se pueden tener dos tipos de Job Shop:

- Job Shop sin recirculación: Cada trabajo no puede visitar a una máquina más de una vez.
- Job Shop con recirculación: Cada trabajo puede visitar a una máquina más de una vez.

En el último caso, el campo  $\beta$  contiene la expresión **recrc**.

La designación  $\beta$ , abarca varios atributos que proporcionan información sobre las características del procesamiento y restricciones del trabajo.

**$r_i$ : Fechas de Liberación:** Si  $r_i$  aparece en el campo  $\beta$ , el trabajo  $J_i$  no requiere iniciar su procesamiento antes de su fecha de liberación  $r_i$ . Si  $r_i$  no aparece en el campo  $\beta$ , el procesamiento del trabajo  $J_i$  puede iniciar en cualquier tiempo. En contraste, a las fechas de liberación, las fechas comprometidas  $d_i$  no son especificadas en este campo. El tipo de función objetivo da suficiente indicación sobre si hay fechas comprometidas o no.

**$S_{ik}$ : Tiempos preparación (setup) dependientes de la secuencia:** El  $S_{ik}$  representa el tiempo de preparación por la dependencia de secuencia que puede existir entre los trabajos  $J_i$  y  $J_k$ .  $S_{0k}$  denota el tiempo de preparación para el trabajo  $J_k$ , si el trabajo  $J_k$  está primero en la secuencia.  $S_{i0}$  denota el tiempo de terminación del trabajo  $J_i$  si el trabajo  $J_i$  está al final de la secuencia.  $S_{0k}$  y  $S_{i0}$  pueden ser cero.  $S_{ijk}$  denota que los setups entre los trabajos  $J_i$  y  $J_k$  depende de la máquina  $M_j$ . Si en el campo  $\beta$  no aparece  $S_{ik}$ , significa que todos los setup son cero ó independientes de la secuencia, en cuyo caso estos tiempos serán agregados simplemente a los tiempos de procesamiento.

**prmp: Interrupciones (preemption):** Las interrupciones implican que no necesariamente se mantiene un trabajo sobre una

máquina hasta su terminación. Al encargado de la programación se le permite, interrumpir el procesamiento de un trabajo de este tipo en cualquier momento y poner un trabajo diferente sobre una máquina. Cuando un trabajo con estas condiciones es puesto al final de la línea de espera de la máquina (u otra máquina en caso de máquinas en paralelo), este únicamente necesita el tiempo de procesamiento remanente. Cuando se efectúan interrupciones el termino ***prmp*** se incluye en el campo  $\beta$ . Cuando no se efectúan estas, ***prmp*** no se incluye en el campo  $\beta$ .

**prec: Restricciones de precedencia:** Restricciones de precedencia pueden aparecer en una máquina o en ambientes paralelos. Las restricciones de precedencia se refieren a que existen uno o más trabajos que deben ser efectuados antes de que se empiece el procesamiento de otro. Cuando cada trabajo tiene solo un predecesor y un sucesor las restricciones se denominan con frecuencia cadenas. Sí cada trabajo tiene al menos un sucesor se dice que las restricciones están "intree". Sí cada trabajo tiene al menos un predecesor se dice que las restricciones están "outtree". Cuando en el campo  $\beta$  no aparece el termino ***prec*** significa que los trabajos no están sujetos a restricciones de precedencia.

**brkdwn: (Breakdown)** Las máquinas no están continuamente disponibles. Los períodos en que una máquina no está disponible son, a menudo debido a cuestiones de mantenimiento. Sí hay un número de máquinas idénticas en paralelo, el número de máquinas disponible en cualquier momento es una función del tiempo que se designa por ***m(t)***.

**$M_i$ : Restricciones de elegibilidad de máquinas.**  **$M_i$**  se usa en el campo  $\beta$  cuando se trata de ***m*** máquinas en paralelo ( **$P_m$** ).

Cuando  $M_i$  está presente, no todas las  $m$  máquinas son capaces de procesar el trabajo  $J_i$ . El conjunto  $M_i$  denota el conjunto de todas las máquinas que pueden procesar el trabajo  $J_i$ . Sí en el campo  $\beta$  no aparece  $M_i$ , el trabajo  $J_i$  puede ser procesado por cualquiera de las máquinas  $m$ .

**Prmu: Permutación.** Una restricción que puede aparecer en el ambiente flow shop es el de las líneas de espera en frente de cada máquina, la cual opera por lo general con disciplina FIFO. Esto significa que el orden (permutación) en el cual los trabajos entran a la primera máquina es mantenida a través del sistema.

**recrc: Recirculación.** La Recirculación puede ocurrir en *job shops*, cuando un trabajo puede visitar una máquina más de una vez.

Cualquier otro atributo que aparezca en el campo  $\beta$  se explica por si mismo. Por ejemplo  $p_i = p$  significa que todos los tiempos de procesamiento son iguales y  $d_i = d$  significa que todas las fechas comprometidas son iguales.

El atributo ( $\gamma$ ) hace referencia al objetivo a ser minimizado o criterio de optimización en el problema de scheduling dado, para el entendimiento de este campo es necesario considerar previamente los siguientes aspectos:

- La función objetivo siempre es una función del tiempo de terminación de los trabajos, los cuales, dependen de la asignación.
- $C_{ij}$ : Tiempo de terminación de la operación del trabajo  $J_i$  sobre la máquina  $M_j$ .
- $C_i$ : Tiempo en que el trabajo  $J_i$  sale del sistema.
- $w_i$ : Peso o ponderación del trabajo  $J_i$ .
- $d_i$ : Representa la fecha en que el trabajo  $J_i$  debe ser completado.

- $U_i$ : Define una unidad de penalización para el trabajo  $J_i$ , toma el valor de uno si  $C_i > d_i$  y de cero para los demás casos.
- $L_i$ : **Lateness** (retraso) del trabajo  $J_i$ .
- El *Lateness* del trabajo  $J_i$ , se define como:

$$L_i = C_i - d_i.$$

El cual es positivo cuando el trabajo  $J_i$  es terminado tarde y negativo cuando es terminado temprano.

- El **Tardiness** (tardanza) de un trabajo  $J_i$  se define como:

$$T_i = \text{Max}(C_i - d_i, 0) = \text{Max}(L_i, 0).$$

- La diferencia entre el lateness y el tardiness está ligada al hecho de que el tardiness nunca es negativo.

Conociendo los aspectos anteriores respecto a la terminación de los trabajos en un ambiente típico de scheduling, es posible identificar algunas funciones objetivo (a minimizar) que tradicionalmente son de interés.

### 1. **Makespan: $C_{\max}$**

El makespan se define como:

$$C_{\max} = \text{Max}(C_1, C_2, \dots, C_n)$$

El makespan es equivalente al tiempo de terminación de la última tarea para dejar el sistema. Un makespan mínimo por lo general implica una alta utilización de las máquinas.

### 2. **Máximo retraso: $L_{\max}$**

El máximo retraso se define como:

$$L_{\max} = \text{Max}(L_1, L_2, \dots, L_n)$$

El máximo retraso mide la peor violación de las fechas comprometidas.

### 3. **Tiempo De Terminación Ponderada Total:** $\sum w_i C_i$

La suma de los tiempos de terminación de los  $n$  trabajos dan una indicación de los costos totales incurridos por el programa. La suma de los tiempos de terminación frecuentemente se le llama flujos de tiempo en la literatura, mientras que la ponderación de estos tiempos se conoce como tiempo de flujo ponderado.

### 4. **Retraso Total Ponderado:** $\sum w_i L_i$

Esta es también una función de costo más general que el tiempo de terminación total ponderada. En donde se penaliza el hecho que un trabajo se finalice tarde.

### 5. **Número Ponderado de Trabajos Tardíos:** $\sum w_i U_i$

El número de trabajos tardíos ponderados no solo es una medida de interés académico, esta es frecuentemente un objetivo en la práctica que puede ser recordado y aplicado muy fácilmente.

## 4.7. EL PROBLEMA DE LA SECUENCIACIÓN

La secuenciación de trabajos forma parte del proceso de control en un sistema de fabricación y es necesaria cuando un conjunto común de recursos debe ser compartido para fabricar una serie de productos durante el mismo período de tiempo. El objetivo de la secuenciación, es la asignación eficiente de máquinas y otros recursos a los trabajos, o a las operaciones contenidas en éstos, y la determinación del orden en el cual cada uno de estos trabajos debe ser procesado.

Uno de los métodos más utilizados para resolver el problema de secuenciación es el empleo de reglas de prioridad, ver *cuadro 5*.

<p style="text-align: center;"><b>MINPRT (minimum processing time/tiempo de procesamiento mínimo)</b></p> <p>Para esta regla, la tarea que tiene el tiempo de procesamiento más corto en esa máquina es la que se selecciona. Esta regla se basa en la idea de que cuando se termina con rapidez un trabajo, otras máquinas más adelante recibirán el trabajo, dando como resultado una alta velocidad de flujo y una alta utilización.</p>
<p style="text-align: center;"><b>MINSOP (minimum slack time per operation / mínima holgura por operación)</b></p> <p>La “holgura” se define como el tiempo que falta para la fecha de entrega menos el tiempo de procesamiento que también hace falta para terminar el producto. Es decir que una tarea con una holgura de cero tendría solo el tiempo suficiente para terminarse.</p>
<p style="text-align: center;"><b>FCFS (first come, first served / primero en llegar primero en atender)</b></p> <p>El primer trabajo que llega a un centro de trabajo se procesa primero. Esta regla se basa en la “imparcialidad” para todos los trabajos que esperan en el mismo centro de trabajo y es probablemente la regla más común empleada en el campo de la prestación de servicios.</p>
<p style="text-align: center;"><b>MINDS (minimum planned start date / fecha de inicio planeada mínima)</b></p> <p>En esta regla se utilizan los resultados del programa anterior para determinar la fecha de inicio planeada para cada tarea. Se procesa primero el trabajo que tiene la fecha de inicio más corta planeada.</p>
<p style="text-align: center;"><b>MINDD (minimum due date / fecha de entrega mínima)</b></p> <p>Según esta regla, el trabajo que tiene la fecha de entrega más temprana es el que se procesa primero.</p>
<p style="text-align: center;"><b>RANDOM (selección aleatoria)</b></p> <p>En esta regla se selecciona el siguiente trabajo que se va a procesar al azar. Esta regla por lo general no se usa en la práctica, se trata simplemente de una comparación con otras reglas.</p>

**Cuadro 5** Principales reglas de prioridad para la secuenciación de actividades<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Adaptado de SCHOROEDER Roger G. Administración de Operaciones. Ciudad de México: Fuentes Impresores S.A ,1993. p. 403

Hasta la fecha, muchos investigadores han intentado evaluar el comportamiento de las reglas de secuenciación en los sistemas de fabricación, pudiéndose concluir, a partir de estos estudios que el comportamiento de estas reglas depende del criterio elegido, del objetivo deseado, de la configuración del sistema y de las condiciones de éste (carga global del sistema, equilibrio de las cargas en las distintas máquinas, fechas de entrega, etc.).

#### **4.8. EL ARTE DEL MODELAMIENTO**

La resolución de problemas técnicos y de análisis relacionados con sistemas en general en el mundo real suele atacarse por medio de la elaboración y manipulación de modelos de dichos sistemas. Pero ¿qué es un modelo? Un modelo es una representación de una realidad compleja. Modelar es desarrollar una descripción lo más exacta posible de un sistema y de las actividades llevadas a cabo en él<sup>30</sup>. La modelización permite realizar variedad de estudios y experiencias sin necesidad de construir los ambientes físicos que modelan, permitiendo a su vez detectar fallas y errores en los diseños. En otros casos permiten evitar los riesgos de experimentos, y analizar su comportamiento y resultados de forma más económica. Como puede verse en la *figura 8*, estos métodos permiten elaborar soluciones que se prueban en los modelos estudiados para posteriormente ser implementados en un entorno real dado.

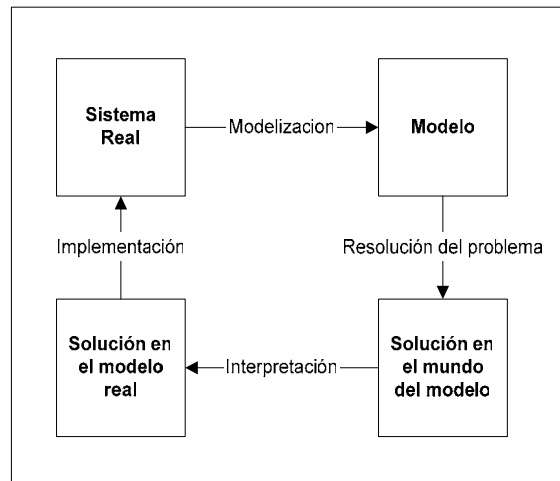
En la actualidad, los métodos de resolución de problemas de sistemas reales complejos pueden repartirse en dos grandes clases: la de métodos analíticos y la de métodos basados en simulación.

Los métodos analíticos permiten establecer soluciones generales a partir de las cuales se deducen soluciones particulares por afectación de valores a las

---

<sup>30</sup> Adaptado de TAHA Hamdy. Investigación de Operaciones. 5 ed. México, D.F: Alfaomega S.A, 1995. pp. 2-3.

variables de las expresiones simbólicas producidas. En muchos casos la utilización de estos métodos presenta restricciones, principalmente a causa de la complejidad de los sistemas a modelar. Por ende, su aplicación implica simplificar el modelo del sistema a tal nivel, que las soluciones obtenidas son difícilmente interpretables o aplicables en el mundo real.



**Figura 8** Fases de la Modelización<sup>31</sup>

Frente a tal situación, los métodos basados en simulación ofrecen una alternativa. Estos métodos, aunque no pueden proveer soluciones generales, permiten encontrar soluciones particulares aplicables al sistema real (por lo tanto, si el problema puede resolverse de forma satisfactoria por un método analítico, el uso de simulación no se justifica). En el *cuadro 6* se describen las ventajas y desventajas de los dos métodos.

Según el interés e intención, los modelos se pueden clasificar en prescriptivos y descriptivos. Los primeros pretenden tomar decisiones sobre el sistema; se utilizan cuando se desea responder y optimizar una cuestión acerca del sistema, tratan de dar la mejor solución. Los segundos se limitan a describir el

<sup>31</sup> Disponible en <URL <http://www.dc.uba.ar/people/proyinv/celldevs/espanol/informacion.html>> Recuperado el 12 Noviembre de 2004.

comportamiento del sistema y dejan la totalidad del proceso de optimización en manos del analista.

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Analíticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conciso en la descripción del problema.</li> <li>• Conjunto de soluciones reducido.</li> <li>• Permiten evaluar fácilmente el impacto producido por cambios en las entradas sobre las medidas de salida.</li> <li>• Posibilidad de llegar a una solución óptima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las suposiciones hechas para describir el sistema pueden ser poco realistas.</li> <li>• Las fórmulas matemáticas pueden ser muy complicadas impidiendo llegar a una solución.</li> </ul>
<b>Simulación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden describir sistemas que sean muy complejos.</li> <li>• Pueden ser usados para experimentar con sistemas que todavía no existan, o para experimentar con sistemas existentes sin que éstos se alteren. (Esto también los pueden hacer los métodos analíticos siempre y cuando el sistema no sea muy complejo).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe un conjunto de soluciones cerrado.</li> <li>• Cada cambio en las variables de entrada requiere una solución separada o conjunto de ejecuciones.</li> <li>• Los modelos de simulación complejos pueden requerir mucho tiempo para construirlos y ejecutarlos.</li> <li>• Puede resultar difícil establecer la validez del modelo es decir, la correspondencia con el sistema real).</li> </ul>

**Cuadro 6** Ventajas y desventajas de los modelos analíticos y de simulación.

#### **4.9. OPTIMIZACIÓN Y SOLUCIÓN DE UN MODELO DE UN PROBLEMA COMBINATORIO**

La Optimización se divide en dos grandes áreas, la Programación Matemática y la Programación Heurística, la primera trata sobre problemas reales que se pueden resolver de una forma matemática, en las cuales se tiene como

preocupación principal la optimización de un recurso escaso, es decir, se puede plantear con una fórmula matemática el problema en cuestión y tener resultados exactos. En cambio, la segunda trata sobre problemas que no poseen una formulación matemática, sino que son tratados de una forma probabilística, y los resultados obtenidos no son exactos, si no más bien son los mejores resultados que se pudieron arrojar luego de haber aplicado algún algoritmo para resolverlos.

#### **4.9.1. Programación Matemática**

Existen varios tipos de programación matemática, entre estos están: Programación Lineal (PL: *Linear Programming*), No Lineal (PNL: *Non-Linear Programming*), Entera (PE: *Integer Programming*) y Mixta (PEM: *Mixed Integer Programming*). La Programación Lineal es una de las técnicas más importantes de la Investigación Operacional. La desventaja de la Programación Lineal, es que en el mundo real, la suposición de linealidad, generalmente, no se cumple; sin embargo esta asunción permite que cualquier modelo sea mucho más fácil de solucionar. Además PL garantiza la existencia de un algoritmo que converge y, cuando se encuentra una solución óptima, existen propiedades que así lo demuestran. Cuando en un modelo aparecen relaciones no-lineales, se obtiene un modelo de Programación No-Lineal, que generalmente son más complejos de solucionar. Los problemas en los que las variables son enteras se llaman problemas de *Programación Entera*; si solo es necesario que una de las variables sea entera, el modelo se conoce como uno de Programación Mixta, estos problemas son también más difíciles de solucionar que uno de PL.

La Programación Entera, a diferencia de la Programación Lineal no tiene un procedimiento que converja hacia una solución y los requerimientos

computacionales de tiempo y de capacidad de procesamiento para hallar una solución óptima en muchos casos son excesivos<sup>32</sup>.

Por desgracia, pese a los adelantos impresionantes en la representación por modelos matemáticos, un número apreciable de situaciones reales sigue estando fuera del alcance de las técnicas matemáticas de que se dispone en presente. Por un motivo, el sistema real puede tener demasiadas relaciones, variables, para hacer posible una representación matemática “adecuada”. En otro sentido, aun cuando se pueda formular un modelo matemático, éste puede ser demasiado complejo para resolverse a través de métodos de solución disponibles.

#### **4.9.2. Aproximación Heurística**

En el mundo real de la industria es común encontrar docenas de detalles específicos y políticas de la planta que son difíciles, para no decir imposibles, de incluirlos en los modelos matemáticos. La realidad es más compleja y detallada que los modelos matemáticos, por estos últimos se ven forzados a incluir fuertes simplificaciones. Del exceso de simplificaciones o asunciones lejanas de la realidad a menudo resultan programas óptimos pero no factibles en la práctica, por lo cual para que un programa de producción sea liberado al taller se deben hacer gran número de cambios debido a las limitaciones del modelo usado.

El problema de scheduling y el de la secuenciación pueden considerarse de una alta complejidad. De hecho una rama de las ciencias matemáticas llamada

---

<sup>32</sup> Tomado de NIÑO, M. Modelamiento a través de la programación lineal entera mixta del problema de programación de operaciones en el taller de trabajo. En Revista de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Vol. 2, No. 1 (2003). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p.13.

“Análisis o Teoría de la Complejidad Computacional<sup>33</sup>”, brinda un marco formal para evaluar que tan complejos son este tipo de problemas. Los problemas matemáticos, de manera general, se pueden clasificar en las dos siguientes categorías:

- Problemas Clase P: Son problemas que se pueden resolver por algoritmos que implican tiempos de procesamiento computacionales que crecen, de forma polinomial, en función del tamaño del problema.
- Problemas NP-duros: Son problemas de los cuales no se conoce una algoritmo polinomial, y por lo tanto el tiempo para encontrar la solución, crece de manera exponencial de acuerdo al tamaño del problema. Aunque esto no ha sido definitivamente comprobado, hasta el momento eminentes matemáticos lo han intentado, pero sin llegar a una solución satisfactoria, todos han fracasados. En el presente, la evidencia predominante indica que es imposible encontrar algoritmos eficientes y computacionalmente manejables (polinomiales) para esta clase de problema.

Tácitamente se puede afirmar que, los problemas clase P son fáciles, mientras los problemas NP-duros son difíciles. Además, algunos problemas NP-duros parecen más difíciles que otros. Algunos algoritmos eficientes han sido probados empíricamente obteniendo buenas soluciones aproximadas. Otros problemas NP-duros, incluyendo problemas de secuenciación y scheduling, a menudo son difíciles de solucionar con métodos de aproximación, aun con algoritmos eficientes.

Considérese un problema de secuenciación en una máquina con tres trabajos. ¿Cuántas formas hay de secuenciar los tres trabajos? La respuesta es sencilla, el número de secuencias o permutaciones posibles son  $3! = 6$ . Si se desea

---

<sup>33</sup> Tomado de GLENN Brookshear J. *Teoría de la Computación* Lenguajes formales, autómatas y complejidad: Edit Addison-Wesley Iberoamericana, S.A 1993 pp. 247-291.

determinar la secuencia que maximice o minimice cierto criterio de interés, sencillamente se evalúan las seis alternativas y se escoge la mejor. Pero la función factorial exhibe un crecimiento exponencial, por lo tanto el número de posibilidades que deben ser evaluadas, y el tiempo necesario para hacerlo y encontrar una solución óptima, crece con esta misma tendencia, en función del tamaño del problema. Por ejemplo si se necesitan secuenciar cuatro trabajos, las posibles alternativas son  $4! = 24$ , para cinco trabajos  $5! = 120$ , para seis trabajos  $6! = 720$ . A medida que aumenten los trabajos se llegan a una cantidad de alternativas exagerada:  $10! = 3.628.800$ ,  $13! = 6.227.20.800$  y

$$25! = 15.511.210.043.330.985.984.000.000$$

La mayoría de los problemas de scheduling y secuenciación en el mundo real caen dentro de la categoría de problemas NP-duros y con tendencia a incrementarse dicha dificultad, estos problemas envuelven por lo general cientos de trabajos y decenas de máquinas. La totalidad de la literatura expresa la imposibilidad de resolver este tipo de problemas para ambientes reales, no llegando así a una solución óptima sino a aproximaciones. La palabra imposible no es una exageración, el siguiente fragmento lo demuestra.

*“Un computador con tantos bits como protones hay en el universo, corriendo a la velocidad de la luz, durante la edad del universo, podría no tener el tiempo suficiente para resolver esta clase de problemas”<sup>34</sup>*

Afortunadamente, las consecuencias en la práctica no son lo suficientemente severas, solo porque no se pueda encontrar la mejor solución, no quiere decir que no se pueda hallar una buena. De alguna forma la naturaleza no polinómica del problema podría ayudar, dado que se presentan tantas

---

<sup>34</sup> Tomado de HOPP, Wallace J. y SPEARMAN, Mark L. Factory Physics. New York: McGraw-Hill, 2001. p 496.

alternativas, muchas de estas deberán ser buenos candidatos para una solución cercana a la óptima. Por lo general para este tipo de problema se aplican algoritmos de aproximación, llamados **heurísticas**<sup>35</sup>, que presentan un desempeño polinomial en la búsqueda de una de estas soluciones.

Los algoritmos de aproximación se pueden clasificar en dos tipos principales: *algoritmos constructivos* y *algoritmos de búsqueda local*<sup>36</sup>. Los primeros se basan en generar soluciones desde cero añadiendo componentes a cada solución paso a paso. Un ejemplo bien conocido son las *heurísticas de construcción voraz* o *heurísticas greedy*. Su gran ventaja es la velocidad, normalmente son muy rápidas y, además, a menudo devuelven soluciones razonablemente buenas. Sin embargo, no puede garantizarse que dichas soluciones sean óptimas con respecto a pequeños cambios a nivel local. En consecuencia, una mejora típica es refinar la solución obtenida por la heurística voraz utilizando una búsqueda local. Los algoritmos de búsqueda local intentan repetidamente mejorar la solución actual con movimientos a soluciones vecinas (vecindario) con la esperanza de que sean mejores. El caso más simple son los algoritmos de mejora iterativos: si en el vecindario de la solución actual  $s$  se encuentra una solución mejor  $s'$ , ésta reemplaza la solución actual y se continúa la búsqueda a partir de  $s'$ ; si no se encuentra una solución mejor en el vecindario, el algoritmo termina en un óptimo local. Desafortunadamente, los algoritmos de mejora iterativos pueden estancarse en soluciones de baja calidad (óptimos locales muy lejanos al óptimo global). Para permitir una mejora adicional en la calidad de las soluciones, la investigación en este campo en las últimas dos décadas ha centrado su atención en el diseño de técnicas de propósito general para guiar la construcción de soluciones o la búsqueda local en las distintas heurísticas. Estas técnicas se llaman comúnmente

---

<sup>35</sup> **Heurística**: Este término se deriva de la palabra griega *heuriskein* que significa encontrar o descubrir.

<sup>36</sup> Tomado de MARTÍ Rafael. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Valencia.2002 p.4.

**metaheurísticas** y consisten en conceptos generales empleados para definir métodos heurísticos.

Dicho de otra manera, una metaheurística puede verse como un marco de trabajo general referido a algoritmos, que puede aplicarse a diversos problemas de optimización combinatoria con pocos cambios significativos si ya existe previamente algún método heurístico específico para el problema. De hecho, las metaheurísticas son ampliamente reconocidas como una de las mejores aproximaciones para atacar los problemas de optimización combinatoria.

Las metaheurísticas incorporan conceptos de muchos y diversos campos como la genética, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas, la física y la neurología, entre otras. Algunos ejemplos de metaheurísticas son: *Recocido Simulado (SA)*, *búsqueda tabú (TS)*, *búsqueda local iterativa* (“*iterated local search*”), *algoritmos de búsqueda local con vecindario variable* (“*variable neighborhood search*”), GRASP (“*greedy randomized adaptative search procedures*”) y *algoritmos evolutivos*. Una metaheurística relativamente reciente es la *Optimización basada en Colonias de Hormigas* (“*Ant Colony Optimization*”, ACO en inglés), la cual se inspira en el comportamiento que rige a las hormigas de diversas especies para encontrar los caminos más cortos entre las fuentes de comida y el hormiguero.

#### 4.9.2.1. Heurísticas basadas en Cuellos de Botella.

Un ejemplo de este tipo de aproximaciones heurísticas es el *Shifting Bottleneck Procedure (SBP)*, propuesto por Adams, Balas and Zawack (1988), que es considerado uno de los métodos heurísticos más poderosos para resolver problemas de scheduling en ambientes job shop<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> YAMADA T. Studies on Metaheuristics for Jobshop and Flowshop Scheduling Problems. Tesis Doctoral. Universidad de Kyoto. Japón: 2003, p. 18.

Un *SBP* se caracteriza por las siguientes tareas<sup>38</sup>:

- Identificación del subproblema.
- Elección del cuello de botella.
- Solución del subproblema.
- Reoptimización del *scheduling*.

La estrategia real implica simplificar el problema de *scheduling*, en *m* problemas de una máquina y resolver cada subproblema cada vez de forma iterativa. Cada una de las soluciones se compara con las demás y se ordenan las máquinas según su solución. La máquina no secuenciada que tiene la solución mayor se identifica como la máquina que provoca el cuello de botella. *SPB* secuencia dicha máquina basándose en las que ya han sido calculadas, ignorando el resto de máquinas no secuenciadas. La selección de la máquina que constituye el cuello de botella viene motivada por la conjetura de que el *scheduling* en etapas posteriores puede deteriorar el tiempo de realización del *scheduling*. Cada vez que una máquina se identifica como de cuello de botella, todas las máquinas que ya han sido secuenciadas, y que son susceptibles de mejoras, se reoptimizan localmente resolviendo el problema de una máquina de nuevo. La principal contribución de esta aproximación es la forma en que se usa la simplificación de una máquina para decidir el orden en el que las máquinas deben ser secuenciadas.

#### 4.9.2.2. Recocido Simulado<sup>39</sup>

Desde que Kirkpatrick, Gelatt Y Vecchi (1983) introdujeron hace ya más de 20 años el concepto de Recocido Simulado, esta metaheurística ha demostrado

---

<sup>38</sup> ALFONSO GALIPIENSO. Op. Cit. p.60.

<sup>39</sup> Adaptado de DOWSLAND K, DIAZ B. Diseño de Heurísticas y Fundamentos del Recocido Simulado. En Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. No 20 (2001). Universidad de Oviedo. pp. 34-52.

ser una herramienta muy exitosa para resolver una amplia gama de problemas de optimización combinatoria. La denominación del algoritmo, Recocido Simulado, o *Simulated Annealing* en inglés, proviene de la estrecha analogía que guarda con el proceso del recocido tal y como se usa en metalurgia. Éste consiste en que un metal fundido se va enfriando lentamente de manera que sus moléculas van adoptando poco a poco una configuración de mínima energía. Cuando comienza el proceso, a alta temperatura, las moléculas vibran y se desplazan caóticamente adoptando todo tipo de configuraciones en la estructura del metal de la que forman parte. A medida que la temperatura disminuye se va disminuyendo el movimiento de las moléculas y estas, de acuerdo con la termodinámica, tienden a adoptar paulatinamente las configuraciones de menor energía, siendo ésta nula en el cero absoluto. Durante sus vibraciones en la red metálica las moléculas pueden saltar de una configuración a otra con una probabilidad que es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional a la diferencia de energías entre las configuraciones inicial y final y que viene dada por la distribución de Boltzmann:

$$p = e^{-\left(\frac{E_F - E_I}{kT}\right)}$$

El número  $k$  es la conocida constante de Boltzmann. En los problemas de optimización, carece de significado y se le da convencionalmente el valor de uno. El método consiste en ir recorriendo de forma aleatoria el espacio de configuraciones para seleccionar aquel punto de dicho espacio en el que alcance su valor óptimo una determinada función de coste (o de *energía*), que asume el papel de función objetivo que se pretende minimizar. El *cuadro 7* muestra las analogías entre proceso de las moléculas de una sustancia que van colocándose en los diferentes niveles energéticos buscando un equilibrio, y las soluciones visitadas por un procedimiento de búsqueda local.

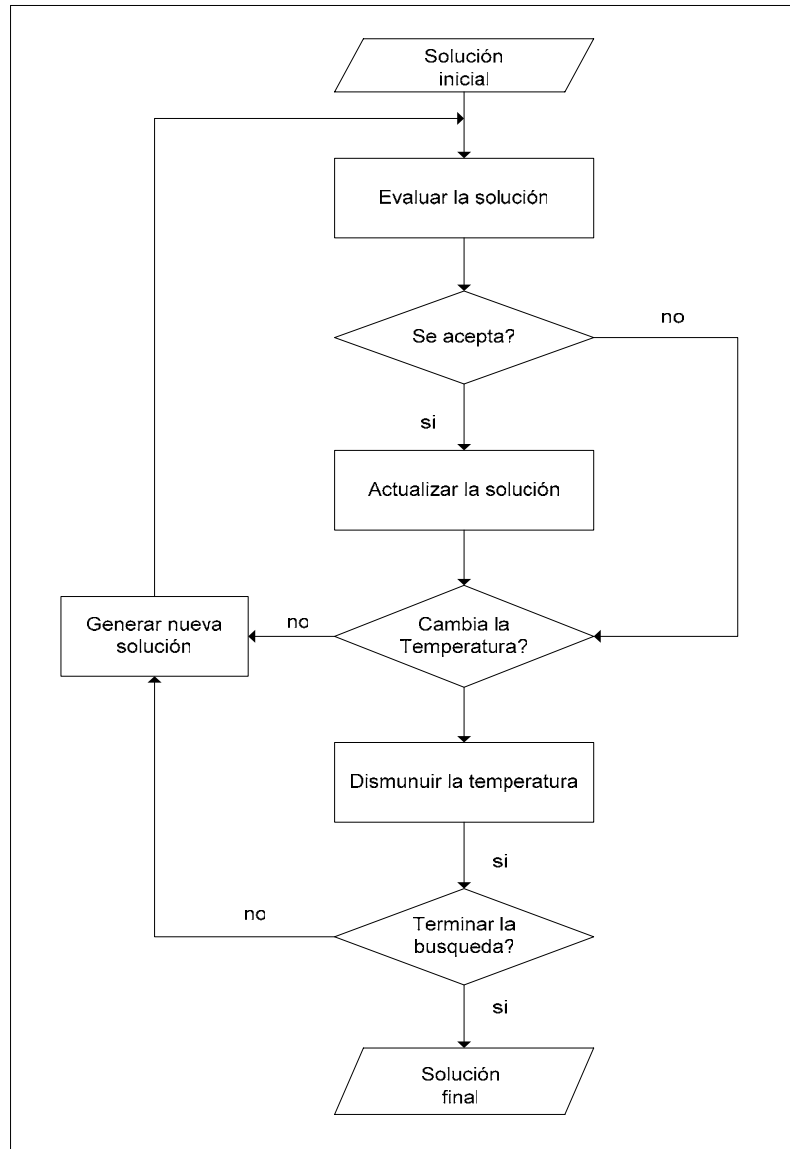
Simulación termodinámica	Optimización combinatoria
Estados del sistema	Soluciones factibles
Energía	Costo
Cambio de Estado	Soluciones en el vecindario
Temperatura	Parámetro de control
Estado de equilibrio	Solución heurística

**Cuadro 7** Paralelo del proceso termodinámico de recocido con la optimización combinatoria<sup>40</sup>

Sin embargo la esencia del Recocido Simulado, y lo que lo distingue de una mera búsqueda aleatoria, es la regla que utiliza para ir saltando de una configuración a otra. Este paso de un punto a otro del espacio de configuraciones se hará siempre, es decir, con probabilidad igual uno, cuando el nuevo punto suponga un menor valor de la función a optimizar. Cuando el nuevo punto suponga un coste, o una energía, mayor que el del inicial, la transición aún se puede llevar cabo, pero sólo con una probabilidad  $p < 1$  que viene dada de acuerdo con la ya mencionada distribución de Boltzmann de la Mecánica Estadística Clásica. Es este último aspecto, la probabilidad no nula de saltar hacia puntos de coste o energía mayores (salto sólo momentáneo, por supuesto, concebido como etapa intermedia necesaria para llegar a puntos de energía menor), hace que el método evite quedar atrapado en el vecindario de algún óptimo local. Estos movimientos de escape deben realizarse de un modo controlado mediante la distribución de probabilidad de Boltzmann, que disminuye la probabilidad de esos movimientos hacia soluciones peores conforme avanza la búsqueda. El fundamento de este control se basa en el trabajo de Metrópolis en el campo de la termodinámica estadística. Básicamente, el algoritmo de Metrópolis modela el proceso de recocido mencionado anteriormente simulando los cambios energéticos en un sistema de partículas conforme decrece la temperatura, hasta que converge a un

<sup>40</sup> Ibíd. p. 35.

estado estable (congelado). La *figura 9* muestra el algoritmo general del Recocido Simulado.



**Figura 9** Diagrama de flujo de algoritmo de Recocido Simulado Estándar.<sup>41</sup>

Este algoritmo no debe ser visto como una técnica completamente estandarizada, lista para ser aplicada de forma directa e invariable a cualquier problema, sino que, debido al gran número de parámetros configurables que

<sup>41</sup> Adaptado de PATHN, D.T y KARABOGA, D. Intelligent Optimization Techniques. Gran Bretaña: Springer-Verlag, 2000. p. 14.

incluye, debe ser adecuadamente implementada en cada situación concreta en la que vaya a ser utilizado. Es necesario precisar aspectos como los siguientes:

- **La secuencia de enfriamiento:** Son las temperaturas inicial y final (la primera lógicamente más elevada que la segunda) y las sucesivas temperaturas recorridas para llegar de una a otra. Una temperatura inicial elevada facilita la exploración del espacio de configuraciones pues hace que casi todos los saltos de una configuración a otra sean permitidos. Idealmente la temperatura final tras el proceso de enfriamiento parece que debe ser cero, sin embargo no es necesario llegar a ese extremo, pues cuando la temperatura se haga lo suficientemente baja la probabilidad de salto a una configuración peor es virtualmente nula, con lo que el proceso queda atrapado en el mejor óptimo local conseguido hasta el momento y no se obtiene ninguna mejora en el resultado alcanzado. Por otra parte, una diferencia muy pronunciada entre la temperatura inicial y final hace que la ejecución del algoritmo sea demasiado lenta. Para lograr un equilibrio adecuado entre todos estos aspectos, no existe otra solución que recurrir al ensayo y error. También es necesario determinar cuál es la secuencia de temperaturas recorridas. Se han propuesto muchos esquemas, siendo uno de los más aceptados el de mantener cada temperatura constante durante  $L$  iteraciones o ciclos (con  $L$  parámetro a establecer en cada caso que se suele denominar *longitud de la temperatura*) y luego disminuirla multiplicándola por un factor constante  $\alpha$  (el *factor de enfriamiento*) ligeramente menor que la unidad.

- **La topología del espacio de configuraciones o soluciones vecinas:** Es preciso determinar cuáles son las variables que describen adecuadamente el espacio de soluciones y establecer la manera de ir saltando aleatoriamente de una configuración a otra de su vecindario (lo que exige precisar la noción de vecindario de una configuración). Puede ser conveniente trabajar tanto con vecindarios amplios como reducidos;

ello depende de cada problema concreto, no siendo posible dar indicaciones generales al respecto. Más sencillo resulta establecer la función que hace el papel de la energía, pues se trata en general del coste o duración que debe ser minimizado.

- **La configuración de partida:** Puede ser arbitraria u obtenida como resultado de un algoritmo previo que proporcione de forma sencilla alguna solución factible de bajo coste o energía.

**PARTE II**  
**MODELO GENERAL**  
**PROPUESTO**

En esta parte se plasma y justifica una metodología o modelo general para el desarrollo de una aplicación informática basada en el concepto de sistemas expertos, que soporte el proceso de la toma de decisiones en la planeación operativa y secuenciación de actividades para procesos de manufactura intermitentes en pequeñas empresas, teniendo en cuenta de antemano las limitaciones económicas presentes en el ambiente manufacturero colombiano.

El modelo plasmado es fruto de una amplia y profunda revisión literaria, así como de la experiencia vivida en la empresa Impresos y Empaques D'Carton LTDA. La metodología pretende generalizar el proceso de diseño, elaboración y validación de un sistema experto para empresas con procesos de manufactura intermitente. Cabe anotar que los aspectos tratados no son los únicos que deben ser tenidos en cuenta para la elaboración de una herramienta de este tipo, solo fijan un camino a seguir, que debe ser adaptado a las condiciones de cada ambiente organizacional, enriqueciendo y fortaleciendo el proceso por medio de características particulares y aspectos propios en la toma de decisiones respecto a la planeación operativa y secuenciación de actividades.

## **5. ETAPAS DEL MODELO PROPUESTO**

La *figura 10*, presenta las diferentes etapas propuestas y la manera en que cada una de estas se relaciona con las demás.

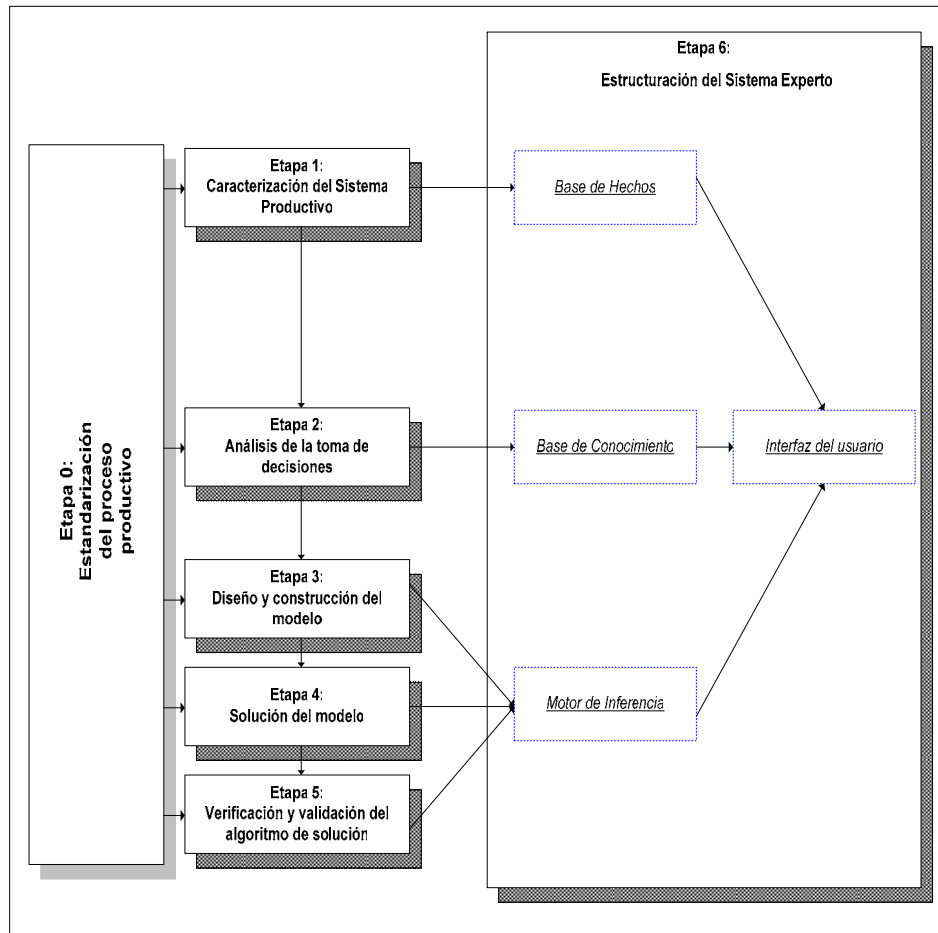


Figura 10 Etapas del modelo para la secuenciación de actividades

### 5.1. ETAPA 0: ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO.

Esta etapa es una condición necesaria para la aplicación de los siguientes pasos propuestos, ya que si las operaciones no cuentan con un método fijo y fácilmente referenciado en elementos productivos y de preparación, es imposible poder determinar a ciencia cierta el tiempo consumido por una actividad.

Según Niebel B. W (1990), la estandarización del proceso productivo comprende el diseño, la formulación y la selección de los mejores métodos, procesos, herramientas, equipos diversos y especialidades necesarias para manufacturar un producto.

El mejor método debe compaginarse con las mejores técnicas y recursos disponibles. Una vez se establece un método, la responsabilidad de determinar el tiempo requerido para fabricar el producto queda dentro del alcance de este punto haciendo posible la programación de las actividades productivas en un horizonte de tiempo.

La medición de los tiempos, debe ser compatible con las necesidades de la organización y los usos específicos que se estén considerando. Uno de los resultados que se busca con la estandarización del método, es encontrar un tiempo tipo para todas las operaciones, el cual se define como la cantidad de tiempo que se requiere para ejecutar una tarea o actividad cuando un operador capacitado trabaja a un paso normal con un método preestablecido.

Es recomendable y adecuado, que se realice una medición continua del trabajo, con la cual se obtengan los tiempos de producción necesarios para la alimentación del software de programación y secuenciación de actividades y que plasmen la situación actual del taller respecto a la duración de las actividades. Las operaciones del sistema productivo deben ser divididas en elementos esenciales o suboperaciones que faciliten la determinación de la duración de las mismas, ya que para el problema en consideración, es fundamental la identificación de elementos que son de carácter productivo y cuales son de alistamiento. Para simplificar se considera que los tiempos de los elementos de alistamiento son fijos, es decir que no dependen de las unidades a procesar, y se pueden llevar a cabo sin que el material este disponible en el centro de trabajo en consideración.

Al contar con tiempos tipos establecidos con anterioridad y métodos estándares que garanticen un adecuado funcionamiento del sistema productivo, se está en capacidad de tener información confiable para solucionar el problema propuesto. Al final del proceso de estandarización, deben estar establecidos diagramas de flujo y proceso para las actividades de producción, manuales de procedimientos y controles sobre las mediciones, de manera que se cuente con

información que facilite la asimilación de la aplicación al sistema productivo en cuestión.

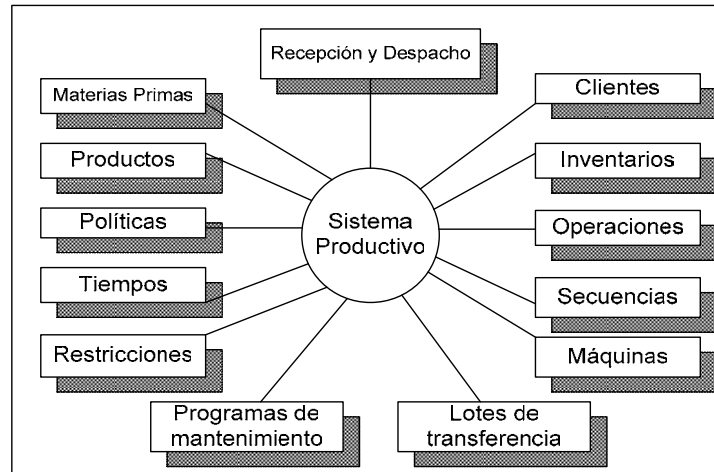
Dependiendo de las características de la empresa que desee aplicar el modelo propuesto en la presente investigación, pueden surgir muchas maneras de considerar la estandarización del proceso, por lo se debe reconocer que tipo de producto se fabrica y que requisitos debe cumplir la estandarización para alimentar de manera efectiva el software final.

## **5.2. ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA PRODUCTIVO.**

Durante esta fase se realiza una ambientación e inducción a los procesos productivos de la empresa con el fin de observar y detallar las variables claves para la posterior caracterización de dicho proceso y del problema de scheduling según la tripleta  $\alpha / \beta / \gamma$  (ver apartado 4.6.4).

Mediante entrevistas con las personas expertas y responsables en el área de producción, se determina las implicaciones y requerimientos que trae consigo el proceso, así como las variables que son tomadas en cuenta para la utilización adecuada de los recursos con el fin de satisfacer la demanda requerida.

A continuación se plantean los aspectos de mayor importancia a tener en cuenta en esta fase de identificación (ver figura 11). Además, se propone una manera para estructurar bases de datos con la información relevante de cada uno de ellos con el fin de elaborar la base de hechos del Sistema Experto.



**Figura 11** Parámetros claves de un Sistema Productivo

### 5.2.1. Productos

Antes que nada, es primordial conocer los tipos de productos que se elaboran, sus características, especificaciones y cuidados especiales. Estas características de los productos son las que determinan el proceso que es necesario seguir, para transformarlo de materias primas a bienes comerciales; por tanto, es de especial importancia conocer de ante mano como afecta cada una de estas variables en la configuración del producto y las operaciones de producción.

Es recomendable construir una base de datos de productos en donde se establezcan todos los puntos importantes a tener en cuenta a la hora de su identificación, tales como:

- Diseño
- Dimensiones
- Peso
- Códigos
- Clientes
- Referencias
- Materias primas necesarias

- Margen de desperdicio por daños
- Costo unitario de fabricación
- Etc.

En sí, se necesita mucho más para estructurar una base de datos de producto de manera completa, esto depende del tipo de producto específico que se maneja en la empresa, y a medida que el modelo va siendo aplicado, aparecen otros puntos o aspectos que deben ser incluidos.

### **5.2.2. Materias Primas**

Luego de conocer a fondo las especificaciones y características de los productos elaborados por la empresa, es preciso determinar la materia prima necesaria para su producción y las variables claves para construir una base de datos de materias primas.

Como factores relevantes se pueden enumerar los siguientes:

- Proveedor
- Precio de materia prima
- Tipo de almacenamiento
- Dimensiones
- Rotación
- Códigos asignados
- Peso
- Tiempos de entrega
- Etc.

Además de las materias primas principales, debe existir en la base de datos, información sobre insumos secundarios, necesarios para la obtención de los productos; estos insumos secundarios pueden ser por ejemplo: pegantes,

tintas, soluciones, barnices, plásticos, etc. Al igual que las materias primas principales se requiere estudiar las características de cada uno de estos insumos y las políticas de manejo de los mismos.

### **5.2.3. Inventarios**

Para que la aplicación informática resultante del modelo propuesto, en la presente investigación funcione, es apropiado tener una base de datos de inventarios en donde se enumeren las diferentes materias primas y la cantidad existente en bodega, esto con el fin de poder programar las operaciones de producción con base en los datos extraídos de la misma.

El proceso de recopilación de la información puede ser largo y tedioso si la empresa no cuenta con registros de entradas y salidas de materias primas, lo ideal sería implementar un sistema de bodega en tiempo real, con el fin de contar con datos precisos y actuales.

### **5.2.4. Operaciones**

Antes de definir la secuencia para cada una de las referencias o productos fabricados por la empresa, deben establecerse diagramas y cuadros en donde se de a conocer cada una de las operaciones con sus respectivos elementos.

Esta labor es sencilla siempre y cuando exista facilidad de observar el proceso productivo y el mismo este estandarizado. De lo contrario se hace necesario estudiar los procesos más detalladamente con el fin de dividir las operaciones en elementos y así poder realizar un estudio de tiempos para alimentar el software.

Establecer las operaciones de producción es fundamental para el desarrollo de la aplicación, debido a que se quiere llegar a una secuenciación y

programación de actividades, la cual depende en gran parte de esta información.

En cuanto a la base de datos de operaciones la siguiente información puede ser relevante para la aplicación:

- Código operaciones
- Operaciones predecesoras
- Operaciones siguientes
- Tipo de operación (Preparación o Producción)

#### **5.2.5. Secuencia**

La secuencia es la ruta que siguen cada uno de los productos una vez la orden de producción es emitida, esta información es esencial para poder programar las actividades dentro de un ambiente de manufactura intermitente. Dado esto se aconseja construir una base de datos de la secuencia de producción de cada producto.

#### **5.2.6. Máquinas**

Es importante conocer en que máquinas se realizan cada una de las operaciones ya estudiadas, establecer las características de las mismas y especificaciones que puedan tener impacto en la aplicación final.

Es así como se hace necesario conocer los siguientes aspectos:

- Especificaciones.
- Restricciones.
- Cantidad de máquinas existentes
- Etc.

El Sistema Experto debe tener en cuenta todas estas variables, ya que impactan directamente en el proceso de secuenciación de órdenes de trabajo, para que este pueda brindar un soporte efectivo en la toma de decisiones.

### **5.2.7. Lote de Transferencia**

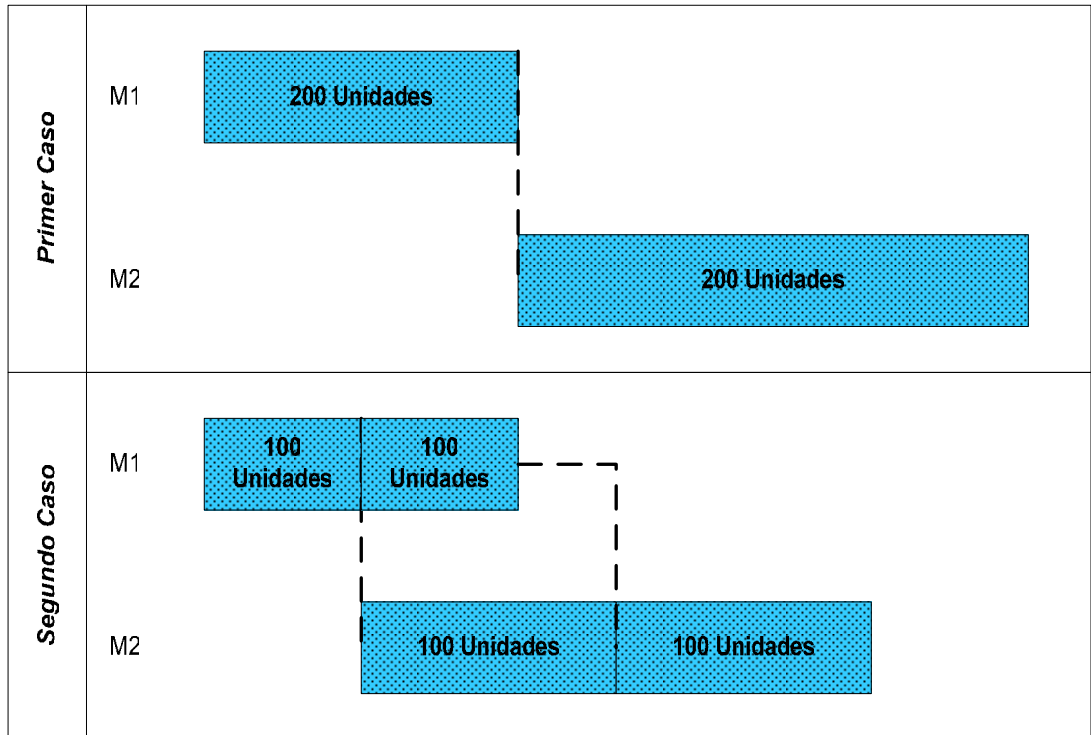
Son pocas las pequeñas empresas que han estudiado un lote de transferencia adecuado entre centros de trabajo, debido a la complejidad de este problema.

Para analizar el lote de transferencia del sistema productivo y así alimentar las bases de datos que necesita la aplicación final, no es necesario realizar un estudio del lote óptimo de transferencia, sino simplemente observar la manera que fluyen las órdenes de producción entre los centros de trabajo con el fin de simular correctamente el sistema.

Esto no quiere decir que se descarta la posibilidad de analizar el lote actual de transferencia y tratar de llegar a un óptimo que disminuya los inventarios en proceso y tiempos de producción.

Estudiar este parámetro es muy importante debido a la forma en que se van a secuenciar y programar los trabajos, ya que no es igual empezar a fabricar cierto número de productos, si el lote puede partirse a la mitad o a una tercera parte.

Considérese un sistema productivo (ver *figura 12*), en el cual se fabrican 2000 piezas de cierta referencia; en el primer caso el lote de transferencia es completo, mientras en el segundo el lote se reduce a la mitad:



**Figura 12** Diferencia entre un sistema productivo sin partición de lote y con partición del mismo

Como se observa, un lote de transferencia menor, disminuye los tiempos de producción total y al mismo tiempo los inventarios en proceso, a la vez que modifica la forma en que se programa la producción en las diferentes máquinas ya que se puede considerar fabricar por etapas el lote, pero esto a la vez incrementa los tiempos de alistamiento, por esto es necesario evaluar esta alternativas y escoger la más adecuada.

### 5.2.8. Tiempos de Producción

Una de las variables claves de entrada del Sistema Experto son los tiempos de fabricación y preparación. Se debe estructurar una base de datos de los tiempos de producción de cada operación detallando la duración de cada uno de sus elementos.

Es necesario idear una forma para mantener actualizada esta información, de lo contrario las salidas o resultados arrojados por el software sean completamente falsos.

Existen dos formas de manejar esta información, la primera y una de las más confiables es la aplicación de un formato para que los trabajadores mismos sean los encargados de digitar cuanto demoran realizando ciertas operaciones, y la segunda es una revisión periódica de los tiempos de la empresa por medio de un estudio de métodos y tiempos.

La primera opción es la más recomendada ya que se alimenta la base de datos de una manera inmediata, aumentando la confiabilidad de la información. Cabe anotar que existen discusiones con respecto a la delegación de esa responsabilidad a los operarios, algunos dicen que los mismos pueden alterar los tiempos para aparentar mejores rendimientos, pero esto se aparta del alcance del proyecto siendo un estudio de la cultura organizacional de la empresa. Aunque esto puede suceder, la gran cantidad de datos recolectados por este método suele generar un mayor nivel de confianza en los estimadores arrojados.

Además de los tiempos de producción de la empresa, se debe tener conocimiento de los tiempos de entrega por parte de la empresa y de los proveedores, esto con el fin de contar con todos los recursos necesarios para una programación completa y lo más cercana a la situación real.

Una vez analizados todos estos parámetros de tiempo se debe tener una base de datos con lo siguiente:

- Código de Operaciones.
- Código de Elementos.
- Tiempo de producción.
- Tiempo de preparación.

### **5.2.9. Políticas de Inventarios**

Es muy importante conocer el manejo de los inventarios en la empresa, tanto de materias primas y producto en proceso. La planeación operativa y secuenciación de actividades pueden verse alteradas por este tipo de políticas, ya que se transforman en restricciones para la actividad de programación de la producción. Es así como, por ejemplo, los directivos de una organización pueden establecer un máximo de producto en proceso en el piso de producción, el cual se debe tener en cuenta al momento de construir las restricciones tanto gerenciales como operativas del modelo de solución.

Además, la decisión de cuando y como enviar órdenes de compra a los proveedores debe estar totalmente definida para así contar con una herramienta de programación lo más completa y confiable posible.

Es necesario tener información sobre las existencias de materias primas en bases de datos, que además de la cantidad de estas, revele información sobre la rotación de las mismas y demás características de interés.

### **5.2.10. Recepción y Despacho**

Este punto está muy relacionado con las políticas de inventarios establecidas por la empresa mencionadas anteriormente, pero algunas veces es necesario estudiarlas de manera aislada por su impacto en la programación y secuenciación de la producción.

Muchas veces el proceso de recepción o de despacho de mercancías es muy demorado y debe considerarse como parte crítica del sistema productivo, así también es necesario conocer las políticas de entrega establecidas con los proveedores y clientes con anterioridad.

Un factor que altera de manera continua al programa de producción ya establecido por la empresa es el tiempo de entrega de las materias primas, ya que este no es controlado por la organización, lo que puede generar imprecisiones en los tiempos arrojados por la secuenciación.

Al tener pleno conocimiento de las entregas y despachos tanto de proveedores como de clientes, se puede contar con información mucho más veraz para alimentar la base de datos del sistema experto y generar resultados valederos.

### **5.2.11. Programas de Mantenimiento**

Los programas de mantenimiento a menudo interfieren con la producción de la empresa debido a la falta de conocimiento y planificación de los departamentos responsables, por esta misma razón es crucial tener documentación de los planes de mantenimiento tanto preventivo como correctivo a realizar en la planta de producción, para así no alterar el programa productivo ya establecido.

Si no se tiene un conocimiento de las fechas de mantenimiento y las máquinas implicadas, se pueden generar conflictos al momento de producir ciertas órdenes de producción, ya que no se cuenta momentáneamente con los recursos requeridos.

Se debe tener en cuenta entonces los siguientes factores:

- ¿Existe un programa de mantenimiento en la empresa?
- ¿Cada cuanto se realiza?
- ¿Qué máquinas van a ser atendidas?
- ¿Cuánto demora el mantenimiento?
- ¿El mantenimiento altera las condiciones de las máquinas?
- ¿Qué órdenes de producción se ven retrasadas por el mantenimiento?
- ¿Qué planes de emergencia existen a la hora de que se presente una falla?

- ¿Se cuenta con planes de contingencia para reducir el impacto de la demora del mantenimiento?

La condición de inactividad de una máquina genera una restricción al momento de secuenciar las actividades. Para que el sistema experto pueda reconocer la disponibilidad de las máquinas es necesario crear una base de datos en la que se listen las maquinas y se indique el estado de las mismas (activa / inactiva).

#### **5.2.12. Clientes**

Es importante establecer en una base de datos los clientes con que cuenta la empresa y cuales son los productos que estos manejan. Además la prioridad de los clientes debe ser considerada al momento de efectuar la programación y secuenciación de la producción.

La prioridad es manejada como una ponderación y es fácilmente establecida por los directivos de la empresa, ya que estos saben quienes son los clientes que representan alto beneficio para la compañía.

La base de datos de clientes debe tener campos como:

- Código del cliente.
- Nombre del cliente.
- Ponderación.
- Productos asociados.

#### **5.2.13. Restricciones Gerenciales y del Sistema**

Como ya se ha expuesto, la aplicación o software resultante del desarrollo del modelo lógico simbólico propuesto más adelante, necesita de ciertas variables clave para su correcto funcionamiento.

Entre estas variables se encuentran las restricciones gerenciales y operativas o del sistema, las cuales aparecen a lo largo del estudio de cada uno de los puntos anteriormente nombrados.

Las restricciones operativas son de dos tipos, las restricciones de precedencia y las de capacidad, las primera se refieren al hecho de que cada trabajo tiene implícita una secuencia de las operaciones que no puede ser violada que es fijada desde el momento en el que se diseña el producto Las segundas abarcan la condición que una máquina o centro de trabajo solo puede procesar un trabajo a la vez.

Las restricciones gerenciales se refieren a las limitantes dictaminadas por la empresa con base en su estructura organizacional y de costos. Dentro del ambiente de una pequeña empresa hay ciertas decisiones que aunque no sean las mejores para el desempeño del sistema productivo son necesarias debido a los recursos con que se cuenta para mantener niveles de calidad y de servicio acordes a sus políticas y estrategias organizativas.

### **5.3. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LA TOMA DE DECISIONES.**

En esta presente investigación, se pretende emular y apoyar las decisiones de producción realizadas por los directivos de una empresa, por medio del desarrollo de un sistema experto, con el fin de obtener resultados rentables para la empresa y equilibrar ciertos objetivos como la minimización del inventario en proceso, entregas a tiempo y maximizar la utilización de los recursos.

Es de interés para la programación y secuenciación de actividades estudiar los objetivos y criterios escogidos por los directivos de la empresa y encargados de la dirección de la producción. Para este proceso se debe contar con la ayuda

del experto, con el fin de extraer la información de cómo actúa éste en cada una de las situaciones que pueden presentarse en diferentes escenarios.

Es necesario que el investigador estudie los diferentes canales de comunicación que existen en la empresa, ya que, así se trate de una pequeña empresa, pueden existir varios medios por donde fluye la información clave para el modelamiento del sistema.

Para tener un contexto amplio de las decisiones relevantes que deben estudiarse, debe analizarse, como mínimo, la manera actual de proceder en los siguientes puntos:

- Secuenciación y Scheduling.
- Control de existencias y materias primas.
- Reglas de costo-beneficio.

Para recrear como es el proceso de toma de decisiones concernientes a la programación de operaciones dentro de una organización primero se deben identificar las fuentes de información (departamentos o sistemas de información de la organización) y detallar como la información clave fluye hacia el dominio del experto para que este la interprete y tome acciones acorde a las condiciones del momento.

A continuación se detalla la información por cada área o departamento que estudia el experto de una organización para la secuenciación de las actividades y que dado el interés de esta investigación, debe ser tenida en cuenta para emular con alta fiabilidad el proceso de toma de decisiones por medio del sistema experto a diseñar.

- Gerencia General: La información que se requiere de esta área es la concerniente al objetivo deseado por la organización y con el cual se elaborará la función objetivo a minimizar en el problema de secuenciación.

Además, por lo general, la gerencia es quien fija un conjunto de reglas particulares para la programación de operaciones, basándose en políticas de calidad y en el nivel de servicio ofrecido a sus clientes, afianzando así su estrategia. Estas reglas deben ser tomadas en cuenta al momento modelar el sistema productivo ya que se convierten en restricciones gerenciales.

- Sistema contable: Por medio del sistema contable de la empresa es posible identificar los clientes y tener una idea de la importancia de estos, teniendo en cuenta el volumen de ventas que generan, si realizan el pago de contado, así como el cumplimiento en los mismos. Esta información respalda la asignación de prioridad a los pedidos.
- Ventas: Proporciona información sobre las políticas de cumplimiento de las fechas pactadas con los clientes (*deadline*) y es la que determina en fin la prioridad de los pedidos junto con la información y el análisis del sistema contable.
- Diseño: Se debe recopilar la información referente a los productos, es decir características físicas, propiedades y peculiaridades, las cuales determinan las operaciones necesarias para la elaboración de los mismos.
- Producción: Se debe recopilar información del manejo de inventario de materias primas, las políticas de mantenimiento, la disponibilidad de los recursos, la forma en que fluyen los productos por los centros de trabajo etc.

A medida que se extraen datos relevantes de la experiencia del experto, los conocimientos y decisiones deben representarse, a fin de que puedan incluirse en el sistema. Se le representa lo más sencillamente posible y se hace de un modo relacional entre los mismos, mediante las reglas que toman la forma:

SI < PREMISA > ENTONCES < CONCLUSION >

Las reglas componen la base de conocimiento y las mismas pueden relacionarse dando lugar a nuevos hechos.

#### 5.4. ETAPA 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Puesto que en la etapa anterior ya se han conocido y detallado todos los aspectos relevantes del sistema productivo así como el conjunto de reglas lógicas que lo gobiernan, se puede entonces, abordar de lleno la fase de modelamiento del taller de trabajo.

Las condiciones necesarias para desarrollar un modelo son una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. Para sistemas productivos bajo pedido uno de los factores que determinan la eficiencia de estos es el cumplimiento de las fechas de entregas pactada con los clientes, por esto se considera la siguiente función objetivo:

$$FO \quad \text{Min} \sum_{i=1}^n W_i L_i$$

Esta función objetivo es conocida en la literatura de los problemas de scheduling como el *Lateness Total Ponderado* o *Retraso Total Ponderado*. Ver cuadro 8.

El *Lateness* del trabajo  $J_i$ , se define como:  $L_i = c_i - d_i$ .

$c_i$ : Tiempo en que el trabajo  $J_i$  sale del sistema.

$d_i$ : Representa la fecha en que el trabajo  $J_i$  debe ser completado.

El *Lateness* es positivo cuando el trabajo  $J_i$  es terminado tarde y negativo cuando es terminado temprano.

**Cuadro 8** Definición del Lateness de un trabajo  $J_i$

El Lateness Total Ponderado pretende minimizar el retraso de los trabajos  $J_i$  respecto a su fecha límite de entrega  $d_i$ , (ver apartado 4.6.4) además teniendo en cuenta que a cada trabajo  $J_i$  se asocia una prioridad  $w_i$ .

Esta función objetivo está sujeta a un conjunto de restricciones que deben estar contenidas en la base de conocimientos y expresadas como reglas lógicas necesarias para caracterizar el proceso de toma de decisiones. Como ya antes se ha mencionado, las restricciones para todo sistema productivo intermitente se pueden catalogar dentro de tres grupos principales:

- Restricciones de Precedencia o Tecnológicas Asociadas al Producto:

Cada trabajo  $J_i$  requiere  $m$  operaciones  $O_{ij}$  con tiempos de procesamiento  $P_{ij}$  donde  $j = (1, \dots, m)$  y  $O_{ij}$  debe ser procesada en la máquina  $M_j$ . Para determinar estas restricciones se requiere la revisión de diagramas de operaciones y procesos para cada producto a elaborar.

- Restricciones de Capacidad o de Interferencia

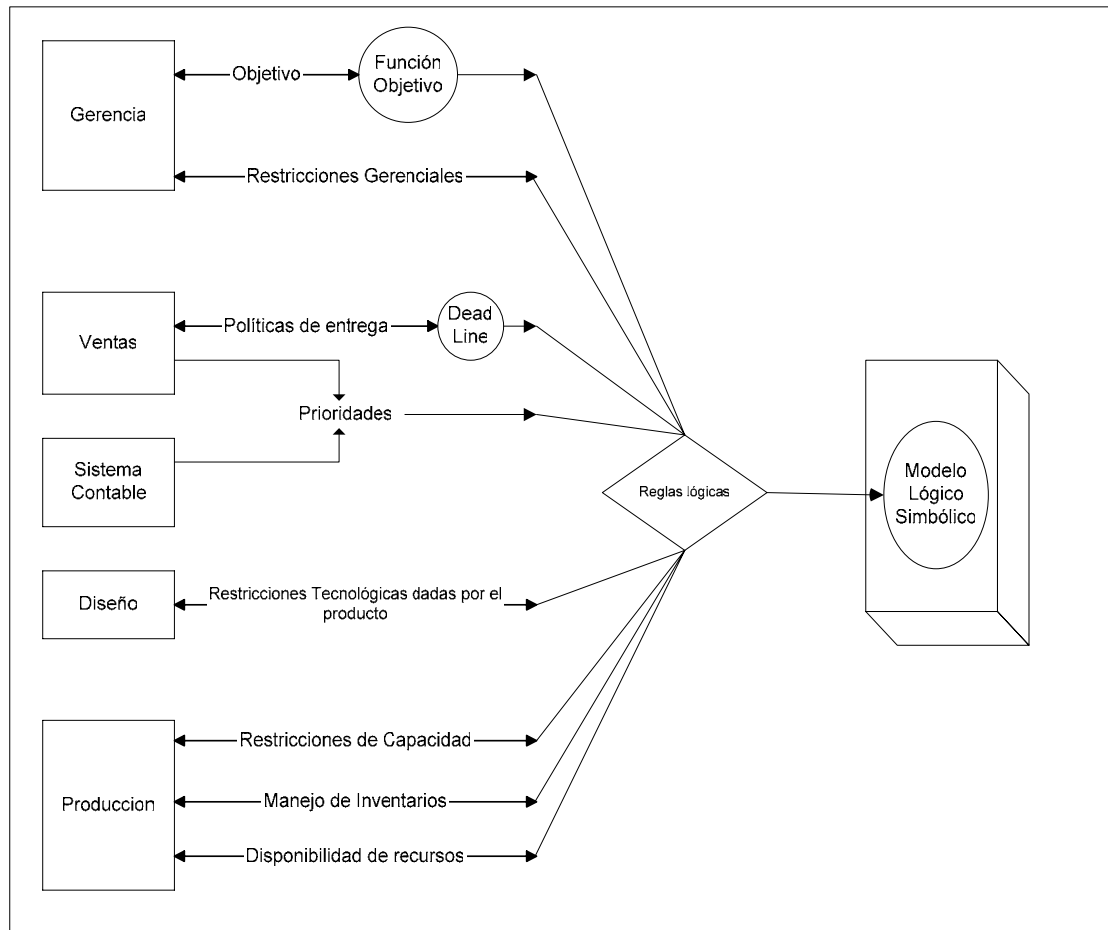
Cada máquina  $M_j$  está en capacidad de procesar solo un trabajo a la vez. Esta condición se cumple para todo sistema productivo de tipo Job Shop, por lo tanto los recursos son considerados de propósito dedicado.

- Restricciones Gerenciales o particulares a cada sistema.

Las restricciones gerenciales son aquellas dictaminadas por la empresa según su criterio, generalmente con base en la estructura organizacional y su función de costos. Y no se pueden catalogar dentro de ninguna de los dos tipos de restricciones anteriores.

La *figura 13* muestra como por medio del análisis de la información clave es posible crear un modelo lógico simbólico que representa las características de la organización y su sistema productivo, así como el proceso de toma de

decisiones del experto bajo el manejo de ciertas variables de interés. La figura resalta la importancia de emular estas condiciones por medio de reglas lógicas que faciliten el diseño del modelo, haciéndolo más acorde a la realidad.



**Figura 13** Información clave para la elaboración de un Modelo Lógico Simbólico de un sistema productivo

## 5.5. ETAPA 4: SOLUCIÓN DEL MODELO

Dado la complejidad de los problemas de scheduling se justifica la utilización de procedimientos de aproximación heurística como método de solución. A continuación se detalla la metodología de solución del modelo, que combina

heurísticas de tipo constructivo (Tardy Jobs<sup>42</sup> y Shifting Bottleneck Heuristics<sup>43</sup>) con metaheurísticas de búsqueda local (Simulated Annealing<sup>44</sup>).

Al abordar el estudio de los algoritmos heurísticos se ha comprobado que dependen en gran medida del problema concreto para el que se han diseñado. En otros métodos de solución, como pueden ser los algoritmos exactos, existe un procedimiento conciso y preestablecido, independiente en gran medida del problema abordado. En los métodos heurísticos esto no es así, las técnicas e ideas aplicadas a la resolución de un problema son específicas de este y aunque, en general, pueden ser trasladadas a otros problemas, han de particularizarse en cada caso.

#### **5.5.1. Aplicación del Shifting Bottleneck Heuristic<sup>45</sup>**

El algoritmo base para la solución del modelo es un procedimiento heurístico de cuello de botella móvil denominado Shifting Bottleneck Heuristics (de aquí en adelante SBH). Esta heurística como ya se ha mencionado (ver *apartado 4.9.2.1*) es uno de los métodos más poderosos para solucionar problemas de scheduling. En ambientes Job Shop o de tipo taller, el cuello de botella es móvil, ya que la ubicación e identificación de este depende de los pedidos y cantidades programadas en un lapso de tiempo dado. La *figura 14* muestra como se puede aplicar este procedimiento para la programación y secuenciación de actividades en el modelo general propuesto.

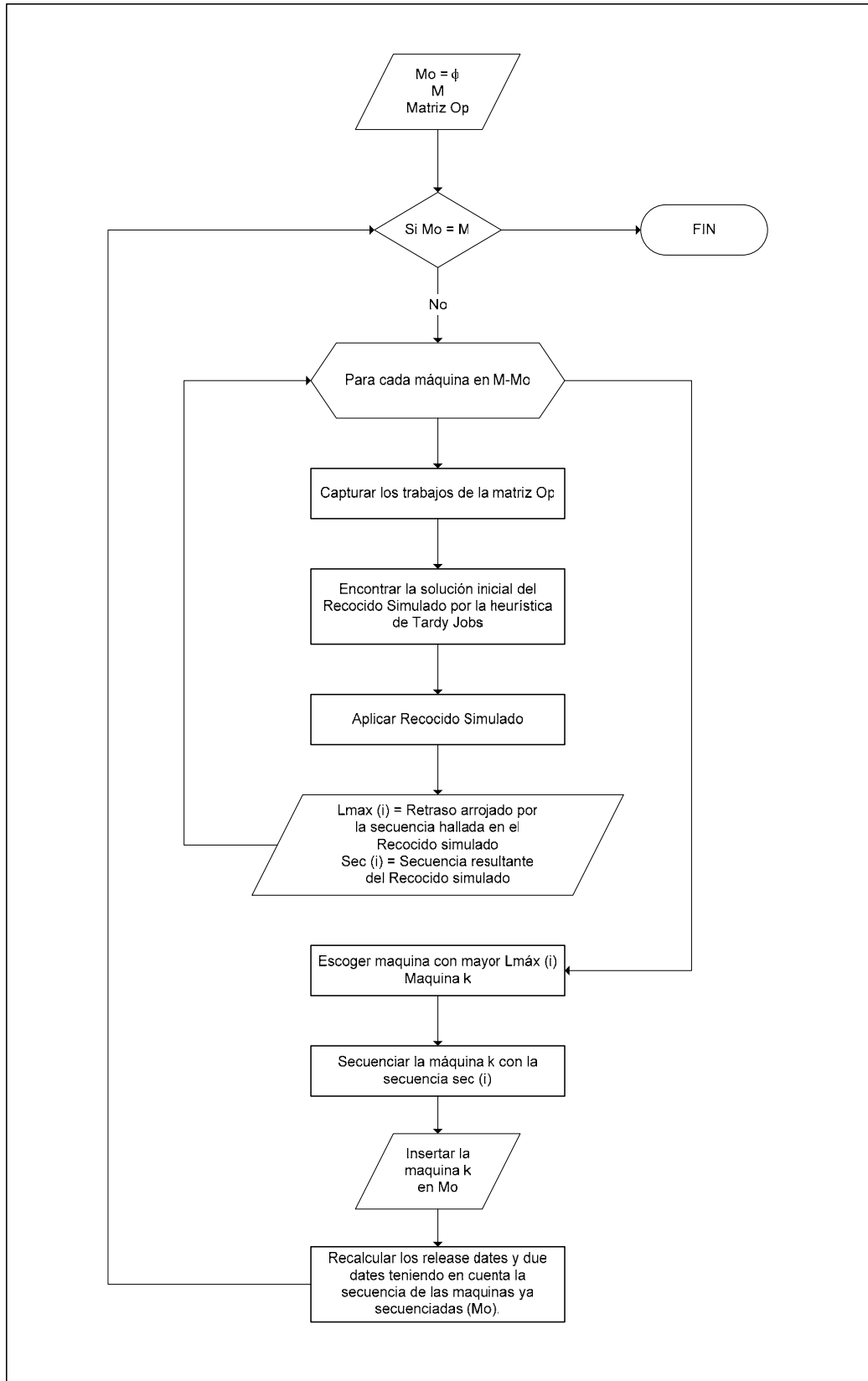
---

<sup>42</sup> Tardy Jobs traduce Trabajo u ordenes Tardías.

<sup>43</sup> Shifting Bottleneck Heuristic traduce Heurística de Cuello de Botella Móvil.

<sup>44</sup> Simulated Annealing traduce Recocido Simulado.

<sup>45</sup> Adaptado PINEDO M. Op. Cit. pp. 168-169.



**Figura 14** Diagrama de flujo del procedimiento Shifting Bottleneck Heuristic.

A continuación se detalla como puede aplicarse el SBH.

**PASO 1:**

- Crear un vector  $M_o = \phi$ , es decir vacío.
- Crear un vector **M** que contenga todas las máquinas presentes en el sistema productivo.
- Crear una matriz **Op** que contenga los trabajos que pueden hacerse en cada una de las maquinas. Esta matriz contiene las máquinas en las columnas y los trabajos en las filas.

**PASO 2:**

- Para cada máquina presente en  $M - M_o$ , resolverla como un problema de una sola máquina del tipo **1 / r<sub>j</sub> / L<sub>máx</sub>** así (ver cuadro 9):

Capturar de la matriz **Op** los trabajos que pueden hacerse en esta máquina.

<b>J 1</b>	<b>J 2</b>	<b>.....</b>	<b>J n</b>					
$p_1$	$p_2$	<b>.....</b>	$p_n$					
$d_1$	$d_2$	<b>.....</b>	$d_n$					
$r_1$	$r_2$	<b>.....</b>	$r_n$					
$C_1 = p_1 + r_1$	$C_2 =$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>p_2 + C_1</math> si <math>C_1 &gt; r_2</math></td> <td rowspan="2"><b>.....</b></td> </tr> <tr> <td><math>p_2 + r_2</math> si <math>C_1 &lt; r_2</math></td> </tr> </table>	$p_2 + C_1$ si $C_1 > r_2$	<b>.....</b>	$p_2 + r_2$ si $C_1 < r_2$	$C_n =$	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><math>p_n + C_{n-1}</math> si <math>C_{n-1} &gt; r_n</math></td> </tr> <tr> <td><math>p_n + r_n</math> si <math>C_{n-1} &lt; r_n</math></td> </tr> </table>	$p_n + C_{n-1}$ si $C_{n-1} > r_n$	$p_n + r_n$ si $C_{n-1} < r_n$
$p_2 + C_1$ si $C_1 > r_2$	<b>.....</b>							
$p_2 + r_2$ si $C_1 < r_2$								
$p_n + C_{n-1}$ si $C_{n-1} > r_n$								
$p_n + r_n$ si $C_{n-1} < r_n$								
$L_1 = C_1 - d_1$	$L_2 = C_2 - d_2$	<b>.....</b>	$L_n = C_n - d_n$					

**Cuadro 9** Cálculo del Lateness para cada Ji.

$$L_{máx} = \sum_{j=1}^n L_j$$

Donde  $J_n$  representa el trabajo  $n$ ,  $p_n$  representa el tiempo de procesamiento del trabajo  $n$  en esa maquina,  $d_n$  la fecha de entrega o el

tiempo más tardío que puede terminarse el trabajo y no retrase la fecha de entrega,  $r_n$  el tiempo cuando el trabajo esta disponible para realizarse en esa máquina,  $C_n$  el tiempo de terminación del trabajo y  $L_n$  el retraso del trabajo  $n$ .

Este procedimiento generalmente se realiza para  $n!$  combinaciones, de manera que se encuentra la solución óptima por máquina, porque se explora todo el conjunto posible de soluciones. En la práctica, este proceso es muy complejo y exige una carga computacional elevadísima si consideramos un aumento en el número de máquinas y de trabajos.

Por lo tanto se propone resolver este problema por medio de la metaheurística del Recocido Simulado, la cual arroja valores cercanos al óptimo y en un tiempo mucho menor que si se explora toda las posibles combinaciones (ver apartado 4.9.2.2).

Más adelante se detalla paso por paso la metaheurística del recocido simulado, para la solución de este tipo de problemas.

- Para cada máquina, haga  $L_{máx}(j) = \text{Mínimo } L_{máx} \text{ en la máquina } M_j$ . De la misma manera haga  $Sec(j) = \text{secuencia que arroja el } L_{máx}(j)$ .

PASO 3:

Escoger máquina con mayor  $L_{máx}$  así:

$$L_{máx}(k) = \underset{j \in \{M - M_o\}}{máx} (L_{máx}(j))$$

Secuenciar la máquina  $M_k$  (considerada como el nuevo cuello de botella) de acuerdo con la secuencia  $sec(k)$  obtenida en el paso 2.

PASO 4:

Calcular los nuevos *release dates* ( $r_j$ ) y *due dates* ( $d_j$ ) teniendo en cuenta la máquina ya secuenciada.

PASO 5:

Si  $M_o = M$  entonces se finaliza el algoritmo, de lo contrario se retoma el procedimiento desde el paso 2.

### 5.5.2. Aplicación de Tardy Jobs<sup>46</sup>

Mediante esta heurística se pretende encontrar una secuencia que minimice el número de trabajos tardíos, la cual servirá como solución inicial para la metaheurística de Recocido Simulado (ver *figura 15*)

PASO 1:

- Crear un vector  $J = \phi$  , que contiene los trabajos previamente programados.
- Crear un vector  $J^d = \phi$  , que contiene los trabajos previamente considerados para la programación y retirados porque no cumplen las fechas de entrega (Tardy Jobs).
- Crear un vector  $J^c = \{1,2,3,\dots,n\}$ , que contiene los trabajos que aún no han sido considerados para la programación.

PASO 2:

- Hacer  $j^*$  igual al trabajo que satisface:

$$dj^* = \min_{j \in J^c}(dj)$$

Es decir el trabajo contenido en  $J^c$  que tiene el menor  $d_j$

---

<sup>46</sup> Adaptado PINEDO M. Op. Cit. pp. 46-47.

- Insertar  $j^*$  en  $J$ .
- Borrar  $j^*$  de  $J^c$ .

PASO 3:

Si  $\sum_{j \in J} P_j \leq dj^*$ , continuar al paso 4.

De lo contrario:

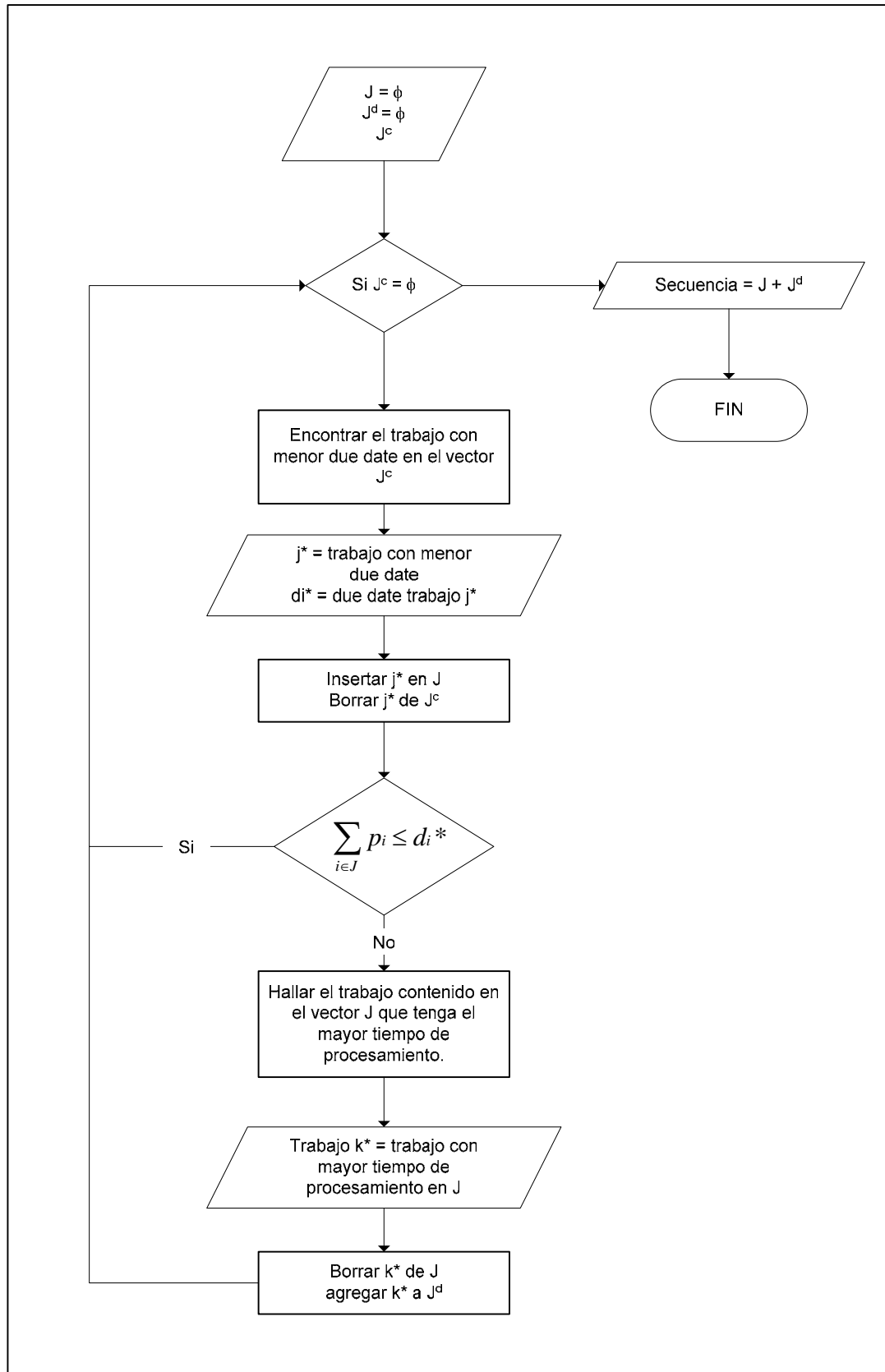
- Hacer  $k^*$  igual al trabajo que satisface  $pk^* = \max_{j \in J}(pj)$ , es decir que tiene el mayor tiempo de procesamiento.
- Borrar  $k^*$  de  $J$ .
- Agregar  $k^*$  a  $J^d$ .

PASO 4:

Si  $J^c = \emptyset$  entonces se finaliza el algoritmo, de lo contrario, se continúa desde el paso 2.

### 5.5.3. Recocido Simulado Aplicado

La exploración de las posibles soluciones y optimización de la función objetivo para cada recurso es llevada a cabo por medio de la metaheurística de Recocido Simulado. La *figura 16* representa las etapas del procedimiento metaheurístico.



**Figura 15** Diagrama de Flujo de la heurística Tardy Jobs.

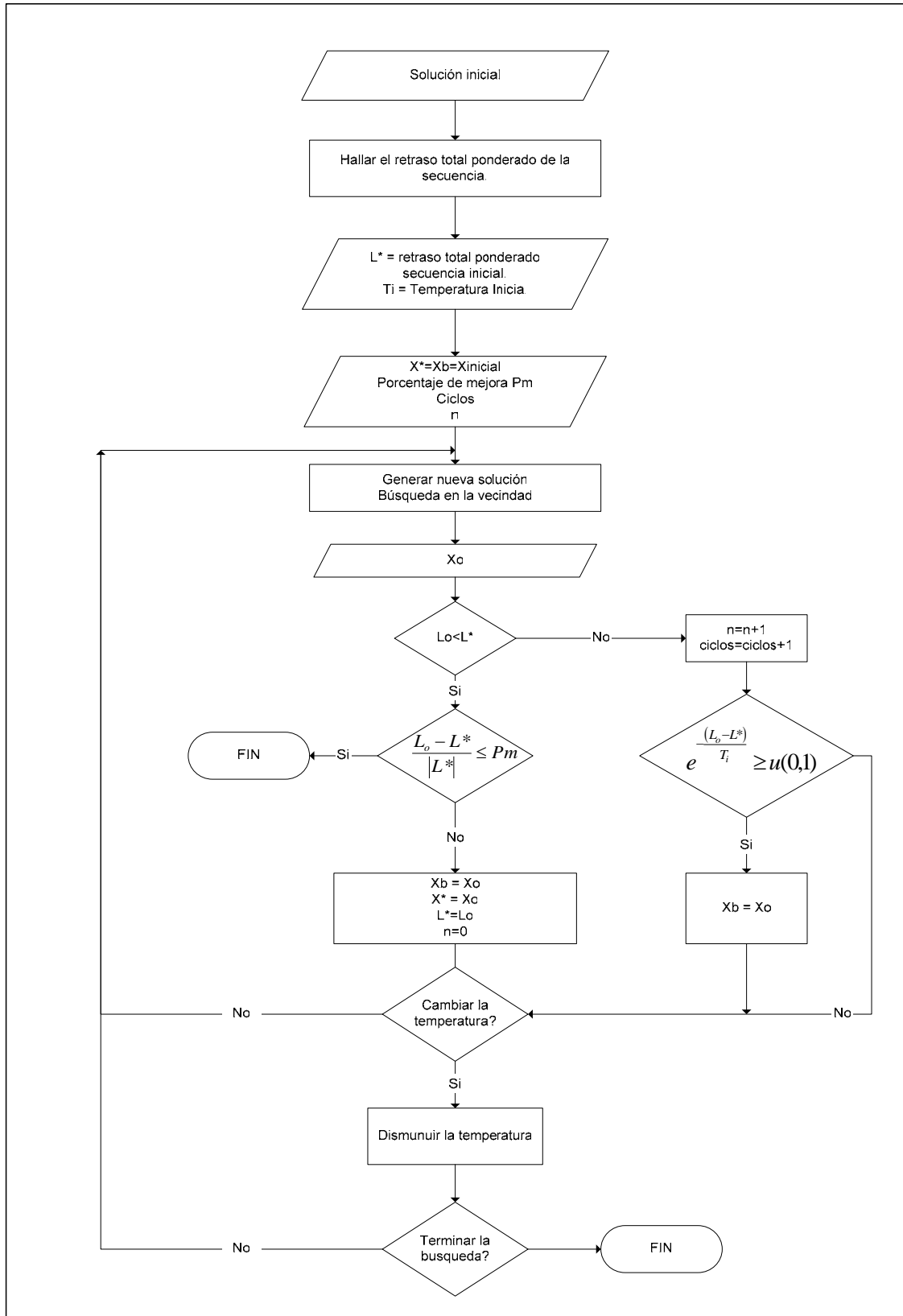


Figura 16 Diagrama de Flujo del Recocido Simulado Aplicado a un Job Shop.

PASO 1:

Encontrar la solución inicial por medio de la heurística de minimización de trabajos tardíos (Tardy Jobs). Llamar la secuencia encontrada como un vector  $\mathbf{X}_{inicial}$ .

PASO 2:

- Hallar el retraso total ponderado de esa secuencia establecida.

$$L^* = \sum_{i=1}^n w_i L_i \quad (1)$$

- Hacer  $A = 0.2(L^*)$
- Hallar la temperatura inicial así:

$$T_i = \frac{-A}{\ln(0.9)}$$

PASO 3:

- Definir  $\mathbf{X}^*$  como un vector que contiene la mejor secuencia, es decir la que minimiza el retraso (Lateness).
- Definir  $\mathbf{X}_b$  como un vector que contiene la secuencia de búsqueda.

$$\mathbf{X}^* = \mathbf{X}_b = \mathbf{X}_{inicial}$$

PASO 4:

Escoger el número de cambios de temperatura deseados ( $n$ ), las iteraciones para cada temperatura (**ciclos**) y el porcentaje de mejora (**Pm**) permitido para aceptar una solución y continuar con el recocido.

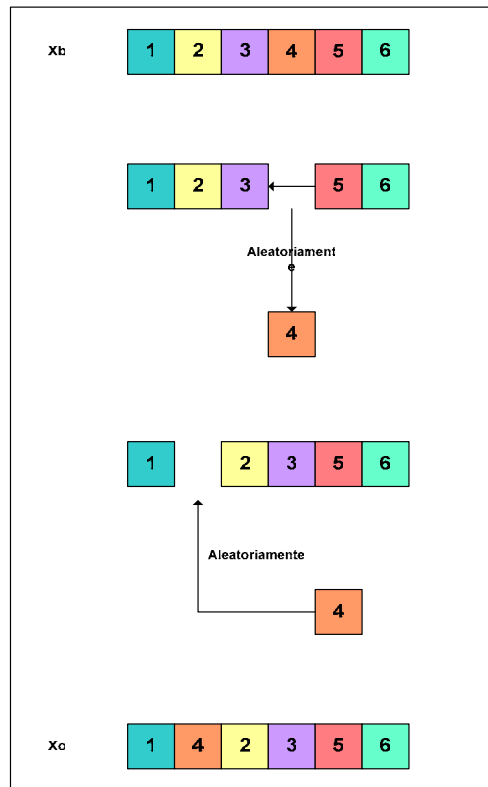
PASO 5: BUSQUEDA EN LA VECINDAD

- Escoger aleatoriamente un trabajo de los contenidos en el vector  $\mathbf{X}_b$ , de la misma manera este trabajo se coloca en una posición aleatoria entre las posiciones restantes en el vector.

El vector resultante se denota  $X_0$

Por ejemplo:

Si se tienen 6 trabajos, el procedimiento puede representarse así:



**Figura17** Representación de la generación del vecindario en SA.

## PASO 6: CONDICION DE EQUILIBRIO

Se calcula el retraso total ponderado de la nueva secuencia utilizando la ecuación (1) y se denota  $L_o$ .

- Si  $L_o < L^*$

Si la mejora entre  $L_o$  y  $L^*$  es menor al porcentaje de mejora  $Pm$ .

$$\frac{L_o - L^*}{|L^*|} \leq Pm$$

Entonces el algoritmo se detiene, de lo contrario retomar desde el paso 7 estableciendo:

$$X_b = X_o$$

$$X^* = X_o$$

$$L^* = L_o$$

$$n=0$$

- Si  $L_o > L^*$

$$\text{Si } e^{-\frac{(L_o - L^*)}{T_i}} \geq u(0,1) \quad (\text{Condición de equilibrio})$$

Hacer  $X_b = X_o$ , es decir que se tiene un nuevo punto de búsqueda. Si no se cumple la condición de equilibrio entonces el problema se mantiene inalterado.

Incrementar los contadores de iteraciones y ciclos.

$$n=n+1$$

$$\text{ciclos}=\text{ciclos}+1$$

## PASO 7: CAMBIO DE TEMPERATURA

Si el número de ciclos se ha completado, entonces debe reducirse la temperatura y retornar al paso 8. Este procedimiento generalmente se realiza multiplicando la temperatura actual por una constante  $\alpha$ , con valor entre 0.8 y 0.99<sup>47</sup>.

$$T_i = 0.95(T_i)$$

---

<sup>47</sup> DOWSLAND K, DIAZ B. Op. Cit. p. 5.

Si no se ha completado el número de ciclos retornar al paso 5 sin reducir la temperatura.

#### PASO 8: CONDICIÓN DE PARADA

Si el número de cambios de temperatura ( $n$ ) se ha completado, pare. De lo contrario retornar al paso 5.

### 5.6. ETAPA 5: VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE SOLUCIÓN

Un buen algoritmo heurístico debe de tener las siguientes propiedades<sup>48</sup>:

1. Eficiente. Un esfuerzo computacional realista para obtener la solución.
2. Bueno. La solución debe de estar, en promedio, cerca del óptimo.
3. Robusto. La probabilidad de obtener una mala solución (lejos del óptimo) debe ser baja.

Con este fin, en esta etapa se debe verificar la secuencia arrojada por los algoritmos de solución, si en realidad se cumple con todas las restricciones ya mencionadas y con las consideraciones especiales del sistema productivo (reglas lógicas). Aunque este procedimiento puede ser bastante tedioso, es necesario corroborar por lo menos el cumplimiento de las restricciones de secuencia y de capacidad. Si es posible, deben hacerse varias corridas del algoritmo para comprobar y evaluar las frecuencias relativas de las peores soluciones, las cuales deben ser bajas.

Además es necesario después de correr el algoritmo de solución propuesto, verificar los resultados arrojados por el mismo de manera que se garanticen

---

<sup>48</sup> Tomado de MARTI Rafael. Op. Cit. p.12.

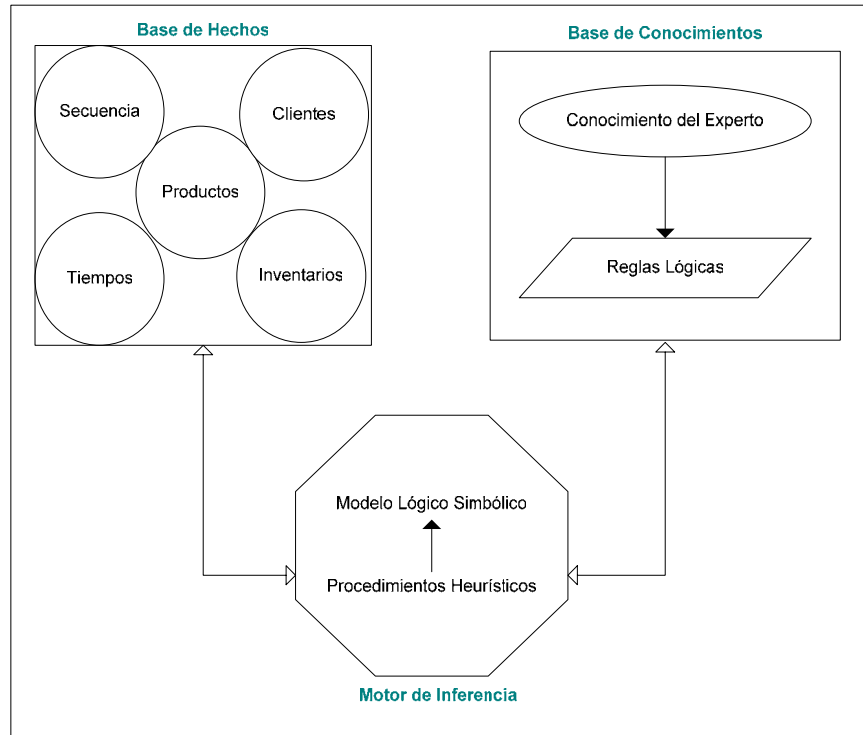
valores acordes con la realidad y que cumplan la minimización del retraso total máximo ponderado u otra función objetivo considerada por los directivos.

Puede suceder, que los programadores de los modelos de solución cometan errores que aunque sean insignificantes desde el punto de vista de programación, impactan enormemente el scheduling y secuenciación de actividades. La mejor forma de depurar estos errores es corriendo el modelo varias veces, comprobando al tiempo la robustez, confiabilidad del software y que tanto se acerca o mejora las soluciones planteadas por el experto.

Otra recomendación, es comprobar las soluciones con otro software reconocido creado para estos propósitos, que garanticen soluciones que convergen a la óptima; cabe decir que esta opción es valida siempre que la empresa cuente con la disponibilidad de estas herramientas, aunque se considera que debido a la falta de recursos en las PYMES colombianas esta posibilidad es muy reducida, es aquí donde la academia, y en especial las universidades, deben vincularse a proyectos de este tipo brindando soporte tecnológico y capital humano capaz de validar los modelos o metodologías en cuestión.

## **5.7. ETAPA 6: ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO**

En las fases anteriormente señaladas ya se ha comenzado la estructuración de la información para los módulos básicos de un sistema experto como es el caso de las bases de hechos (bases de datos), base de conocimientos (reglas relacionales) y el motor de inferencia (modelo y método de solución). La *figura 18* muestra de manera general como se estructura inicialmente un sistema experto para la secuenciación y programación de actividades y como se relaciona cada módulo básico. A continuación se detallan algunos aspectos respecto a cada módulo que deben ser tomados en cuenta para la elaboración de la aplicación y de su interfaz con el usuario de manera exitosa.



**Figura 18** Estructuración del Sistema Experto.

### 5.7.1. Base de Hechos

Una base de datos, a fin de ordenar la información de manera lógica, posee un orden que debe ser cumplido para acceder la información de manera coherente. Cada base de datos tiene una o más tablas, las cuales cumplen la función de contener los campos.

Por consiguiente una base de datos posee el siguiente orden jerárquico:

- Tablas
- Campos
- Registros

Muchas veces las empresas ya tienen gran parte de sus bases de datos digitalizadas en paquetes como Excel, Access, Oracle, Ingres, Sybase o Instant DataBase, por lo que es sencillo interconectarlas con el motor de inferencia del sistema.

Las bases de datos en SQL<sup>49</sup> son recomendadas por las funciones de edición, ordenamiento y búsqueda que ofrecen. Además poseen tres comandos que permiten realizar muchas tareas, estos son:

- SELECT: Campos a ser mostrados.
- FROM: Tablas que contienen los campos.
- WHERE: Condiciones específicas requeridas.

Cuando no existe registro de bases de datos, es recomendable que en el proceso de conocimiento del sistema productivo, se estructure la forma de las mismas para así facilitar la creación de estas.

### **5.7.2. Base de Conocimientos**

Este módulo es el corazón del sistema, no importa que tan sofisticado sea el motor de inferencia o que tan completa esté la base de datos, el contenido de la base de conocimientos indica la calidad de los resultados a obtener.

Para la construcción de la base de conocimientos es necesario basarse en la dinámica de las decisiones explicada anteriormente, de esta manera, el investigador extrae toda la información del experto y la convierte en reglas lógicas.

Por ejemplo si el gerente de la empresa dice que no recibe pedidos de menos de 100 unidades, entonces el sistema experto procede de la siguiente manera:

*Cantidad Pedida = 120 unidades (Hecho)*

*Si (Cantidad Pedida >100 unidades) → ENTONCES Reciba Pedido*

---

<sup>49</sup> *Structured Query Language* traduce Lenguajes de Consulta Estructurado

Como se observa son muchas las reglas que pueden recolectarse, lo que aumenta el grado de dificultad cuando estas empiezan a relacionarse unas con otras. De ahí que sea necesario contar con equipos de computación con buena capacidad de procesamiento para obtener los resultados en el menor tiempo posible.

En situaciones complejas, incluso verdaderos expertos pueden dar información inconsistente (por ejemplo, reglas inconsistentes y/o combinaciones de hechos no factibles). Por ello, es muy importante controlar la coherencia del conocimiento tanto durante la construcción de la base de conocimiento como durante los procesos de adquisición de datos y razonamiento.

### 5.7.3. Motor de Inferencia

Es el intérprete de las reglas y por lo tanto nos da la estrategia general de resolución. Es fundamental tener un excelente motor de inferencia que sea capaz de aprovechar toda la información de las bases de datos y bases de conocimiento. Así como se considera que la base de conocimientos es el corazón, el motor de inferencia es el cerebro del sistema experto (*cuadro 10*).

<b>Funciones del Mecanismo de Inferencia</b>
Determinación de las acciones que tienen lugar, el orden en que lo hacen y cómo lo harán entre las diferentes partes del Sistema Experto.
Determinar cómo y cuándo se procesan las reglas, y dado el caso también la elección de qué reglas deben procesarse.
Controlar el diálogo con el usuario.

**Cuadro 10** Funciones del Motor de Inferencia.

Para la construcción del motor de inferencia es importante contar con la ayuda de una persona capacitada en programación de computadores, ya que se debe decidir en que tipo de lenguaje se hace el programa y como funciona en la empresa.

Antes de iniciar el proceso de programación en cualquiera de los programas escogidos, se deben realizar diagramas de flujo que representen la secuencia de interpretación de las reglas y aplicación de los modelos o heurísticas por parte del sistema experto. Esto facilita la labor del programador y amplia la comprensión del problema a cada uno de los implicados.

#### **5.7.4. Interfaz con el usuario**

Un módulo adicional con que cuentan los sistemas expertos, es la interfaz con el usuario, como su nombre lo dice es la presentación del software ante el usuario del programa. Para la creación de este módulo deben tenerse en cuenta varios aspectos<sup>50</sup>:

- *El aprendizaje del manejo debe ser rápido:*

El usuario no debe dedicar mucho tiempo al manejo del sistema, debe ser intuitivo, fácil en su manejo, cómodo y relativamente sencillo.

- *Evitar entrada de datos errónea:*

De esta manera se garantizan resultados factibles y dentro de los límites esperados.

---

<sup>50</sup> Disponible en <URL [http://ingenieroseninformatica.org/recursos/tutoriales/sist\\_exp](http://ingenieroseninformatica.org/recursos/tutoriales/sist_exp)>.

Recuperado el 13 de Febrero de 2005.

- *Los resultados deben presentarse en una forma clara para el usuario:*

La finalidad del sistema experto es apoyar la toma de decisiones, por lo que deben presentarse resultados claros y entendibles al usuario, para así cumplir con este objetivo.

- *Las preguntas y explicaciones deben ser comprensibles:*

En cada uno de los campos de entrada de datos se debe colocar una explicación de la manera correcta de hacerlo y que tipo de información se requiere. Estas ayudas deben ser comprensibles para el usuario final.

PARTE III  
DESARROLLO DE LA  
METODOLOGÍA  
PROPUESTA

## **6. EXPERIENCIA EN LA EMPRESA IMPRESOS Y EMPAQUES D’CARTÓN**

Impresos y Empaques D’CARTÓN, es una pequeña empresa que cuenta con doce empleados, de los cuales ocho se encuentran en el área de producción. Actualmente la empresa, está en un proceso de vinculación de sistemas de información para soportar las decisiones del área de producción en cuanto a programación y secuenciación de actividades, por lo que se ofrece como sistema productivo piloto para desarrollar el modelo propuesto.

### **6.1. ETAPA 0: ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO**

Gracias al desarrollo de proyectos anteriores en la empresa, se cuenta con procesos totalmente estandarizados. Además la empresa cuenta con la certificación de calidad ISO 9001, lo que garantiza al menos una documentación de los procesos productivos y diagramas explicativos de cada una de las actividades del taller de trabajo.

Hoy en día, se realiza una medición del trabajo diaria a cada uno de los empleados, estos cuentan con una tablilla con cronómetro y su respectiva planilla la cual deben diligenciar al final de cada operación con el fin de registrar su tiempo de inicio y finalización. Posteriormente estas planillas son digitadas por una persona encargada del área administrativa, aunque lo que se busca en un futuro es la instalación de un computador a los operarios para que sean estos mismos quienes alimenten la base de datos de tiempos.

Debido a la experiencia de los directivos de la empresa, se logra recolectar la información necesaria para el establecimiento de patrones que debe tener cada tipo de producto; de esta manera cuando un nuevo diseño o producto llega a la empresa, se sabe inmediatamente que operaciones debe llevar y la secuencia de las mismas.

## **6.2. ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL SISTEMA PRODUCTIVO.**

### **6.2.1. Tipo de Flujo del Sistema Productivo de D'Cartón.**

En D'Cartón se evidencia un patrón de flujo de tipo Job Shop, ya que cada trabajo tiene su propia ruta a seguir a través de las nueve máquinas y estos solo las visitan una vez (sin recirculación). Los lotes de productos se terminan en su totalidad antes de pasar a la siguiente operación (*non-preemptive scheduling*), para garantizar una calidad con tiempos de liberación definidos; los tiempos de preparación entre dos trabajos dependen de la secuencia en que se programen dichos trabajos. El interés de la dirección son las entregas a tiempo a sus clientes, por lo que se ha optado como función objetivo, para el problema de scheduling y secuenciación, minimizar el retraso ponderado (ver apartado 4.6.4). La notación general  $\alpha/\beta/\gamma$  de este problema se muestra a continuación:

$$J_9 / r_i ; S_{ijk} / \text{Min } \sum w_i L_i$$

Esta notación facilita la revisión literaria del problema ya que los investigadores suelen desarrollar metodologías de solución específicas para las posibles representaciones.

## **6.2.2. Aspectos Claves del Sistema**

### **6.2.2.1. Productos**

Mediante indagación en los registros de la empresa y entrevistas con los directivos de la misma, se encuentran las características relevantes a tener en cuenta para definir completamente cada uno de los productos.

La empresa fabrica cajas de cartón para todo tipo de sectores como restaurantes, calzado, pastelería, pizzería, marroquinería, alimentos congelados y confecciones. Cada uno de los productos tiene especificaciones definidas con anticipación por el cliente.

Las características relevantes a tener en cuenta para cada uno de los productos de la empresa son:

#### **Referencia:**

Es el nombre que se le da al artículo al interior de la organización para hacer más fácil su reconocimiento por parte del área de producción y administración.

#### **Código de Producto:**

Es un número de 5 dígitos que ha establecido la gerencia y es el identificador único de cada artículo.

#### **Cliente:**

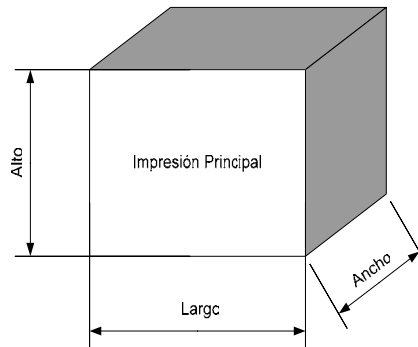
Este campo toma importancia a la hora de establecer las prioridades de los pedidos cuando se programa y secuencian las actividades.

#### **Código del cliente:**

Es un número consecutivo de 5 dígitos para poder diferenciar cada uno de los clientes en el sistema experto.

Dimensiones:

Las cajas tienen tres dimensiones básicas: largo, ancho y alto. En la empresa los campos están definidos en todos los registros de la siguiente manera:



*Largo x Ancho x Alto*

Tipo de caja:

Existen dos tipos de cajas: las plegadizas y de tipo Tapa y Base. Las primeras son aquellas que, por lo general, no necesitan un proceso de pegue luego de ser troqueladas, es decir que mediante el manejo de los dobleces producidos por las cuchillas del troquel se puede armar fácilmente la caja. Las de tipo Tapa y base, son las que necesitan un proceso de pegue posterior al troquelado, es decir, se fabrican las tapas y bases consecutivamente y posteriormente se les pega, convirtiéndose así en el producto deseado

Tipo de Cartón:

El cartón es la materia prima básica de los productos fabricados por la empresa. Actualmente se manejan dos referencias de cartón llamadas, AMERICA y GAMA. Aunque, cabe mencionar, que algunos productos son fabricados con papel, por lo que aparecen otros insumos como el papel KRAFT o cartones especiales tales como: corrugado y micro-corrugado. Para cada artículo dependiendo del sector, uso y calidad

requerida, se define el tipo de cartón o papel a utilizar y las dimensiones del mismo.

Existen muchos tipos de cartón dentro de cada una de las clases de materia prima dependiendo del calibre y ancho.

**Calibre:**

Es el espesor que tiene el pliego de cartón. Por lo tanto los nombres de los cartones vienen con el calibre especificado de la siguiente manera:

*Nombre de Cartón – Calibre – Ancho*

*Ej.: Gama 36 - 70*

**Código de cartón:**

Es un número de 8 dígitos establecido de la siguiente manera: 2 dígitos para el tipo de cartón, 3 dígitos para el calibre y 3 dígitos para el ancho.

**Impresiones:**

Cada producto que lleve impresión puede pasar varias veces por las litográficas dependiendo del número de colores que lleve. Básicamente se manejan cuatro tonos que son Cyan, Magenta, Amarillo y Negro. Dependiendo del número de pasadas que requiera el producto y la secuencia de colores que lleve, se incrementa o disminuye el tiempo de producción y preparación en impresión.

**Tipo de corte**

En la empresa se pueden realizar los procesos de cortarrollo y guillotina que consisten en el corte de los pliegos para convertirlos en formatos de impresión. Estos cortes están clasificados en tres tipos dependiendo de la cantidad de desperdicio arrojada por los mismos, de esta manera el corte número uno es el que tiene desperdicio mínimo.

Cabe decir que no todos los productos tienen establecidos los tres tipos de corte, ya que la finalidad es tener cortes alternos en caso de que no exista el cartón necesario para la producción requerida.

#### Pliegos y formatos

El cartón pasa por un proceso de transformación antes de convertirse en producto final (cajas). Los rollos de cartón o bobinas se cortan en la máquina de cortarrollo y se convierten en pliegos dependiendo del largo requerido, luego estos pliegos se cortan en la máquina de guillotina en unidades más pequeñas para convertirse en formatos y posteriormente en troquelado se convierten en cajas listas para ser pegadas o empacadas.

Cada uno de los productos tiene asociada una cantidad de pliegos y formatos que son requeridos para su producción, así como las dimensiones de cada uno de estos.

#### Uñas

La máquina litográfica cuenta con uñas que agarran el formato de cartón y alimentan el proceso de impresión. Dependiendo del tamaño del formato, la máquina puede agarrar el cartón por la parte inferior o por un costado.

#### Planchas

Las máquinas litográficas imprimen el diseño requerido a los formatos de cartón gracias a las planchas. Estas son placas metálicas livianas que tienen estampado el diseño de una caja por ambas caras; por cada color es necesaria una cara de la plancha y cada máquina tiene sus propias planchas, ya que los tamaños son diferentes.

### Código de Plancha

Es un número de cinco dígitos que contiene un consecutivo de cuatro dígitos y un último dígito para identificar la cara.

### Troqueles

A diferencia de las planchas que son únicas para cada producto y color, los troqueles pueden ser compartidos por varios artículos. El troquel es una herramienta de corte fabricada en madera y que contiene las cuchillas y dobladoras para dar al formato de cartón los pliegues requeridos para fabricar la caja.

### Código Troquel

Es un número consecutivo de cinco dígitos. El primer campo contiene una letra que define el tipo de sector para el que se utiliza el troquel y los campos restantes son un consecutivo.

#### 6.2.2.2. Materias Primas

Como ya se ha mencionado anteriormente, el cartón y el papel son las materias primas básicas del sistema productivo. Además, existen otros tipos de insumos como tintas, pegantes, madera, acetatos, barniz y muchos otros que también deben ser controlados, ya que pueden tener un leve impacto en la secuenciación y programación de actividades.

Las características relevantes a tener en cuenta para las materias primas de la empresa son:

#### Proveedor:

Es quien suministra las materias primas. Este campo no tiene impacto alguno sobre los resultados del software pero debe incluirse como información para emitir las órdenes de compra.

La empresa tiene un solo proveedor que maneja las referencias Cartón Colombia para el GAMA y Cartón América para el AMÉRICA.

Códigos:

Muchas de las materias primas ya sea cartón o cualquier otra, deben tener un código asignado para poder ser manejadas por el sistema experto. En este caso se considera que los insumos con mayor impacto sobre la producción son las tintas y el cartón por lo que se establece cierto número de dígitos a cada uno de estos. En cuanto a los demás insumos se consideran irrelevantes para el programa y se supone que siempre existe inventario de los mismos.

Tiempos de entrega:

En D'CARTÓN se puede decidir enviar a cortar el cartón a la Cooperativa de Impresores del Oriente, por lo que se evitan las operaciones de cortarrollo y guillotina. De este modo los insumos que entran al sistema productivo son formatos listos para la impresión.

El tiempo de entrega de estos formatos por parte de la Cooperativa es aproximadamente de dos días. Este valor es fundamental cuando se quiere programar las actividades y secuenciarlas si se decide cortar los formatos fuera de la empresa.

#### 6.2.2.3. Inventarios

Con el BOOM de materiales realizado por el software en el proceso de programación de materias primas, se debe tener registro de cada uno de los inventarios de materias primas, producto en proceso y producto terminado para así ofrecer resultados acordes con la realidad.

Inventario de bobinas de cartón:

La empresa maneja un registro de las bobinas de cartón por medio de los metros cuadrados que tiene cada una de estas. Por ejemplo, si la bobina es AMERICA 40 – 60, (ancho de 60 cm.) y por los registros se conoce cuanto tiene de largo la bobina, se puede establecer cuantos metros cuadrados posee ese rollo.

Bodega

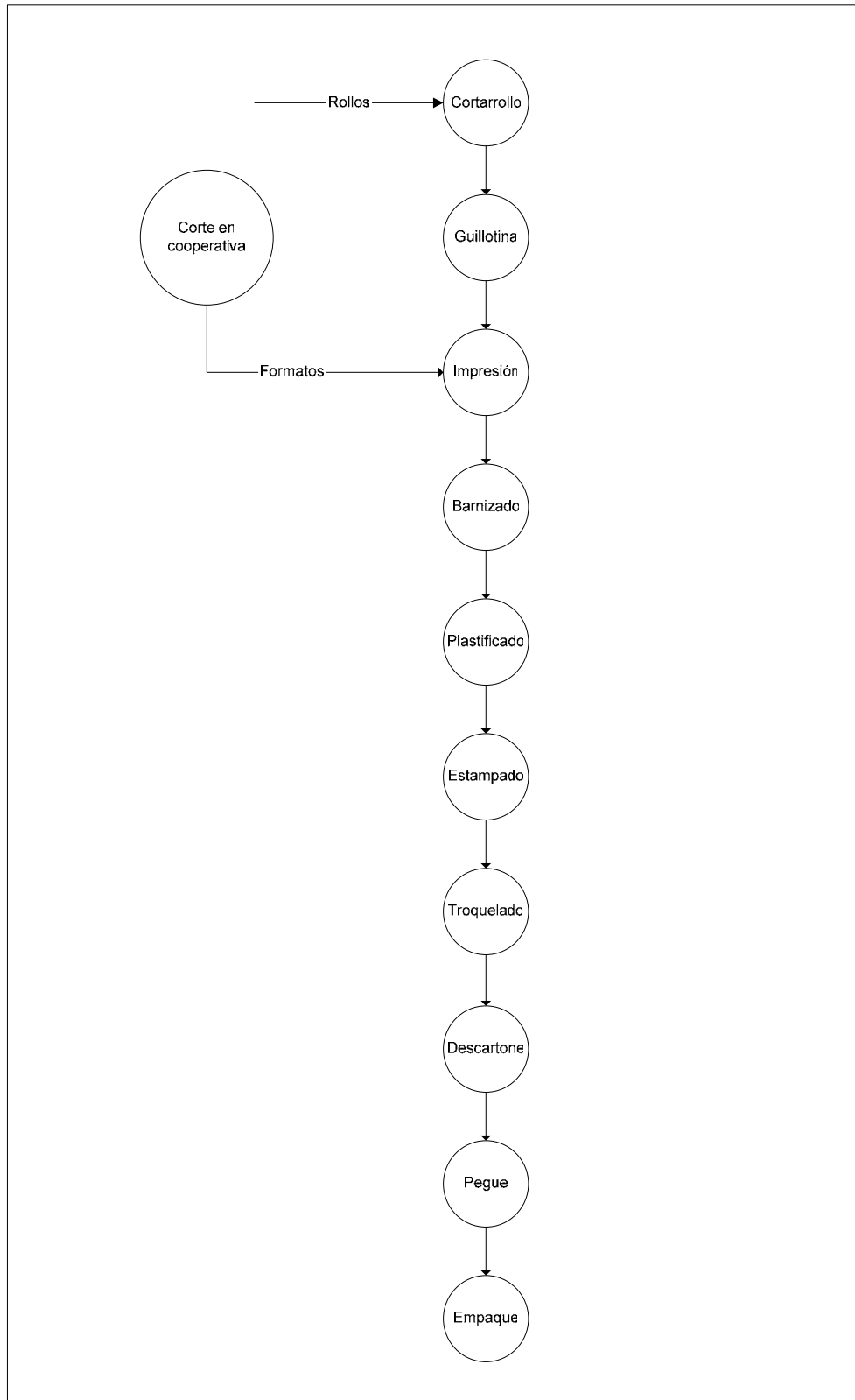
Las bobinas de cartón pueden estar en la empresa o en la bodega de la Cooperativa. La primera es cuando los rollos de cartón son muy pequeños y se consideran colillas de bobinas mucho más grandes ya procesadas en la cooperativa; la segunda es cuando a la empresa se le factura un rollo completo y se le mantiene en la Cooperativa.

Para ambas bodegas existe registro de los metros cuadrados aproximados que tiene cada bobina, y los movimientos de entrada y salida que ha tenido cada una de estas.

#### 6.2.2.4. Operaciones

El siguiente diagrama muestra el proceso productivo de la empresa, en este se pueden observar todas las operaciones posibles para cada uno de los productos de la empresa.

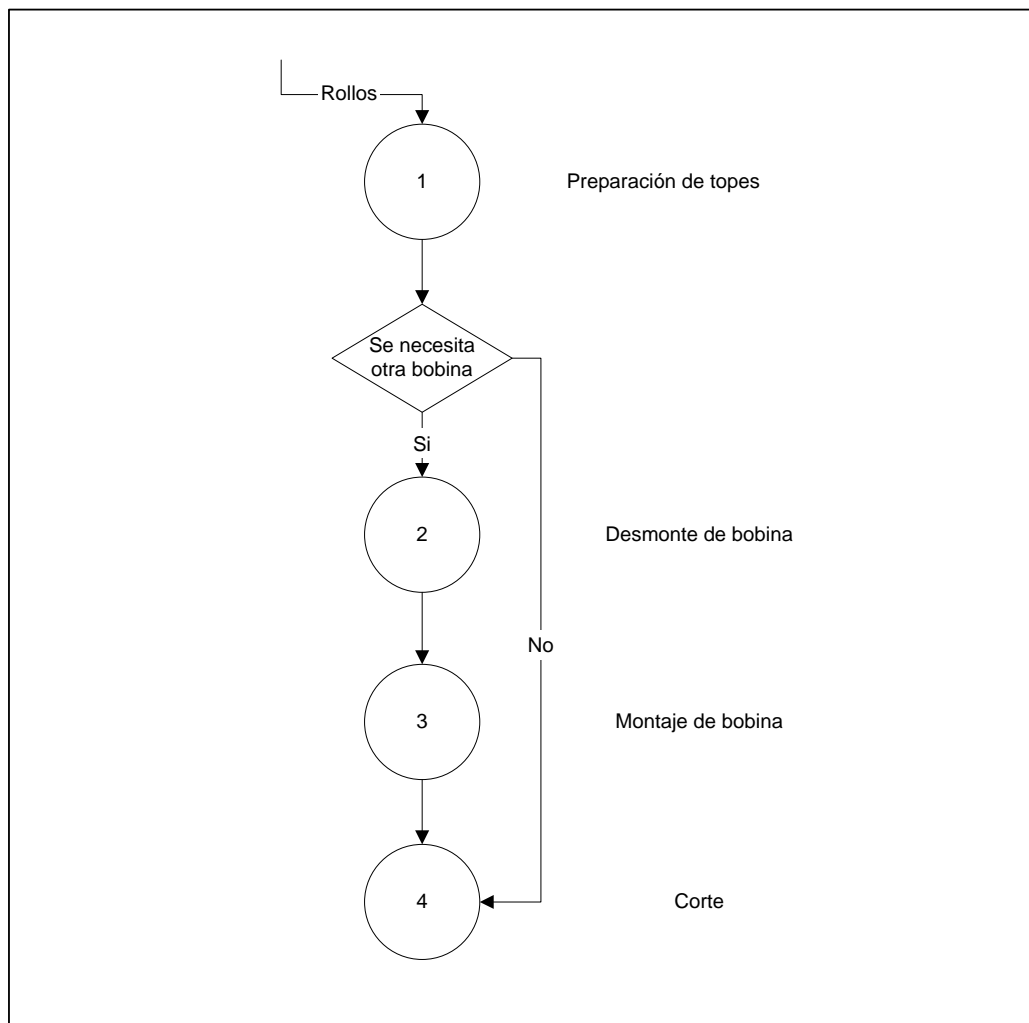
Cabe resaltar que no existe un artículo que tenga todas las operaciones mostradas en el diagrama.



**Figura 19** Diagrama de las operaciones y secuencia de producción en D'Cartón

### Cortarrollo:

Esta operación consiste en el corte de los rollos de cartón para transformarlos en pliegos (ver *figura 20*). Para esto el operario prepara unos topes dependiendo del largo requerido de los pliegos, luego acciona el motor que hace girar el rollo de cartón y alimenta la máquina para así bajar la cuchilla, cortar y obtener un pliego.



**Figura 20** Diagrama representativo de la operación Cortarrollo

Los elementos en que se divide esta operación son:

Elemento	Tipo
Preparación de topes	Preparación
Desmonte de Bobina	Preparación
Montaje de Bobina	Preparación
Corte	Producción

**Cuadro 11** Elementos de la operación Cortarrollo

### **Guillotina:**

Luego de haberse cortado el cartón en cortarrollo, este debe transformarse en formatos de trabajo listos para la impresión o troquelado. Este proceso se realiza en la máquina de guillotina.

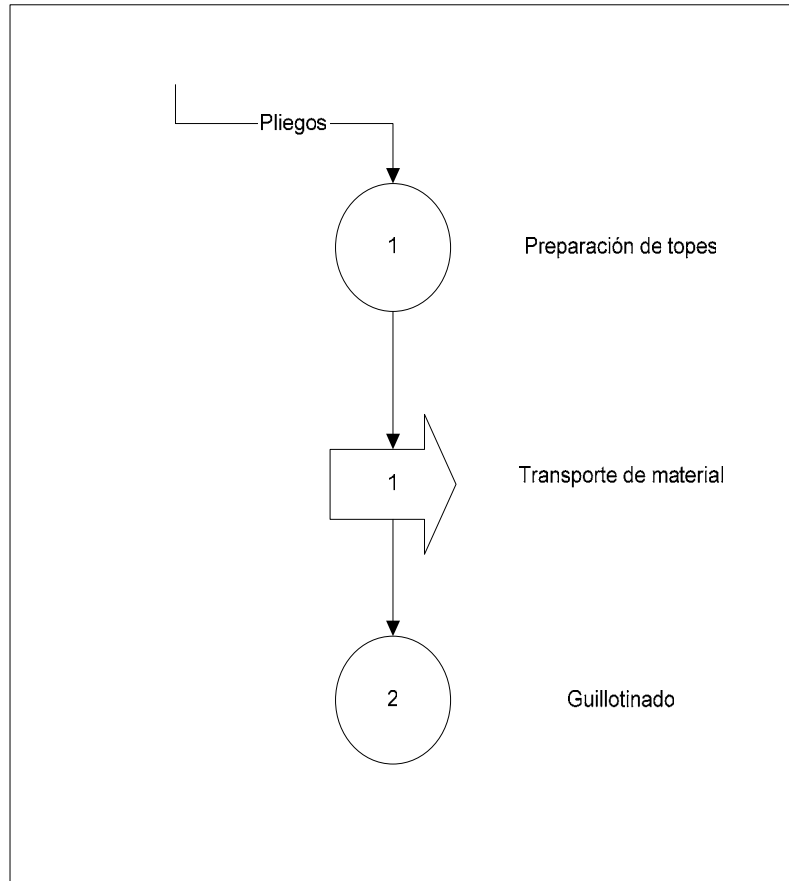
La operación consiste en el montaje de los pliegos de cartón en la guillotina, luego de haber preparado los topes para el corte. Una vez en la máquina, se accionan dos botones simultáneamente y la cuchilla desciende, cortando todos los pliegos. (ver figura 21)

No todos los pliegos caben en la bandeja de la máquina por lo que es necesario repetir el proceso varias veces dependiendo de la cantidad de producción.

Los elementos en que se divide esta operación son:

Elemento	Tipo
Preparación de topes	Preparación
Transporte de material	Producción
Corte	Producción

**Cuadro 12** Elementos de la operación de Guillotina



**Figura 21** Diagrama representativo de la operación Guillotina

**Impresión:**

Esta operación es la más importante de todas debido al elevado impacto que tiene en los costos y el tiempo de producción (ver *figura 22*).

El OFFSET es un sistema de impresión que usa placas de superficie plana. El área de la imagen a imprimir está al mismo nivel que el resto, ni en alto ni en bajo relieve, es por eso que se le conoce como un sistema planográfico. Se basa en el principio de que el agua y el aceite no se mezclan. El método usa tinta con base de aceite y agua. La imagen en la placa recibe la tinta y el resto la repele y absorbe el agua. La imagen

entintada es transferida a otro rodillo llamado mantilla, el cual a su vez lo transfiere al sustrato. Por eso se le considera un método indirecto.

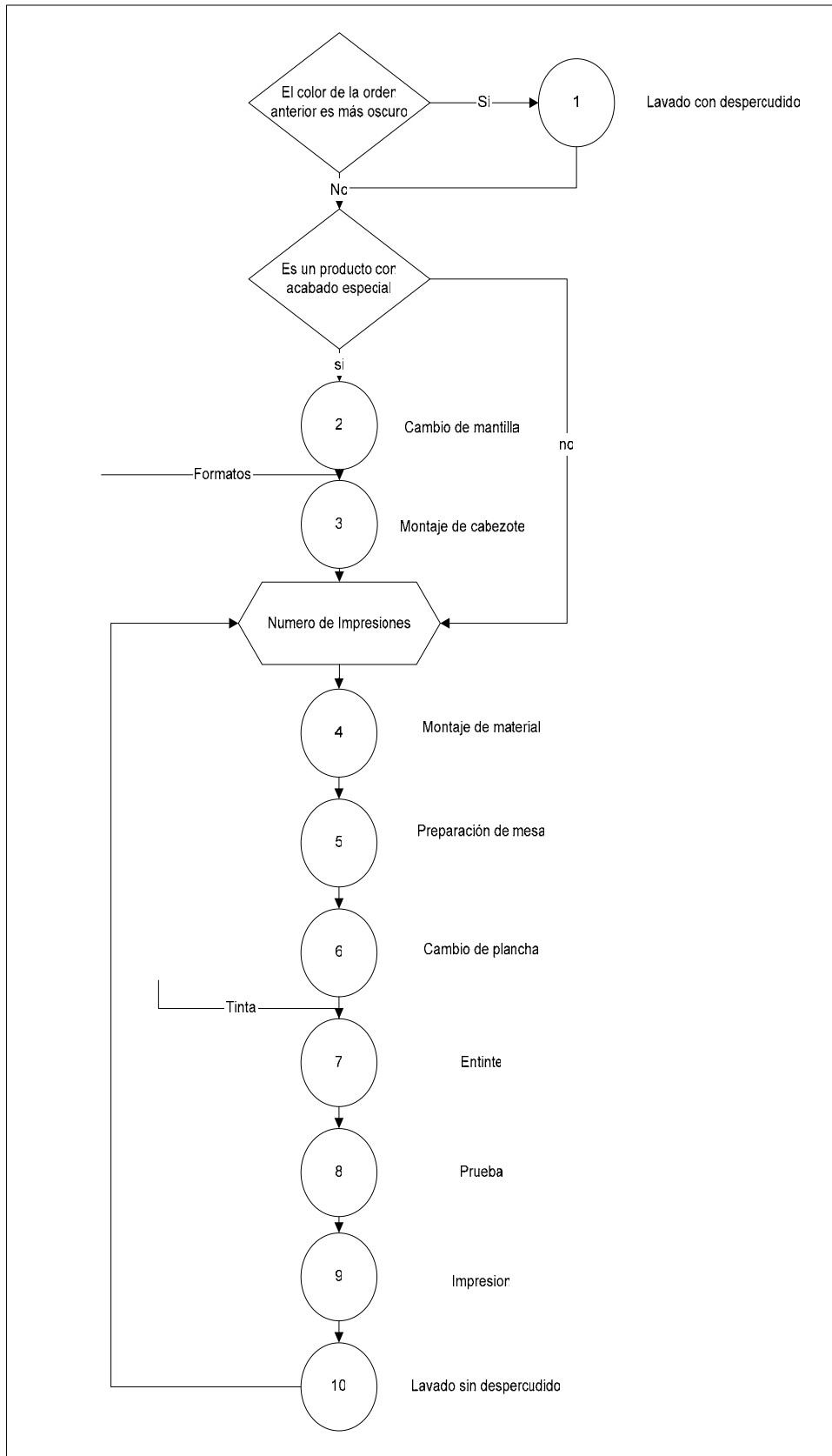
El número de impresiones que tiene un producto, define el número de pasadas que deben tener los formatos por la máquina litográfica. Por ejemplo, si se requieren cuatro colores (cyan, magenta, amarillo y negro) entonces son cuatro pasadas por la impresora.

Cada vez que se pasa un color en la litográfica, es necesario lavar la máquina; dependiendo del tipo de color precedente este proceso puede ser sin desperdicio o con desperdicio. Lo primero sucede cuando se pasa de un color claro a uno más oscuro, y lo segundo cuando es lo contrario.

Este es el proceso a grandes rasgos, los elementos en que se compone son:

Elemento	Tipo
Lavado sin desperdiciar	Preparación
Lavado con desperdicio	Preparación
Cambio de mantilla	Preparación
Cambio de plancha	Producción
Montaje de material	Producción
Montaje de cabezote	Producción
Preparación de la mesa	Producción
Entinte	Producción
Prueba	Producción
Impresión	Producción

**Cuadro13** Elementos de la operación Impresión.



**Figura 22** Diagrama representativo de la operación Impresión.

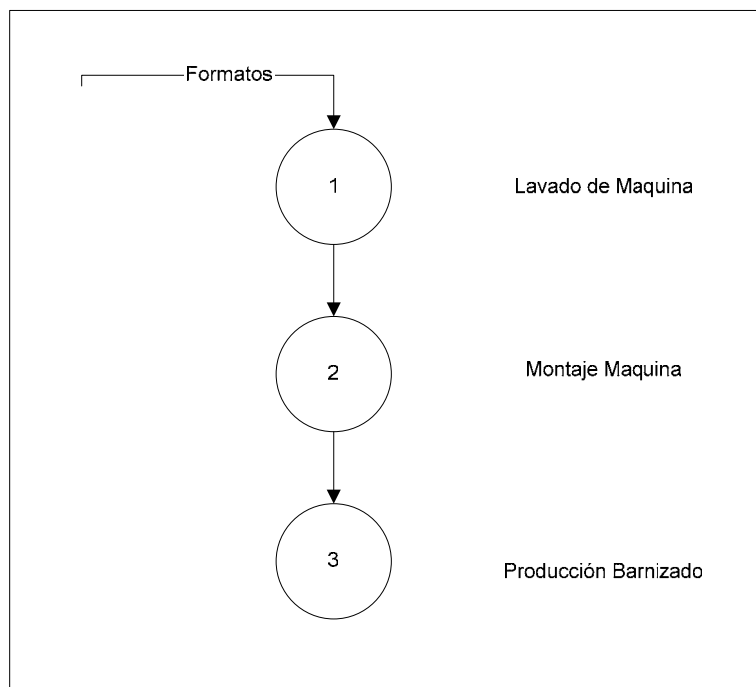
### **Barnizado:**

Es la aplicación de barniz, para que tras el proceso de impresión, se le de un valor agregado al producto con características anti-engrasantes e impermeables. El proceso inicia cuando el operario alimenta la máquina con los formatos generalmente ya impresos; estos pasan por una serie de resistencias, a la vez que se les aplica el barniz y salen por el extremo opuesto de la bandeja de entrada (ver *figura 23*).

Los elementos en los que se divide esta operación son:

Elemento	Tipo
Montaje máquina	Preparación
Lavado de máquina	Preparación
Barnizado	Producción

**Cuadro 14** Elementos de la operación Barnizado



**Figura 23** Diagrama representativo de la operación Barnizado

### **Plastificado y estampado:**

Son operaciones que se realizan fuera de la empresa, por lo que solo se considera el tiempo de respuesta de los terceros a los que se les envía el material a plastificar o estampar.

Tienen como fin dar un aspecto llamativo y de cuidado a las cajas de cartón.

### **Troquelado:**

Proceso de post-impresión, en el cual se recortan áreas del impreso previamente escogidas para obtener formas irregulares. Los troqueles son cuchillas afiladas de acero templado, fijadas con la figura deseada en tableros de madera.

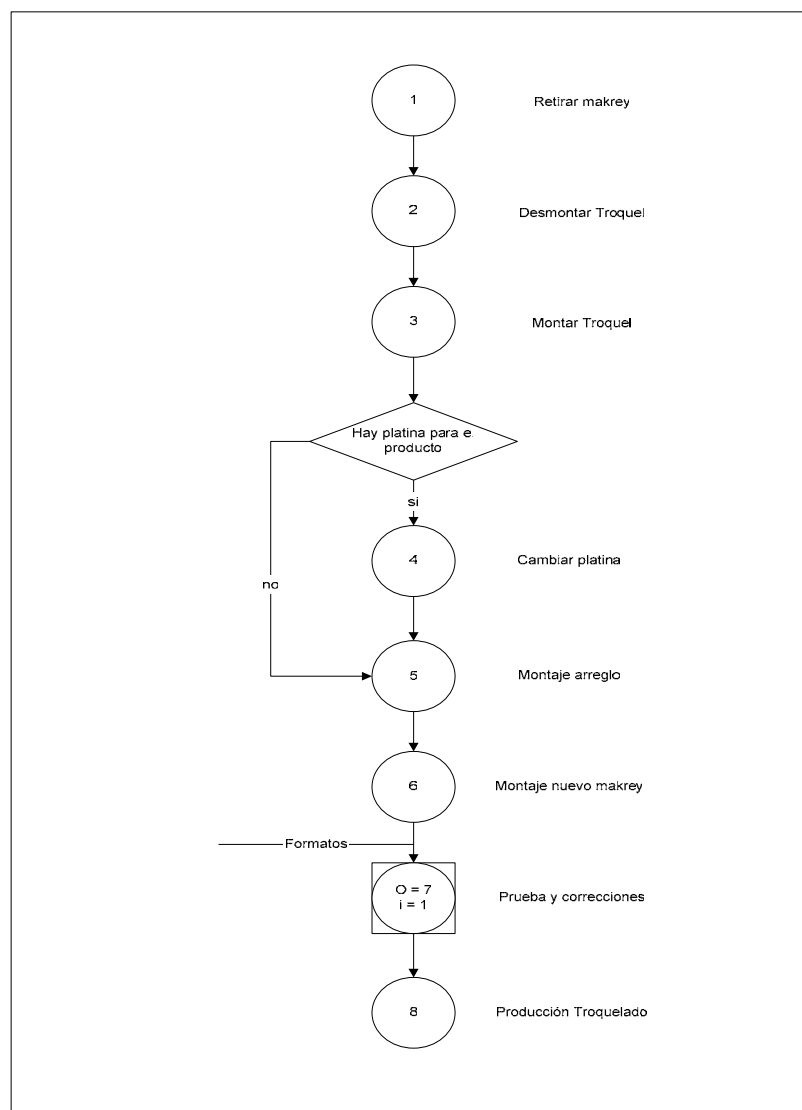
Todo empieza con el montaje del troquel que se ubica sobre la parte superior de la mandíbula de la máquina, luego se monta un arreglo con el fin de regular la presión ejercida y por último, se fabrica el makrey o “hembra” de la matriz (troquel), que marca el espacio en el que entran las cuchillas durante el cierre de la máquina y es de vital importancia para dar forma al formato de trabajo (ver *figura 24*).

Una vez preparados todos los elementos para el troquelado, se procede a accionar la máquina, realizar las pruebas correspondientes con algunos formatos e iniciar la producción.

Los elementos en los que se divide esta operación son:

Elemento	Tipo
Retirar Makrey	Preparación
Desmontar Troquel	Preparación
Montaje de Troquel	Preparación
Cambio de platina	Preparación
Montaje Arreglo	Preparación
Montaje nuevo makrey	Preparación
Prueba y correcciones	Producción
Troquelado	Producción

**Cuadro 15** Elementos de la operación Troquelado



**Figura 24** Diagrama representativo de la operación Troquelado

Además del conocimiento de todas las operaciones de la empresa, se indaga acerca de los códigos de las mismas. Son números de ocho dígitos, en donde los cuatro primeros son para distinguir la operación (cortarrollo, guillotina, etc.), luego uno para el tipo de operación (preparación o producción) y el resto son un consecutivo.

#### 6.2.2.5. Secuencia

Debido al sistema productivo de la empresa D'Cartón, que se trata de un Job Shop en donde no todos los productos siguen la misma secuencia y no existen retrocesos, conocer la secuencia de las operaciones toma importancia para iniciar la estructuración de las restricciones operativas del sistema y la información que alimenta el sistema experto.

La secuencia de cada artículo está definida desde el momento en que se diseña el producto, además, por simple deducción y análisis del diseño exigido por el cliente, puede determinarse que tipo de operaciones lleva y que secuencia sigue.

Se deben considerar el número y tipo de tintas que lleva cada producto para establecer la secuencia de colores que manejan las máquinas litográficas, ya que esto tiene un elevado impacto en el tiempo de preparación entre impresiones y por lo tanto en la programación de las actividades.

El software final debe considerar la secuenciación entre productos, estudiando si las herramientas y aditamentos (por ejemplo troqueles y planchas) utilizadas por un artículo en un centro de trabajo son las mismas para la orden de producción siguiente, lo que disminuye drásticamente el tiempo de preparación total. Por ejemplo, si hay dos órdenes que requieran el troquel F0056, se pueden programar juntas con el fin de reducir el tiempo de preparación de la segunda orden prácticamente a cero.

#### 6.2.2.6. Máquinas

La empresa cuenta con una serie de máquinas aptas para la producción de cajas de cartón de alta calidad.

Hoy en día se tienen las siguientes máquinas:

- Cortarrollo
- Guillotina
- 3 Litográficas tipo OFFSET
- Barnizadora
- 3 Troqueladoras

Tanto las máquinas litográficas, como las troqueladoras, tienen diferentes capacidades y velocidades de producción, por lo que se consideran independientes en el sistema experto y no como máquinas paralelas.

#### 6.2.2.7. Lote de Transferencia

Se considera que la empresa maneja un lote de transferencia completo, es decir que no se divide la cantidad definida en las órdenes de producción.

Actualmente no existe un operario que sirva de patín entre las estaciones de trabajo y ayude en el proceso de partición de lote, además debido a las grandes distancias existentes entre máquinas, el beneficio de transportar material por los mismos trabajadores es reducido, ya que deben abandonar la producción de su puesto para transportar el material a la operación siguiente.

Igualmente, las directivas tienen una política que prohíbe la partición del lote debido al deterioro de la calidad, ya que el proceso de preparación es muy variable y depende de muchos factores que alteran este procedimiento.

Asimismo, en la operación de impresión, la división de lote hace que aumente el tiempo de prueba por la dificultad de igualar los registros.

No obstante, el programa final debe estar en la capacidad de considerar en cualquier momento la partición de los lotes de producción, lo que mejora el tiempo de producción y los inventarios de trabajo en proceso.

#### 6.2.2.8. Tiempos de Producción y Respuesta

Una vez conocidas y definidas todas las operaciones y secuencias que deben seguir cada uno de los productos, y aprovechando la estandarización del proceso productivo, se pueden establecer los tiempos en cada uno de los centros de trabajo.

En la empresa, como se menciona anteriormente, se utiliza un proceso de medición de trabajo que consiste en registros diarios de la duración de cada uno de los elementos contenidos en las diferentes operaciones.

De esta manera, se cuenta con información real y actualizada constantemente para realizar la secuenciación y programación de actividades.

Tiempos de producción:

Los tiempos de producción dependen de la cantidad que va a ser procesada y son variables.

Tiempos de preparación:

Estos no dependen de la producción y la empresa los considera fijos. Sin embargo, estos son calculados por medio del mismo procedimiento del registro de las planillas.

En el código de cada una de las operaciones aparece, en el quinto dígito, el número uno (1) si se trata de actividades de preparación y dos (2) para las actividades de producción.

#### 6.2.2.9. Políticas de Inventarios

Respondiendo cada una de las preguntas establecidas en el modelo general propuesto, se obtuvieron los siguientes resultados:

La empresa pide cartón constantemente a la Cooperativa de Impresores del Oriente; cada vez que se genera una orden de producción que contenga aproximadamente más de 200 formatos, la gerencia decide enviar a cortar a la cooperativa por términos de costo y beneficio, aunque algunas veces, debido a los altos inventarios y poco porcentaje de carga de las máquinas de cortarrollo y guillotina, se prefiere cortar en la empresa.

Los pedidos se realizan por una cantidad equivalente al número de formatos requeridos para completar la producción, más un porcentaje de desperdicio estimado por los directivos. Además, se tiene asignado un campo en las órdenes de corte para aceptar un 10% más de la cantidad pedida, lo que genera un aumento de los inventarios de formatos en la empresa.

Se justifica enviar órdenes de corte a la cooperativa por la rapidez de entrega de los mismos, lo cual disminuye los tiempos de producción. Mientras el proveedor fabrica 20000 pliegos de cartón en un día, la empresa puede tardar tres días en realizar el mismo proceso.

Los inventarios se ubican en el tercer piso de la empresa por cuestiones de espacio, cabe mencionar que se tiene proyectada cambiar el lugar de sus instalaciones a mediados del año 2005.

La empresa no maneja inventarios de seguridad, aunque a principios de cada año adquiere bobinas de cartón para anticiparse al alza de precios anual que tiene la materia prima; estas bobinas facturadas son mantenidas en la bodega de la cooperativa y cuando se convierten en colillas son trasladadas a la empresa.

Afortunadamente, la materia prima no tiene costos de mantenimiento relevantes, más si existen costos de oportunidad asociados. El manejo constante de las bobinas de cartón aumenta el porcentaje de desperdicio, ya que se dañan las primeras vueltas del rollo, por lo que estas se dejan en un solo sitio y se mueven únicamente cuando son necesarias para la producción.

#### 6.2.2.10. Recepción y Despacho

La recepción de las materias primas se hace directamente al piso de producción, aproximadamente dos días después de enviadas las órdenes de corte a la Cooperativa. Los formatos y colillas de cartón llegan en un camión y son recibidas por varios de los operarios de la empresa.

Los formatos son ubicados inmediatamente al lado de las máquinas litográficas o troqueladoras que los requieran, por lo que no es necesario subir al segundo piso (Bodega) por estos insumos. Esto debe ser considerado a la hora de secuenciar y programar las actividades, ya que una vez pasados los días planeados para la entrega, el software debe reconocer que las materias primas están disponibles y es posible iniciar la producción.

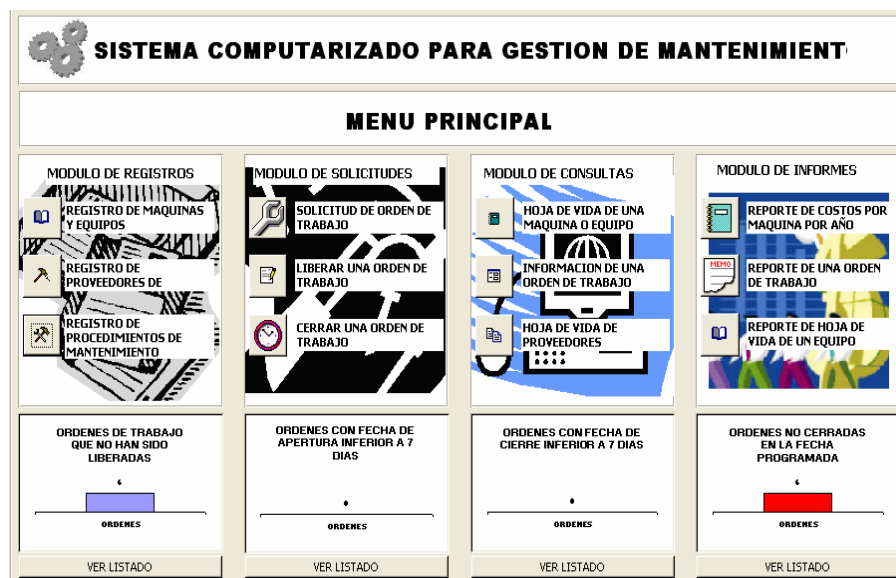
Lo mismo ocurre con la recepción de los productos luego de ser enviados a plastificar o estampar por fuera de la empresa, la diferencia radica en el tiempo de entrega que es aproximadamente un día.

Con respecto al despacho de las mercancías de la empresa, este es un proceso muy variable y depende de los acuerdos que haga el cliente con el

departamento de ventas de la empresa. Muchas veces luego de finalizadas las órdenes de producción, estas son inventariadas y retenidas en bodega. Cabe mencionar que este proceso no tiene impacto alguno en la solución final que se desea obtener y solo funciona como indicador del cumplimiento a los clientes.

#### 6.2.2.11. Programas de Mantenimiento

La empresa cuenta con aplicaciones (ver *figura 25*), por medio de las cuales se maneja de manera racional los aspectos de mantenimiento, historial y estado de sus máquinas, teniendo como filosofía el mantenimiento preventivo.



**Figura 25** Sistema para Gestión del Mantenimiento D'Cartón Ltda.

Estos programas permiten la revisión de hojas de vida de las máquinas y proveedores de mantenimiento, registrar nuevas máquinas en el sistema y procedimientos de mantenimiento. El sistema experto debe estar en capacidad de considerar las máquinas inactivas por razones de mantenimiento y excluirlas de la programación.

#### 6.2.2.12. Clientes

El número de clientes en la empresa es elevado, se cuentan con registros de más de 160 clientes y anualmente este valor aumenta en un porcentaje significativo.

Para el sistema experto es importante saber la prioridad que tiene cada uno de los trabajos a secuenciar. Aunque en las políticas de la empresa, se plasma el interés de satisfacer a todos sus clientes, es claro que algunos tienen un mayor grado de importancia ya que generan el mayor porcentaje de ventas para la empresa. Por razones de seguridad y privacidad de la información, la empresa se reserva los nombres de estos clientes y no son mencionados en la investigación.

#### 6.2.2.13. Restricciones Gerenciales y del Sistema

Como punto final del conocimiento profundo del sistema productivo, es necesario establecer por medio del estudio de cada uno de los aspectos anteriormente explicados, las restricciones gerenciales (ver *cuadro 16*) y operativas (ver *cuadro 17*) y del sistema en general que deben ser tenidas en cuenta para el modelo utilizado en el motor de inferencia del sistema experto.

#### **Restricciones Gerenciales**

Un orden de producción no puede ser realizada en dos máquinas del mismo tipo.

El lote de transferencia, de una estación de trabajo a otra, debe ser el total de unidades pedidas.

Las actividades no pueden ser interrumpidas una vez han sido iniciadas.

Deben respetarse los tipos de corte para cada producto, siguiendo el orden de cada uno de estos.

**Cuadro 16** Restricciones Gerenciales de D'Carton Ltda.

### **Restricciones Operativas**

Todo producto debe seguir una determinada secuencia de operaciones.

Un producto no puede volver al centro de trabajo donde ya fue procesado.

Una máquina no puede hacer más de un producto al mismo tiempo (Restricciones de capacidad).

Debe respetarse la secuencia de colores establecida en la orden de producción.

**Cuadro 17** Restricciones Operativas de D'Carton Ltda.

### **6.3. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LA TOMA DE DECISIONES**

Para el reconocimiento de las fuentes y canales de información de interés y el proceso de toma de decisiones en la empresa para la programación operativa fue necesaria la asistencia durante meses a la empresa con el fin de hacer seguimiento a las acciones de la gerente encargada del área de producción. Los aspectos de interés se centraron en:

- Políticas de Calidad: Para D'Carton es de vital importancia ofrecer soluciones de empaque y diseño de los mismos bajo exigentes estándares de calidad.
- Políticas de cumplimiento: El cumplimiento de las fechas pactadas es un aspecto que toma importancia desde el punto de vista organizativo, ya que garantiza el posicionamiento dentro del mercado local.
- Prioridad de los pedidos: La prioridad de los pedidos se asocia a la forma de pago de los clientes. Los pedidos de mayor prioridad son aquellos en los que el pago se ha hecho por anticipado. La prioridad también depende de la historia crediticia y cumplimiento de los pagos por parte de los clientes.

- Secuencia de los pedidos: La secuencia en que se programan los pedidos depende de la fecha de entrega pactada y de la prioridad asociada.
- Políticas de Inventarios. El insumo más significativo dentro del sistema productivo es el cartón, por lo tanto se hace énfasis en el manejo de este. Se puede observar que la empresa cuenta con un solo proveedor de esta materia prima y que se la suministra en forma de bobinas o en formatos ya cortados si la orden de corte es mayor de 200 unidades.

Así mismo, al querer emular la forma de actuar del experto, se deben simultáneamente evaluar los procedimientos desarrollados por el mismo con el fin de proponer mejoras e introducirlas en el sistema. De esta manera se evita la introducción de reglas erróneas a la base de conocimiento y se garantizan una simulación con alto grado de veracidad.

#### **6.4. ETAPA 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO**

El interés de las directivas de D'Cartón y de los investigadores es la minimización del Retraso Total Ponderado, por lo tanto se plantea la siguiente función objetivo:

$$FO \quad Min \sum_{i=1}^n WiLi$$

Esta función objetivo esta sujeta a restricciones de tipo operativo (de secuencia y de capacidad) y de tipo gerencial (particularidades de la empresa)

La principal restricción operativa es la de secuencia en la que cada producto tiene una secuencia inalterable que debe cumplirse (ver *cuadro 18*). Además, en un Job Shop los productos no regresan a los centros de trabajo que ya han sido visitados.

Restricciones de secuencia o tecnológicas	
Operación	Predecesora
Cortarrollo	--
Guillotina	Cortarrollo
Impresión	Guillotina
Barnizado	Impresión
Plastificado	Barnizado
Troquelado	Plastificado

**Cuadro 18** Restricciones de Secuencia en D'Carton

El cuadro plantea la restricción de capacidad dada por los centros de trabajos.

Restricciones de Capacidad
Cada máquina $M_j$ solo puede procesar un pedido o trabajo $J_i$ a la vez en un intervalo de tiempo.

**Cuadro 19** Restricciones de Capacidad de D'Carton

Además de estas restricciones existen otras restricciones operativas que determinan en que máquina litográfica o troqueladora puede elaborarse el producto, estas hacen relación al tamaño del formato de impresión así como la presión necesaria del corte en troqueladora.

El otro tipo de restricción son las referentes al ámbito gerencial de la empresa (ver apartado 6.2.2.13), con las cuales se garantizan niveles de calidad deseados por la organización, por ejemplo se restringe la posibilidad de dividir las operaciones de impresión de un producto y asignarlas a diferentes equipos. Aunque técnicamente es posible hacerlo, la antigüedad y dificultad en la calibración de los equipos, convierten esta opción en impracticable y no garantiza la uniformidad de la calidad del producto final.

## 6.5. ETAPA 4: SOLUCIÓN DEL MODELO

Debido a la complejidad del problema en cuestión, ya que D'Cartón cuenta con nueve máquinas y que por lo general se deben secuenciar más o menos 15 trabajos u órdenes de producción a la vez, se decide escoger una técnica de aproximación heurística, por lo cual se aplica a este problema el conjunto de heurísticas propuestas en el *apartado 5.5.* .

Antes de la aplicación de estos procedimientos, es necesario realizar una asignación a ciertos productos que pueden fabricarse en varias máquinas del mismo tipo, por ejemplo, pueden imprimirse en la litográfica 1 y la litográfica 3, o troquelarse en la troqueladora 2 y troqueladora 4. Para cumplir con la restricción gerencial que un artículo no puede ser procesado en dos máquinas al mismo tiempo (por cuestiones de calidad), se decide enviar el producto a la máquina que tenga menos carga de trabajo al momento de la programación de la producción y secuenciación de actividades. Actualmente, esta es la forma de proceder de la gerente de producción, por lo que se intenta, en este caso, adaptar el sistema experto a la toma de decisiones existente en la empresa.

Para la heurística del Shifting Bottleneck o cuello de botella móvil, se consideran las nueve máquinas en el taller de trabajo, estas son:

- Cortarrollo
- Guillotina
- Litográfica 1
- Litográfica 2
- Litográfica 3
- Barnizadora
- Troqueladora 2
- Troqueladora 3
- Troqueladora 4

Los tiempos de entrega (due dates) para cada máquina son calculados a partir de las fechas de entrega pactadas con los clientes restándole el tiempo de procesamiento de las operaciones restantes. Además, debido a la decisión de no secuenciar las actividades de pegue, descartone y empaque se restan dos días más a las fechas de entrega correspondientes a la duración promedio de estas operaciones.

Los tiempos de liberación (*release dates*) son calculados con base en los tiempos de procesamiento de cada orden y los tiempos de entrega de materia prima por parte de la Cooperativa de Impresores.

Cada vez que una nueva máquina es considerada como cuello de botella y secuenciada (Es decir que tiene el mayor retraso total máximo ponderado), los tiempos de entrega y de liberación deben ser recalculados para cada máquina considerando que se debe cumplir con las secuencias establecidas para las máquinas ya secuenciadas como cuellos de botella.

De esta manera la heurística busca subordinar la secuencia de las máquinas en el vector ***M-Mo***, con respecto a los cuellos de botella (Vector ***Mo***) que pueden presentarse de manera jerárquica. A fin de cuentas la heurística considera todas las máquinas como recursos restrictivos.

Para reducir los tiempos de análisis computacional y disminuir el número de iteraciones, la propuesta del modelo presenta la solución de aplicar recocido simulado para encontrar la secuencia con el menor retraso total ponderado por máquina.

Para el recocido simulado deben establecerse ciertos parámetros que pueden variar de empresa a empresa. Estos son:

- Porcentaje de mejora permitido entre soluciones (***Pm***)
- Número de ciclos por cada cambio de temperatura

- Número de cambios de temperatura
- Factor de disminución de la temperatura

Cabe mencionar que la definición de estos valores se obtiene gracias a la prueba y error. Es decir que se van intentando varias combinaciones hasta llegar a la que arroja mejores resultados.

La solución inicial del Recocido Simulado se obtiene a partir de la heurística de los trabajos tardíos o Tardy Jobs, tal como lo propone el método de solución planteado en el *apartado 5.5.2*. Esta heurística no trae mayores complicaciones, siendo de fácil aplicación y muy efectiva.

## **6.6. ETAPA 4: VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE SOLUCION**

Para fines de esta investigación, se comprueba la validez de los resultados arrojados por la aplicación desarrollada para la empresa Impresos y Empaques de Cartón LTDA por medio del desarrollo de la heurística del Shifting Bottleneck combinada con Recocido Simulado, con los resultados del software ILOG, propiedad de la Universidad Industrial de Santander. Cabe mencionar que las heurísticas aplicadas en la empresa intentan llegar a una secuencia muy cercana al óptimo, mientras ILOG garantiza el óptimo en la solución final.

El software ILOG utiliza el lenguaje de programación optimizada (OPL<sup>51</sup>), el cual busca simplificar la resolución de los problemas de optimización por medio de la programación lineal, entera y optimización combinatoria.

---

<sup>51</sup> Por sus siglas en Inglés Optimization Programing Language. Tomado de: ILOG OPL STUDIO 3.0. Reference Manual, Massachusetts Institute of Technology MIT, 1999. p.1

El software tiene la ventaja que ofrece apoyo en la construcción de las restricciones por medio de notaciones algebraicas y combinaciones lógicas de restricciones

A continuación se analizan y comparan las soluciones para dos casos representativos de la situación real del sistema productivo.

**CASO 1:**

Primero se decide verificar los datos arrojados por las heurísticas con un número pequeño de productos. En total se escogen 8 productos basándose en características como cantidad de operaciones y secuencia.

Los datos del problema dados en segundos son los siguientes:

Trabajos	CR	G	L1	L3	T3	T4	Fecha de Entrega
0					13418.5		115200
1			40879			15162	172800
2			7945.5			13418.5	115200
3	6020	5994	14868		9931.5		172800
4				14868		9931.5	172800
5	4395	4169	14868		9931.5		172800
6				23943	8188		86400
7				23943	8188		86400

**Cuadro 20** Datos para validación del caso 1.

Luego de realizar varias corridas del mismo problema los resultados son los siguientes:

CORRIDA	$\Sigma$ Lmáx (seg)	TIEMPO (Aprox en min)	SEC M1	SEC M2	SEC M3	SEC M5	SEC M8	SEC M9
1	-279551.5	12	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1
2	-279551.5	12	5,3	5,3	2,1	5,3,4,7,6	5,3,0,7,6	2,4,1
3	-279551.5	12	5,3	5,3	2,1	5,3,4,7,6	5,3,0,7,6	2,4,1
4	-279551.5	13	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1
5	-279551.5	13	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1
6	-279551.5	13	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1
7	-279551.5	13	5,3	5,3	2,1	5,3,4,7,6	5,3,0,7,6	2,4,1
8	-279551.5	12	5,3	5,3	2,1	5,3,4,7,6	5,3,0,7,6	2,4,1
9	-279551.5	13	5,3	5,3	2,1	5,3,4,7,6	5,3,0,7,6	2,4,1
10	-279551.5	12	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1

**Cuadro 21** Resultados de las corridas arrojadas por la aplicación para el caso 1.

Se decide terminar el número de corridas ya que siempre se encuentra la misma solución para este problema.

Posteriormente, teniendo los datos arrojados por los procedimientos heurísticos, se trata el problema con el Software ILOG OPL STUDIO 3.0, el cual llega a la secuencia que alcanza el óptimo, es decir que obtiene el mínimo retraso total ponderado.

La solución óptima para este problema es la siguiente<sup>52</sup>:

$\Sigma$ Lmáx (seg)	SEC M1	SEC M2	SEC M3	SEC M5	SEC M8	SEC M9
-279551.5	5,3	5,3	2,1	5,3,4,6,7	5,3,0,6,7	2,4,1

**Cuadro 22** Resultados arrojados por ILOG para el caso 1.

Comparando los valores, se tiene que el desempeño del modelo propuesto es excelente en este problema, ya que se llega a la misma solución un número repetido de veces. A medida que los problemas son más grandes, el número

<sup>52</sup> El código generado para la programación en el Software ILOG de este problema se encuentra en el Anexo A.

de combinaciones aumenta drásticamente, por lo que el desempeño de las heurísticas sigue siendo bueno, pero lógicamente no garantizan el óptimo.

El papel del ingeniero en este tipo de situaciones, no es basar las decisiones únicamente en los resultados arrojados por un software u otro, sino analizar la solución propuesta por la aplicación y evaluar posibles alternativas que mejoren la respuesta adaptándola a las situaciones del taller de trabajo.

En el siguiente caso, no se garantiza la solución óptima por medio del desarrollo de las tres heurísticas propuestas, pero si se llega a un resultado bueno.

**CASO 2:**

El número de trabajos aumenta a 20 y se incluye una máquina más bajo consideración (T2). Los datos de los tiempos de procesamiento en cada maquina dados en segundos, se pueden observar en el *cuadro 23*.

Trabajos	CR	G	LA	LB	TA	TB	TC	Fechas de entrega (seg)
0	4395	4169		14868		9931.5		201600
1				14868		9931.5		201600
2	6020	5994		14868		9931.5		201600
3			36645				13418.5	230400
4			7945.5				13418.5	259200
5						15162		230400
6				23943		8188		230400
7				23909			8188	230400
8	2770	2344		23943		8188		230400
9				23943			8188	230400
10			18347		8188			172800
11			18347				8188	172800
12			37400		11675			288000
13				37400			11675	288000
14					9931.5			201600
15				29539		11675		201600
16				28177		9931.5		316800
17	3582.5	3256.5		28177			9931.5	316800
18			43751		13418.5			374400
19			43751				13418.5	374400

**Cuadro 23** Datos para la validación del caso 2.

Los resultados arrojados por las heurísticas desarrolladas en la empresa son los siguientes:

<b>CORRIDA 1</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	17,8,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,10,11,3,12,19,18
L3	15,1,2,0,8,7,9,6,13,16,17
T2	14,10,12,18
T3	0,5,15,8,2,1,6,16
T4	4,3,11,7,9,17,19,13
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -446850.104</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 8</b>  <b>Tiempo = 20 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 5</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 500</b></p>	

**Cuadro 24** Resultados arrojados por la primera corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 2</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	0,2,8,17
G	0,2,17,8
L1	4,11,10,12,3,18,19
L3	17,2,8,0,1,7,15,6,16,13,9
T2	14,10,12,18
T3	1,2,8,15,0,6,5,13
T4	11,3,7,9,4,17,13,19
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -779178.219</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 3</b>  <b>Tiempo = 40 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 5</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 2500</b></p>	

**Cuadro 25** Resultados arrojados por la segunda corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 3</b>	
<b>MÁQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	0,17,2,8
G	0,2,8,17
L1	11,4,10,3,18,12,19
L3	2,8,17,1,0,13,7,16,15,6,9
T2	14,10,18,12
T3	2,8,0,5,1,15,6,13
T4	13,11,4,3,7,9,17,19
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -1144777.732</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 3</b>  <b>Tiempo = 20 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 4</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 2500</b></p>	

**Cuadro 26** Resultados arrojados por la tercera corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 4</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	0,2,8,17
G	0,2,8,17
L1	11,4,10,3,18,12,19
L3	2,8,17,1,0,13,7,16,15,6,9
T2	14,10,18,12
T3	2,8,0,5,1,15,6,16
T4	13,11,4,1,7,9,17,19
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -1140576.488</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 3</b>  <b>Tiempo = 95 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 5</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 20000</b></p>	

**Cuadro 27** Resultados arrojados por la cuarta corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 5</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	8,17,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,11,10,3,12,19,18
L3	8,0,17,2,1,16,6,7,9,13,15
T2	14,10,12,18
T3	8,0,5,2,1,16,6,15
T4	17,4,7,9,11,13,3,19
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -1673110.104</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 2</b>  <b>Tiempo = 180 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 7</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 35000</b></p>	

**Cuadro 28** Resultados arrojados por la quinta corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 6</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	8,17,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,11,10,3,12,19,18
L3	15,1,2,0,8,7,6,9,13,16,17
T2	14,10,12,18
T3	5,2,1,8,15,0,16,6
T4	4,11,19,3,7,9,13,17
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -1711537.22</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 2</b>  <b>Tiempo = 164 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 7</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 35000</b></p>	

**Cuadro 29** Resultados arrojados por la sexta corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 7</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	8,17,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,10,11,3,15,19,18
L3	15,1,2,0,7,6,8,9,13,16,17
T2	14,10,12,18
T3	5,2,0,15,1,8,6,16
T4	4,11,3,7,19,9,17,13
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -788561.232</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 3</b>  <b>Tiempo = 220 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 7</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 35000</b></p>	

**Cuadro 30** Resultados arrojados por la séptima corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 8</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	8,17,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,11,10,3,12,19,18
L3	15,1,2,0,8,7,9,6,13,16,17
T2	14,10,12,18
T3	5,0,8,2,1,15,6,16
T4	4,11,3,7,9,19,17,13
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -717113.73</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 3</b>  <b>Tiempo = 300 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 7</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 35000</b></p>	

**Cuadro 31** Resultados arrojados por la octava corrida para el CASO 2

<b>CORRIDA 9</b>	
<b>MAQUINA</b>	<b>SECUENCIA</b>
CR	8,17,0,2
G	8,17,0,2
L1	4,11,10,3,12,18,19
L3	0,2,17,8,6,7,9,15,1,16,13
T2	14,10,12,18
T3	0,2,8,5,6,15,1,16
T4	4,17,3,11,7,9,13,19
<p><b><math>\Sigma L_{\text{máx}} = -1594618.99</math> segundos</b>  <b>Trabajos Tardíos = 2</b>  <b>Tiempo = 276 minutos</b>  <b>Cambios de temperatura = 7</b>  <b>Iteraciones por temperatura = 35000</b></p>	

**Cuadro 32** Resultados arrojados por la novena corrida para el CASO 2

Como se observa, a medida que se corre el modelo se hacen algunas variaciones a los parámetros del recocido simulado para intentar mejorar el desempeño del mismo y obtener soluciones más cercanas al óptimo.

Se decide detener las corridas y probar el problema en ILOG OPL STUDIO 3.0<sup>53</sup>.

Luego de más de 2 días y medio corriendo de manera continua, ILOG no se detiene y sigue intentado obtener la secuencia óptima que disminuya el retraso total máximo. El mejor valor arrojado luego de este tiempo equivale a **-1910205** segundos, por lo que se puede llegar a decir que los datos resultantes del Software de la empresa D'Cartón, luego de ciertos cambios en los parámetros del recocido simulado, son buenos.

<sup>53</sup> El código generado para este caso se encuentra en el anexo B.

A medida que se aumenta el número de iteraciones por temperatura del recocido simulado, se incrementa el tiempo de computación y la probabilidad de tener una respuesta final de alta calidad, por lo que es decisión de los directivos de la empresa equilibrar estos parámetros. Pueden existir empresas que deseen elevar el número de iteraciones con el fin de obtener soluciones cercanas al óptimo, como pueden existir otras que disminuyan este valor teniendo en cuenta el impacto que tiene en la secuencia final, pero siendo más analistas a la hora de estudiar los resultados finales.

Además si se tiene en cuenta las unidades del criterio de minimización en este caso (segundos), la diferencia entre la solución óptima y la solución heurística puede ser percibida por algunas empresas como irrelevante. En estos casos se recomienda trabajar unidades como minutos, horas e incluso días, dependiendo de las características del sistema productivo.

Igualmente, si se observan los datos arrojados por la aplicación de las heurísticas, se revela que a medida que disminuye el retraso total ponderado, los trabajos tardíos pueden permanecer constantes, siendo esto indicio de la aceptación de soluciones que a simple vista pueden parecer regulares, pero con las cuales se cumple con las fechas de entrega pactadas con anterioridad. Aunque esto no quiere decir que el criterio del retraso total ponderado sea débil y poco robusto, ya que entregas más tempranas a los clientes significan en muchos casos una ganancia en la imagen y confiabilidad hacia la empresa.

En los casos anteriores, se han considerado todos los pedidos o trabajos con la misma prioridad, por lo que se presenta a continuación, un pequeño modelo con prioridades diferentes para cada orden de producción.

### **CASO 3:**

En este caso, los trabajos se agrupan en tres categorías según su prioridad, estas son: Trabajos con prioridad alta, trabajos con prioridad media y trabajos con prioridad baja.

El factor de ponderación se considera 100, 10 y 1 para alto, medio y bajo respectivamente. Los parámetros para el recocido simulado, luego de tener la experiencia del desempeño de la aplicación en los casos anteriores, se establecen así:

- Cambios de temperatura: 10
- Iteraciones por temperatura:
  - Menos de cuatro productos: 50
  - Entre cinco y seis productos: 200
  - Entre siete y ocho productos: 1000
  - Entre nueve y diez productos: 1500
  - Más de once productos: 2000
- Factor de disminución de temperatura ( $\alpha$ ) = 0.85

Los datos del problema son los siguientes:

Trabajos	CR	G	LA	LB	TA	TB	TC	Fechas de entrega	Prioridad
0	4395	4169		14868		9931.5		201600	Media
1				14868		9931.5		201600	Baja
2	6020	5994		14868		9931.5		201600	Alta
3			36645				13418.5	230400	Baja
5						15162		230400	Media
6				23943		8188		230400	Baja
8	2770	2344		23943		8188		230400	Alta
10			18347		8188			172800	Media
11			18347				8188	172800	Alta
14					9931.5			201600	Alta
15				29539		11675		201600	Media

**Cuadro 33** Datos en segundos para la validación del caso 3.

Luego de algunas corridas los resultados arrojados son:

CORRIDA	$\Sigma (w_i * L_{m\acute{a}x})$ (seg)	TIEMPO (Aprox en min)	SEC M1	SEC M2	SEC M3	SEC M5	SEC M7	SEC M8	SEC M9
1	-53665589	3	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
2	-53665589	3.5	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
3	-53665589	3	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
4	-31832794.5	2.5	8,2,0	2,0,8	11,10,3	8,2,15,1,6,0	14,10	8,2,15,1	0,5,11,6,3
5	-53665589	2.5	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
6	-53665589	3	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
7	-51754241	2	8,2,0	2,0,8	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3
8	-52256874	2	8,2,0	2,0,8	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	8,2,1,15	0,5,11,6,3
9	-52456328	2	8,2,0	2,0,8	11,10,3	2,8,0,15,1,6	14,10	8,2,1,15	0,5,11,6,3
10	-53665589	2	8,2,0	8,2,0	11,10,3	8,2,0,15,1,6	14,10	2,8,1,15	0,5,11,6,3

**Cuadro 34** Resultados de las corridas arrojadas por la aplicación para el caso 3

Luego de 10 corridas, la mejor secuencia que se obtiene tiene un retraso total ponderado de **-53665589** segundos. Este valor se repite en seis del total de corridas realizadas.

El problema en ILOG OPL STUDIO 3.0 llega a la siguiente solución óptima<sup>54</sup>:

$\Sigma (w_i * L_{m\acute{a}x})$ (seg)	SEC M1	SEC M2	SEC M3	SEC M5	SEC M7	SEC M8	SEC M9
-56951928	2,8,0	2,8,0	11,10,3	2,8,0,15,16	14,10	2,8,15,1	0,5,11,6,3

**Cuadro 35** Resultados arrojados por ILOG para el caso 3.

El hecho de diferenciar los productos según la prioridad asignada, hace que se presione al sistema para terminar primero los productos con mayor ponderación. De todas maneras pueden presentarse casos en donde un producto con prioridad menor sea secuenciado antes que uno de mayor prioridad, ya que esto depende del retraso que tiene el trabajo con respecto su fecha de entrega.

<sup>54</sup> El código generado para este caso se encuentra en el Anexo C

## 6.7. ETAPA 6: ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO

### 6.7.1. Base de Hechos

Para la construcción de este módulo, se utiliza la información recolectada en el paso de caracterización del sistema productivo.

El software utilizado para la creación de las bases de datos es INSTANT DATABASE (IDB), que además de ser gratuito presenta alta compatibilidad con los lenguajes JAVA y las paginas JSP (ver figura 26).

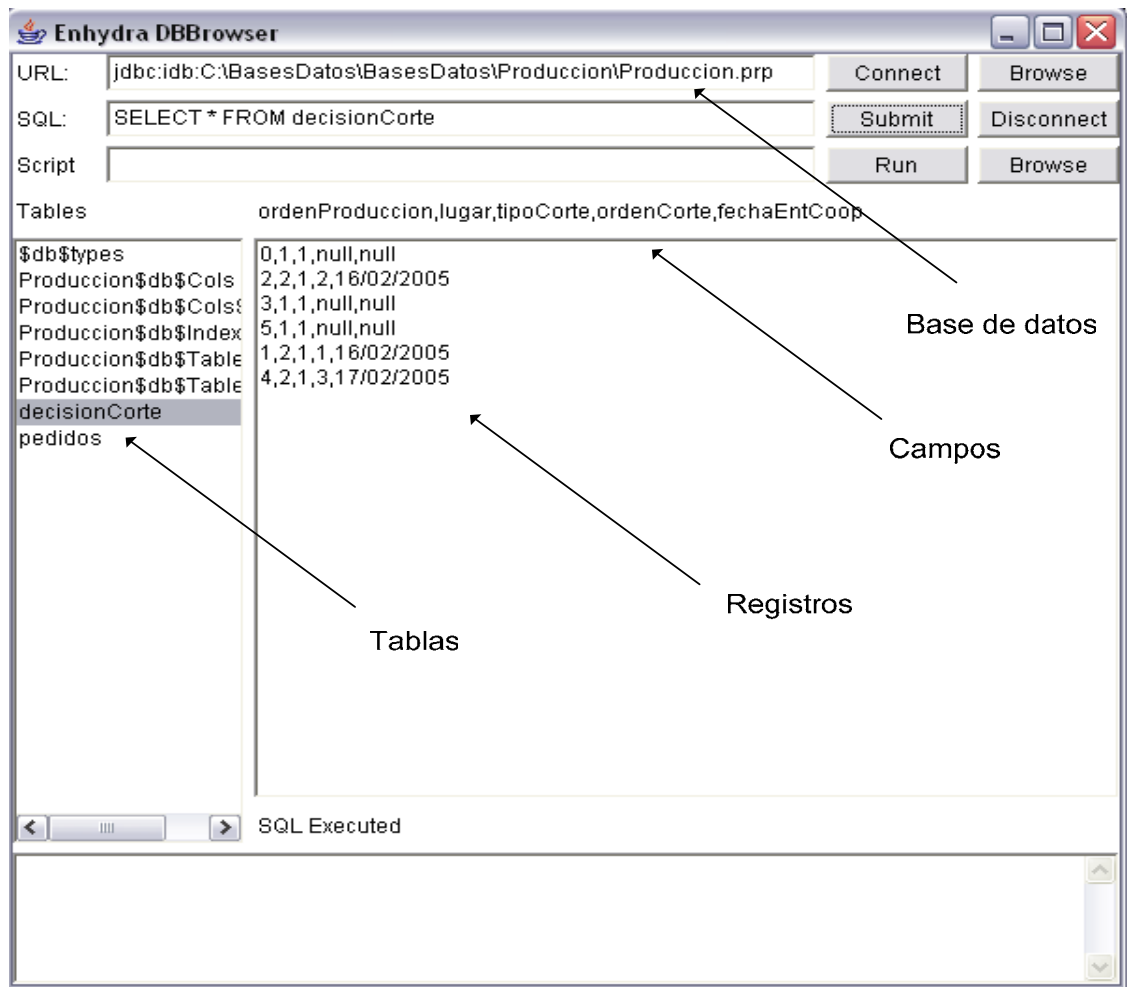


Figura 26 Representación de una base de datos en INSTANTDB

Teniendo en cuenta la totalidad de la información recolectada, y los datos requeridos por el sistema experto, se crean cinco bases de datos diferentes, así:

- Base de datos de Productos.
- Base de datos Auxiliar.
- Base de datos de Producción.
- Base de datos de Cartón.
- Base de datos de Tiempos.

El proceso de la creación de las bases de datos no es sencillo y toma mucho tiempo, además, al pasar el tiempo surgen nuevas necesidades y modificaciones a las bases ya creadas, por lo que deben ser revisadas continuamente por los directivos de la empresa y el experto en software.

Las tablas y campos de estas bases de datos pueden observarse en el Anexo D.

### **6.7.2. Base de Conocimientos**

Es una de las partes más complicadas del proceso de creación del sistema experto, ya que no es sencillo extraer información de los directivos acerca de cómo se ejecuta la programación y secuenciación de las actividades, y transformarla en reglas lógicas del tipo SI (condición) → entonces.

La cantidad de reglas extraídas supera las 50, pero es información privada de la empresa y hace parte del motor de inferencia desarrollado para el sistema experto. En el *cuadro 36* se plasman algunas reglas básicas a consideración en el sistema experto.

### REGLAS LÓGICAS D'CARTÓN

- Si el número de formatos es menor a 200, entonces se debe cortar en la empresa.
- Si el cliente tiene una prioridad mayor, entonces el pedido del mismo debe salir de primero.
- Si se va a crear una plancha nueva, entonces debe hacerse por cara y cara.
- Si la máquina no esta disponible, el pedido no puede fabricarse.
- Si no hay cartón con las especificaciones requeridas, entonces utilice el corte alterno.
- Si el producto se puede hacer en la litográfica 1 y en la litográfica 3, entonces enviarlo a la que tenga menos carga de trabajo.
- Si el producto tiene un acabado especial en impresión, entonces debe considerarse el cambio de mantilla para la litográfica.
- Si se pasa de un producto claro a oscuro en impresión, entonces debe hacerse lavado con despercudido.
- Si se pasa de un producto oscuro a claro en impresión, entonces debe hacerse lavado sin despercudido.
- Si el producto no ha llegado de la cooperativa, entonces no puede empezarse su producción.
- Si el pedido no puede cortarse totalmente en la empresa, entonces debe mandarse a la cooperativa.
- Si se va a mandar a cortar a la Cooperativa, entonces debe enviarse el corte principal.
- Si no se ha programado la materia prima, entonces no se puede programar la producción.
- Si se manda a cortar a la Cooperativa, entonces debe generarse una orden de corte correspondiente al pedido.
- Si se programa la producción, entonces deben generarse las órdenes de producción correspondientes.
- Si se va a actualizar una plancha, entonces debe eliminarse el registro actual y crear uno nuevo.
- Si se va a crear una plancha nueva, entonces debe existir registro del color correspondiente.

**Cuadro 36** Algunas Reglas Lógicas del Motor de Inferencia

#### 6.7.3. Motor de Inferencia

Se decide utilizar el lenguaje JAVA para crear el motor de inferencia que integra las bases de datos y conocimientos, a la vez que aplica las heurísticas de Shifting Bottleneck y Recocido Simulado.

Para la creación de los algoritmos, se trabaja con el software NETBEANS IDE<sup>55</sup>, el cual está disponible en Internet de manera gratuita y presenta facilidad en el manejo de clases de java, páginas JSP<sup>56</sup> y Java Script, así como servicios comunes de aplicación para escritorios, tales como manejo de ventanas y menús, almacenaje de configuraciones y mucho más.

El motor de inferencia necesita conectarse a la mayoría de las bases de datos creadas y a la base de conocimientos con el fin de acercarse a la realidad del sistema productivo y ser capaz de simularlo en su totalidad.

El sistema de algoritmos de búsqueda utilizado es del tipo “*pattern-matching*”, es decir que se van disparando reglas a medida que se cumplen las condiciones. Así mismo, el encadenamiento hacia delante permite extraer conclusiones a partir del cumplimiento de las condiciones de ciertas reglas que, a su vez, provocan la validación de otras reglas hasta que no se cumplan en ninguna de ellas.

#### **6.7.4. Interfaz con el Usuario**

La interfaz con el usuario es uno de los pasos más importantes, ya que es la ventana del sistema experto a los directivos de la empresa. El software desarrollado cumple con las cuatro características mencionadas en la propuesta del modelo general (ver *apartado 5.7.4*).

La aplicación se desarrolla para trabajar en INTRANET utilizando Servlets JAVA, es decir que cualquier computador conectado a la red de la empresa

---

<sup>55</sup> Disponible gratuitamente en <http://www.netbeans.org>.

<sup>56</sup> Java Server Pages

puede ingresar al software de producción y realizar ajustes o consultas de la información.

Los Servlets son programas que se ejecutan en un servidor Web y construyen páginas Web. Construir páginas Web es útil por varias razones:

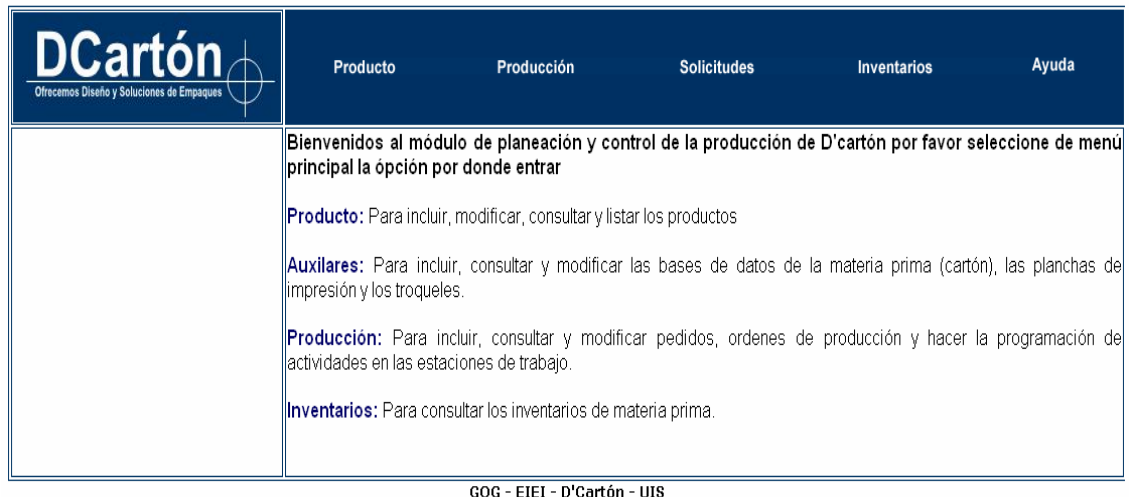
- Está basada en datos enviados por el usuario.
- Los datos cambian frecuentemente.
- Usan información desde bases de datos corporativas u otras fuentes.

Además ofrecen características como potencia, eficiencia, portabilidad y economía.

Para integrar la programación y secuenciación de actividades con las demás actividades de producción en la empresa, se crean diferentes módulos alternos en el software final, tales como módulo de productos, producción, solicitudes, inventarios y ayuda.

De la misma manera, se crean en cada uno de los módulos varios submenús que permiten al usuario viajar por el software de una manera sencilla, brindando toda la información de una manera clara y concisa.

Cabe resaltar que para evitar errores en los registros, se crean procedimientos a prueba de “tontos” para así garantizar información confiable y con el mínimo de errores. Por ejemplo, si el usuario intenta escribir caracteres en un campo donde se necesitan números enteros, entonces el software dispara una alerta y avisa el error cometido.



**Figura 27** Página de bienvenida al Software de Programación de la Producción en D'Cartón


A continuación se explica de manera general cada una de las opciones contenidas en los módulos mencionados.

#### 6.7.4.1. Módulo de Productos


Es aquí donde se crean los productos y se ingresan sus características específicas tales como código, dimensiones, referencia, tipo de cartón, unidades por pliego, número de formatos por pliego, etc. Además se puede consultar el número total de artículos registrados en las bases de datos y modificar cualquier producto en el caso que sea necesario.

Este módulo posee cuatro submenús que son:

- Consultar Producto: El usuario ingresa el código específico de un artículo y el software se conecta con la base de datos para arrojar la hoja de especificaciones deseada (Ver *figuras 28 y 29*).


		<a href="#">Producto</a> : <a href="#">Producción</a> : <a href="#">Solicitudes</a> : <a href="#">Inventarios</a> : <a href="#">Ayuda</a>				
<a href="#">Consultar Producto</a> <a href="#">Crear Producto</a> <a href="#">Modificar Producto</a> <a href="#">Listar Productos</a>	<b>CONSULTAR PRODUCTO</b>					
	Cliente: <input type="text"/>	Código: <input type="text"/>				
	<input type="button" value="Volver a consultar"/>					

**Figura 28** Página de consulta de producto

		<a href="#">Producto</a> : <a href="#">Producción</a> : <a href="#">Solicitudes</a> : <a href="#">Inventarios</a> : <a href="#">Ayuda</a>				
<a href="#">Consultar Producto</a> <a href="#">Crear Producto</a> <a href="#">Modificar Producto</a> <a href="#">Listar Productos</a>	<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES</b>					
	Código: 90044		Referencia: Postre			
	Cliente: CASA DEL PONQUE		Dimensiones: 23,5 x 16 x 10 Plegadiza			
	<b>Tipo de Cartón</b>					
	Cartón: Gama 40-100		Calibre: 040			
	Impresiones: 1					
	<b>Corte Principal</b>					
	Cartón: Vipack	Ancho: 100	Largo: 55	Ud x Pliego: 2	Uñas en la parte inferior	Refiles: NO
	<b>Formatos</b>					
		<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Cantidad</b>		
	54	45	2			
	54.5	45	2			
<b>Troqueles y pegues</b>						
<b>Troqueles</b>		<b>Tipo de adhesivo</b>				
No. Troquel	F0064	Tapa				
Referencia de Tinta	No. de Plancha	Lado				
ROJO CASA DEL PONQUE	1059-A	Base				
		Ventana				
<b>OTRA INFORMACIÓN DE PRODUCCIÓN</b>						
<b>BRILLO</b>		<b>CONGELADO</b>		<b>PLASTIFICADO</b>		
Frente	Reverso	Frente	Reverso	Frente	Reverso	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Para empaques de :						
<b>Corte de ventanas</b>						
Acetato: Ancho: Largo: Formatos por pliego :						

**Figura 29** Hoja de especificaciones para el producto consultado.

- **Crear Producto:** Se tiene la hoja de especificaciones en blanco, el usuario la llena totalmente y pulsa un botón que alimenta inmediatamente las bases de datos necesarias.



**DCartón**  
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques

Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda

[Consultar Producto](#)  
[Crear Producto](#)  
[Modificar Producto](#)  
[Listar Productos](#)

HOJA DE ESPECIFICACIONES

Código:

Referencia:

Cliente:

Dimensiones:

Tapa y Base  Caja Completa

Tipo de Cartón

Cartón:

Calibre:

Impresiones:

Corte Principal

Cartón:	Ancho:	Largo:	Ud x Pliego:	<input checked="" type="radio"/> No Uñas <input type="radio"/> Uñas inferior <input type="radio"/> Uñas derecha	<input type="checkbox"/> Refiles <input type="radio"/> División Vertical <input type="radio"/> División Horizontal
---------	--------	--------	--------------	---	--

FORMATOS

Largo	Ancho	Cantidad
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Troqueles y pegues

Troqueles	Tipo de adhesivo
No. Troquel: <input type="text"/>	Tapa: <input type="text"/>
No. Troquel: <input type="text"/>	Lado: <input type="text"/>
No. Troquel: <input type="text"/>	Base: <input type="text"/>
	Ventana: <input type="text"/>

OTRA INFORMACIÓN DE PRODUCCIÓN

BRILLO		CONGELADO		PLASTIFICADO	
Fronte	Reverso	Fronte	Reverso	Fronte	Reverso
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**ADVERTENCIA:**  
Ingresar las planchas en el orden de impresión

Referencia de Tinta	No. de Plancha
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Corte de Ventanas**  


Acetato: <input type="text"/>	Ancho: <input type="text"/>	Largo: <input type="text"/>	Formatos por pliego: <input type="text"/>
-------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	---

**Figura 30** Página de creación de producto.

- **Modificar Producto:** Al ingresar el código del producto, el software despliega la hoja de especificaciones del artículo, el usuario realiza los cambios respectivos y finalmente pulsa un botón que actualiza las bases de datos de la empresa. (ver *figura 31 y 32*)
- **Listar Producto:** Es un submenú de soporte en el caso que el usuario quiera conocer el número de productos registrados en las bases de datos. Al ingresar se muestra un listado de 20 artículos por página, al hacer click sobre cualquiera de los códigos, se envía al usuario a la hoja de especificaciones correspondiente. (ver *figura 33*).

<b>DCartón</b> Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques	Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda			
	<b>MODIFICAR PRODUCTO</b>			
Consultar Producto Crear Producto Modificar Producto Listar Productos	Cliente:	<input type="text"/>	Código:	<input type="text"/>
<input type="button" value="Volver a consultar"/>				

**Figura 31** Página de modificación de producto.



**DCartón**  
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques

Producto | Producción | Solicitudes | Inventarios | Ayuda

[Consultar Producto](#)  
[Crear Producto](#)  
[Modificar Producto](#)  
[Listar Productos](#)

### HOJA DE ESPECIFICACIONES

Código: 90044	Referencia: Postre
Cliente: CASA DEL PONQUE	Dimensiones: 23.5
Tapa y Base <input checked="" type="radio"/> Caja Completa <input type="radio"/>	

Tipo de Cartón

Cartón: Gama 40-100	Calibre: 040
Impresiones: 1	

Corte Principal

Cartón: Gama 40-100	Ancho: 040	Largo: 55	Ud x Pliego: 2	<input type="radio"/> No Uñas <input checked="" type="radio"/> Uñas inferior <input type="radio"/> Uñas derecha
---------------------	------------	-----------	----------------	---

Formatos

Largo	Ancho	Cantidad
54	45	2
54.5	45	2

Troqueles y pegues

TROQUELES

No. Troquel	F0064
No. Troquel	
No. Troquel	

Tipo de adhesivo

Tapa	
Lado	
Base	
Ventana	

**ADVERTENCIA:**  
Ingresar las planchas en el orden de impresión

Referencia de Tinta	Plancha
ROJO CASA DEL PONQUE	1059-A

OTRA INFORMACIÓN DE PRODUCCIÓN

BRILLO		CONGELADO		PLASTIFICADO	
Frente	Reverso	Frente	Reverso	Frente	Reverso
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Para empaques de:

Corte de Ventanas

Acetato: <input style="width: 50px;" type="text"/>	Ancho: <input style="width: 50px;" type="text"/>	Largo: <input style="width: 50px;" type="text"/>	Formatos por pliego: <input style="width: 100px;" type="text"/>
--	--	--	---

**Figura 32** Hoja de especificaciones para el producto a modificar.

		Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda			
Consultar Producto Crear Producto Modificar Producto Listar Productos		No.	Codigo Producto	Cliente	Referencia
1	<a href="#">90034</a>	CARACOL	MEDIANA		
2	<a href="#">90044</a>	CASA DEL PONQUE	Postre		
3	<a href="#">90091</a>	FIRST CLASS	Dama Grande		
4	<a href="#">90092</a>	FIRST CLASS	Dama Media T y B		
5	<a href="#">90096</a>	FIRST CLASS	Hombre 2 T y B		
6	<a href="#">90123</a>	LA GUACA	DULCE DE APIO		
7	<a href="#">90124</a>	LA GUACA	DULCE DE ARROZ		
8	<a href="#">90128</a>	LA GUACA	BASE SURTIDOS PEQUEÑA		
9	<a href="#">90131</a>	LA GUACA	CORTADOS		
10	<a href="#">90189</a>	MERCADEFAM	LIBRA		
11	<a href="#">90191</a>	MERCADEFAM	MEDIA		
12	<a href="#">90206</a>	NEVADA	LIBRA		
13	<a href="#">90207</a>	NEVADA	Media		
14	<a href="#">90494</a>	PASTELERIA	LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN		
15	<a href="#">90511</a>	THE COOKIE COMPANY	NAVIDAD CUADRO T Y B		
16	<a href="#">90563</a>	BODEGA	Corbatin		
17	<a href="#">90660</a>	CARAMELO	Base Media		
Listando los registros desde 1 hasta 20 <a href="#">Sigüientes 20</a>					

**Figura 33** Listado de productos en la base de datos.

#### 6.7.4.2. Módulo de Producción

Es el eje central del software, aquí el usuario ingresa los pedidos a medida que llegan a la empresa, luego programa las materias primas y cada cierto tiempo (semanalmente, quincenalmente, etc.) programa la producción. Además, se tiene un registro de los pedidos realizados así como las órdenes de corte enviadas a los proveedores.

Por último se tiene un control sobre la disponibilidad de las máquinas, de tal manera que si hay una maquina inactiva por mantenimiento u otros factores, esta se puede desactivar fácilmente impactando así la programación y secuenciación de actividades.

Este módulo contiene 6 submenús:

- Insertar Pedidos: Cada vez que el departamento de producción recibe un pedido este debe ser ingresado al sistema y codificado para asignarle así la orden de producción correspondiente.

El usuario ingresa el código del pedido, cliente, código del producto, la cantidad de cajas y la fecha de entrega, posteriormente pulsa un botón para insertar pedidos y así se actualizan las bases de datos respectivas.

Código pedido	Código Producto	Referencia	Cliente	Cantidad	Orden de Produccion	Fecha Ingre
200518	90206	LIBRA	NEVADA	1500	16	06/03/2005

**Figura 34** Página de introducción de pedidos.

- Programar Materias Primas: Luego de que los pedidos son insertados al sistema, la materia prima (cartón) debe ser programada. De esta manera el software decide o permite al usuario tomar la determinación de donde debe cortarse el cartón. Por último si existen órdenes de corte para proveedores se debe especificar la fecha de entrega de las materias primas para así alimentar las bases de datos del sistema experto y obtener muy buenos resultados en la secuenciación. (ver figuras 35, 36 y 37)

La persona que programa las materias primas puede decidir que productos mandar a programar y cuales no, por medio de unas cajas de chequeo al lado del código del pedido.



**DCartón**  
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques

Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda

- Insertar Pedidos
- Programar Materia Prima
- Programar Produccion
- Listado de Pedidos
- Ordenes de Corte
- Máquinas


**LISTADO DE PEDIDOS NO PROGRAMADOS**

**PARA PROGRAMAR MATERIA PRIMA:**  
Haga click en la caja de chequeo correspondiente al producto que desea programar y luego pulse "Programar"

**PARA BORRAR PEDIDOS :**  
Haga click en la caja de chequeo correspondiente y pulse "Eliminar Pedidos"

	Codigo Pedido	Codigo Producto	Referencia	Cliente	Cantidad	Orden de Produccion	Fecha ingreso	Fecha Entrega
<input type="checkbox"/>	200518	90206	LIBRA	NEVADA	1500	16	06/03/2005	18/03/2005

**Figura 35** Página de programación de materias primas



**DCartón**  
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques

Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda

- Insertar Pedidos
- Programar Materia Prima
- Programar Produccion
- Listado de Pedidos
- Ordenes de Corte
- Máquinas

**LISTADO TOTAL DE PEDIDOS A PROGRAMAR**

Codigo pedido	Cliente	Producto	Cantidad Cajas	Orden de Produccion
200518	NEVADA	90206	1500	16

**INFORMACION Y DECISION DE CORTE**

-----

**Gama 48-60**

Código Producto	Tipo Corte	Pliegos	Formatos	Ancho Pliego (cms)	Largo Pliego (cms)	Metros <sup>2</sup>
90206	Corte 1	1500.0	3000.0	60	102	918

Código Rollo	Cantidad (metros <sup>2</sup> )	Ubicación
9141	452	D'CARTON

CORTAR EN COOPERATIVA

-----

**Figura 36** Resultado arrojado por el software acerca de la decisión de corte.



Una vez realizadas las tres heurísticas para la secuenciación, se muestra una tabla con las órdenes de producción y las operaciones que cada una lleva. Así también, se muestra otra tabla con las máquinas y la secuencia que deben seguir las órdenes en las mismas.

LISTADO DE PEDIDOS NO PROGRAMADOS								
<b>PARA PROGRAMAR LA PRODUCCION:</b> Haga click en la caja de chequeo correspondiente al producto que desea programar y luego pulse "Programar"								
	Codigo Pedido	Codigo Producto	Referencia	Cliente	Cantidad	Orden de Produccion	Fecha ingreso	Fecha Entrega
<input checked="" type="checkbox"/>	444444	90092	Dama Media T y B	FIRST CLASS	5000	4	03/03/2005	10/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	444444	90096	Hombre 2 T y B	FIRST CLASS	5000	5	03/03/2005	10/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	999999	90511	NAVIDAD CUADRO T Y B	THE COOKIE COMPANY	4500	15	03/03/2005	10/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	444444	90091	Dama Grande	FIRST CLASS	5000	3	03/03/2005	10/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	111111	90563	Corbatin	BODEGA	5000	0	03/03/2005	11/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	333333	90044	Postre	CASA DEL PONQUE	5500	2	03/03/2005	12/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	555555	90123	DULCE DE APIO	LA GUACA	1000	6	03/03/2005	12/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	555555	90124	DULCE DE ARROZ	LA GUACA	1000	7	03/03/2005	12/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	555555	90128	BASE SURTIDOS PEQUEÑA	LA GUACA	1000	8	03/03/2005	12/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	555555	90131	CORTADOS	LA GUACA	1000	9	03/03/2005	12/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	666666	90191	MEDIA	MERCADEFAM	2500	11	03/03/2005	13/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	666666	90189	LIBRA	MERCADEFAM	2500	10	03/03/2005	13/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	222222	90034	MEDIANA	CARACOL	2500	1	03/03/2005	14/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	777777	90206	LIBRA	NEVADA	9000	12	03/03/2005	16/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	777777	90207	Media	NEVADA	9000	13	03/03/2005	16/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	888888	90494	LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN	PASTELERIA	10000	14	03/03/2005	17/03/2005
<input checked="" type="checkbox"/>	200518	90206	LIBRA	NEVADA	1500	16	06/03/2005	18/03/2005
<input type="button" value="Programar"/>								

**Figura 38** Listado de pedidos sin ser secuenciados.

- Listado de pedidos: Aquí se pueden observar todos los pedidos de la empresa, el estado en cuanto a programación de materia prima y producción e información general correspondiente a las fechas de ingreso, fechas de entrega, código de producto, referencia, cliente, etc. (ver figura 39).

	Producto : Producción : Solicitudes : Inventarios : Ayuda										
Insertar Pedidos Programar Materia Prima Programar Produccion Listado de Pedidos Ordenes de Corte Máquinas	LISTADO TOTAL DE PEDIDOS EN EL SISTEMA										
	Codigo Pedido	Cliente	Codigo Producto	Referencia	Cantidad	# O.P	Fecha Ingreso	Fecha Entrega	Materia Prima	Programación de Producción	
	<input type="checkbox"/>	111111	BODEGA	90563	Corbatin	5000	0	03/03/2005	11/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	222222	CARACOL	90034	MEDIANA	2500	1	03/03/2005	14/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	333333	CASA DEL PONQUE	90044	Postre	5500	2	03/03/2005	12/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	444444	FIRST CLASS	90091	Dama Grande	5000	3	03/03/2005	10/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	444444	FIRST CLASS	90092	Dama Media T y B	5000	4	03/03/2005	10/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	444444	FIRST CLASS	90096	Hombre 2 T y B	5000	5	03/03/2005	10/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	555555	LA GUACA	90123	DULCE DE APIO	1000	6	03/03/2005	12/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	555555	LA GUACA	90124	DULCE DE ARROZ	1000	7	03/03/2005	12/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	555555	LA GUACA	90128	BASE SURTIDOS PEQUEÑA	1000	8	03/03/2005	12/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	555555	LA GUACA	90131	CORTADOS	1000	9	03/03/2005	12/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	666666	MERCADEFAM	90189	LIBRA	2500	10	03/03/2005	13/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	666666	MERCADEFAM	90191	MEDIA	2500	11	03/03/2005	13/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	777777	NEVADA	90206	LIBRA	9000	12	03/03/2005	16/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	777777	NEVADA	90207	Media	9000	13	03/03/2005	16/03/2005	Programada	NO Programada
	<input type="checkbox"/>	888888	PASTELERIA	90494	LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN	10000	14	03/03/2005	17/03/2005	Programada	NO Programada
<input type="checkbox"/>	999999	THE COOKIE COMPANY	90511	NAVIDAD CUADRO T Y B	4500	15	03/03/2005	10/03/2005	Programada	NO Programada	
<input type="checkbox"/>	200518	NEVADA	90206	LIBRA	1500	16	06/03/2005	18/03/2005	Programada	NO Programada	
<input type="button" value="Eliminar Pedidos"/>											

**Figura 39** Listado Total de pedidos en el sistema

- **Órdenes de Corte:** Es un listado de las órdenes de corte enviadas a la cooperativa con su orden de producción asociada, además si se da click en el código de la orden de corte el software traslada al usuario a la hoja de corte que se envía al proveedor (ver figura 40)

DCartón		Producto	Producción	Solicitudes	Inventarios	Ayuda																																																																																					
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques		Haga click en la orden de corte para ver la solicitud																																																																																									
<a href="#">Insertar Pedidos</a> <a href="#">Programar Materia Prima</a> <a href="#">Programar Produccion</a> <a href="#">Listado de Pedidos</a> <a href="#">Ordenes de Corte</a> <a href="#">Máquinas</a>	<table border="1"> <thead> <tr> <th># Orden de Corte</th> <th># Orden Produccion</th> <th>Cliente</th> <th>Referencia</th> <th>Codigo Producto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><a href="#">0</a></td><td>0</td><td>BODEGA</td><td>Corbatin</td><td>90563</td></tr> <tr><td><a href="#">1</a></td><td>1</td><td>CARACOL</td><td>MEDIANA</td><td>90034</td></tr> <tr><td><a href="#">2</a></td><td>2</td><td>CASA DEL PONQUE</td><td>Postre</td><td>90044</td></tr> <tr><td><a href="#">3</a></td><td>11</td><td>MERCADEFAM</td><td>MEDIA</td><td>90191</td></tr> <tr><td><a href="#">4</a></td><td>3</td><td>FIRST CLASS</td><td>Dama Grande</td><td>90091</td></tr> <tr><td><a href="#">5</a></td><td>4</td><td>FIRST CLASS</td><td>Dama Media T y B</td><td>90092</td></tr> <tr><td><a href="#">6</a></td><td>5</td><td>FIRST CLASS</td><td>Hombre 2 T y B</td><td>90096</td></tr> <tr><td><a href="#">7</a></td><td>6</td><td>LA GUACA</td><td>DULCE DE APIO</td><td>90123</td></tr> <tr><td><a href="#">8</a></td><td>7</td><td>LA GUACA</td><td>DULCE DE ARROZ</td><td>90124</td></tr> <tr><td><a href="#">9</a></td><td>8</td><td>LA GUACA</td><td>BASE SURTIDOS PEQUEÑA</td><td>90128</td></tr> <tr><td><a href="#">10</a></td><td>9</td><td>LA GUACA</td><td>CORTADOS</td><td>90131</td></tr> <tr><td><a href="#">11</a></td><td>10</td><td>MERCADEFAM</td><td>LIBRA</td><td>90189</td></tr> <tr><td><a href="#">12</a></td><td>12</td><td>NEVADA</td><td>LIBRA</td><td>90206</td></tr> <tr><td><a href="#">13</a></td><td>13</td><td>NEVADA</td><td>Media</td><td>90207</td></tr> <tr><td><a href="#">14</a></td><td>14</td><td>PASTELERIA</td><td>LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN</td><td>90494</td></tr> <tr><td><a href="#">15</a></td><td>15</td><td>THE COOKIE COMPANY</td><td>NAVIDAD CUADRO TYB</td><td>90511</td></tr> <tr><td><a href="#">16</a></td><td>16</td><td>NEVADA</td><td>LIBRA</td><td>90206</td></tr> </tbody> </table>	# Orden de Corte	# Orden Produccion	Cliente	Referencia	Codigo Producto	<a href="#">0</a>	0	BODEGA	Corbatin	90563	<a href="#">1</a>	1	CARACOL	MEDIANA	90034	<a href="#">2</a>	2	CASA DEL PONQUE	Postre	90044	<a href="#">3</a>	11	MERCADEFAM	MEDIA	90191	<a href="#">4</a>	3	FIRST CLASS	Dama Grande	90091	<a href="#">5</a>	4	FIRST CLASS	Dama Media T y B	90092	<a href="#">6</a>	5	FIRST CLASS	Hombre 2 T y B	90096	<a href="#">7</a>	6	LA GUACA	DULCE DE APIO	90123	<a href="#">8</a>	7	LA GUACA	DULCE DE ARROZ	90124	<a href="#">9</a>	8	LA GUACA	BASE SURTIDOS PEQUEÑA	90128	<a href="#">10</a>	9	LA GUACA	CORTADOS	90131	<a href="#">11</a>	10	MERCADEFAM	LIBRA	90189	<a href="#">12</a>	12	NEVADA	LIBRA	90206	<a href="#">13</a>	13	NEVADA	Media	90207	<a href="#">14</a>	14	PASTELERIA	LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN	90494	<a href="#">15</a>	15	THE COOKIE COMPANY	NAVIDAD CUADRO TYB	90511	<a href="#">16</a>	16	NEVADA	LIBRA	90206
# Orden de Corte	# Orden Produccion	Cliente	Referencia	Codigo Producto																																																																																							
<a href="#">0</a>	0	BODEGA	Corbatin	90563																																																																																							
<a href="#">1</a>	1	CARACOL	MEDIANA	90034																																																																																							
<a href="#">2</a>	2	CASA DEL PONQUE	Postre	90044																																																																																							
<a href="#">3</a>	11	MERCADEFAM	MEDIA	90191																																																																																							
<a href="#">4</a>	3	FIRST CLASS	Dama Grande	90091																																																																																							
<a href="#">5</a>	4	FIRST CLASS	Dama Media T y B	90092																																																																																							
<a href="#">6</a>	5	FIRST CLASS	Hombre 2 T y B	90096																																																																																							
<a href="#">7</a>	6	LA GUACA	DULCE DE APIO	90123																																																																																							
<a href="#">8</a>	7	LA GUACA	DULCE DE ARROZ	90124																																																																																							
<a href="#">9</a>	8	LA GUACA	BASE SURTIDOS PEQUEÑA	90128																																																																																							
<a href="#">10</a>	9	LA GUACA	CORTADOS	90131																																																																																							
<a href="#">11</a>	10	MERCADEFAM	LIBRA	90189																																																																																							
<a href="#">12</a>	12	NEVADA	LIBRA	90206																																																																																							
<a href="#">13</a>	13	NEVADA	Media	90207																																																																																							
<a href="#">14</a>	14	PASTELERIA	LIBRA Y MEDIA SIN IMPRESIÓN	90494																																																																																							
<a href="#">15</a>	15	THE COOKIE COMPANY	NAVIDAD CUADRO TYB	90511																																																																																							
<a href="#">16</a>	16	NEVADA	LIBRA	90206																																																																																							

Figura 40 Listado de órdenes de corte enviadas a los proveedores.

- Máquinas: Este módulo es importante si en algún momento una máquina se avería o ingresa a mantenimiento. El usuario simplemente debe hacer click en la palabra “activar” o “desactivar” dependiendo del estado de la máquina y el software inmediatamente actualiza las bases de datos y considera la disponibilidad para la secuenciación de actividades. (ver figura 41).

DCartón		Producto	Producción	Solicitudes	Inventarios	Ayuda																														
Ofrecemos Diseño y Soluciones de Empaques		ESTADO DE LAS MAQUINAS																																		
<a href="#">Insertar Pedidos</a> <a href="#">Programar Materia Prima</a> <a href="#">Programar Produccion</a> <a href="#">Listado de Pedidos</a> <a href="#">Ordenes de Corte</a> <a href="#">Máquinas</a>		Haga click en el nombre de la maquina para ver una descripción de la misma																																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Máquina</th> <th>Estado</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><a href="#">Cortarrollo</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Guillotina</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Litografica 1</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Litografica 2</a></td><td>No disponible</td><td><a href="#">Activar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Litografica 3</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Barnizado</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Troqueladora 2</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Troqueladora 3</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> <tr><td><a href="#">Troqueladora 4</a></td><td>Disponible</td><td><a href="#">Desactivar</a></td></tr> </tbody> </table>					Máquina	Estado		<a href="#">Cortarrollo</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Guillotina</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Litografica 1</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Litografica 2</a>	No disponible	<a href="#">Activar</a>	<a href="#">Litografica 3</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Barnizado</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Troqueladora 2</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Troqueladora 3</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>	<a href="#">Troqueladora 4</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>
Máquina	Estado																																			
<a href="#">Cortarrollo</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Guillotina</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Litografica 1</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Litografica 2</a>	No disponible	<a href="#">Activar</a>																																		
<a href="#">Litografica 3</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Barnizado</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Troqueladora 2</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Troqueladora 3</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		
<a href="#">Troqueladora 4</a>	Disponible	<a href="#">Desactivar</a>																																		

Figura 41 Página de configuración del estado de las máquinas

### 6.7.4.3. Módulo de Solicitudes

En este módulo se codifican los nuevos cartones, planchas de impresión y troqueles por medio de varios submenús.

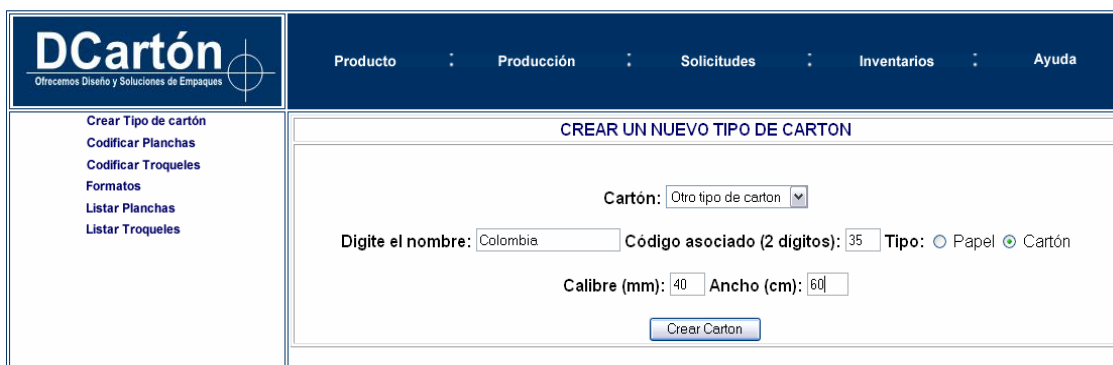
Contiene varios submenús entre los cuales están:

- Crear Tipo de Cartón: El usuario ingresa el nombre del cartón, calibre y ancho e inmediatamente se actualizan las bases de datos. Si es un cartón con nuevo nombre, se debe especificar además el código asignado y el tipo de materia prima (Papel o cartón).



The screenshot shows the 'DCartón' web application interface. The top navigation bar includes 'Producto', 'Producción', 'Solicitudes', 'Inventarios', and 'Ayuda'. The left sidebar contains a menu with options: 'Crear Tipo de cartón', 'Codificar Planchas', 'Codificar Troqueles', 'Formatos', 'Listar Planchas', and 'Listar Troqueles'. The main content area is titled 'CREAR UN NUEVO TIPO DE CARTON'. It features a 'Cartón:' dropdown menu with 'America' selected, 'Calibre (mm):' input field with '40', and 'Ancho (cm):' input field with '60'. A 'Crear Carton' button is located at the bottom of the form.

Figura 42 Creación de un cartón con el nombre ya existente.



The screenshot shows the 'DCartón' web application interface. The top navigation bar includes 'Producto', 'Producción', 'Solicitudes', 'Inventarios', and 'Ayuda'. The left sidebar contains a menu with options: 'Crear Tipo de cartón', 'Codificar Planchas', 'Codificar Troqueles', 'Formatos', 'Listar Planchas', and 'Listar Troqueles'. The main content area is titled 'CREAR UN NUEVO TIPO DE CARTON'. It features a 'Cartón:' dropdown menu with 'Otro tipo de carton' selected, 'Digite el nombre:' input field with 'Colombia', 'Código asociado (2 digitos):' input field with '35', and 'Tipo:' radio buttons for 'Papel' and 'Cartón' (selected). The 'Calibre (mm):' input field has '40' and the 'Ancho (cm):' input field has '60'. A 'Crear Carton' button is located at the bottom of the form.

Figura 43 Creación de un cartón nuevo.

- Codificar Planchas: Las planchas para impresión deben ser creadas por ambos lados, por lo que se despliega el formato de creación de planchas

tanto para el lado A como el B. El software se conecta con las bases de datos e inmediatamente reconoce el número consecutivo de plancha para el sector escogido por el usuario y de la misma manera vincula la plancha al producto. Al enviar la solicitud de creación o cambio de plancha, el registro queda almacenado en el sistema y puede ser revisado en posteriores ocasiones (ver *figura 44*).

The screenshot shows the DCartón software interface. The top navigation bar includes 'Producto', 'Producción', 'Solicitudes', 'Inventarios', and 'Ayuda'. The left sidebar contains menu items: 'Crear Tipo de cartón', 'Codificar Planchas', 'Codificar Troqueles', 'Formatos', 'Listar Planchas', and 'Listar Troqueles'. The main content area is divided into two sections, 'CARA A' and 'CARA B'. Each section has a 'Trabajo que solicita' field with radio buttons for 'Plancha Nueva' and 'Cambio de Plancha'. Below this is a 'Cliente' dropdown menu. The 'Máquina' section has radio buttons for 'L1', 'L2', and 'L3'. To the right, there are fields for 'Código Plancha Antigua', 'Código Plancha Nueva', and 'Color' (with a dropdown arrow). An 'Observaciones' text area is provided for each side. At the bottom of the form, there is an 'Enviar' button.

**Figura 44** Formato de solicitud de planchas

- **Codificar Troqueles:** De la misma manera que se procede con las planchas, se hace con los troqueles, con la gran diferencia que un troquel no se vincula a un producto específico, ya que puede existir un troquel con varios productos asignados.

El usuario debe llenar el formato completamente para que el registro se haga válido e ingrese al sistema (ver *figura 45*)

**Figura 45** Formato de solicitud de troqueles

- **Formatos:** Este submenú contiene un listado de todos los formatos en blanco del área de producción, de esta manera el usuario puede imprimirlos cada vez que lo requiera.
- **Listar Planchas:** Es un listado de las planchas existentes en las bases de datos, al hacer click en el código de una de estas se puede ingresar al registro de creación o cambio de las mismas.
- **Listar Troqueles:** Es un listado que contiene los troqueles existentes en las bases de datos del sistema. Al hacer click en el código del troquel se puede ingresar al registro de creación o cambio de los mismos.

#### 6.7.4.4. Módulo de Inventarios


Es importante tener un registro de los inventarios existentes tanto en la cooperativa como en la empresa, por lo que se desarrolla este módulo que controla la entrada y salida de existencias de cartón y bobinas.

Este módulo contiene cuatro submenús:

- Inventario Bobinas D'Cartón: Despliega las especificaciones y saldos en metros cuadrados de las bobinas de cartón presentes en la empresa (ver figura 46).
- Inventario Bobinas Cooperativa: Despliega las especificaciones y saldos en metros cuadrados de las bobinas de cartón presentes en la cooperativa.
- Inventario en Transito: Despliega las órdenes de corte enviadas a la cooperativa, posibles fechas de entrega, órdenes de producción asociadas y demás especificaciones importantes para el control de los inventarios (ver figura 47).
- Inventario Formatos: Contiene el registro de inventario de formatos existente en la bodega de la empresa con las dimensiones de los mismos y tipo de cartón.

		Producto	Producción	Solicitudes	Inventarios	Ayuda
Inventario Bobinas D'Cartón Inventario Bobinas COOP Inventario EN TRANSITO Inventario de Formatos		<b>LISTADO DE BOBINAS EXISTENTES EN D' CARTON</b>				
Nombre Carton	Codigo Rollo	Codigo Carton	Calibre	Ancho	Metros <sup>2</sup>	
America 40-84	8741	10040084	40	84	1403	
America 40-90	4460	10040090	40	90	582	
America 40-100	4869	10040100	40	100	2	
America 40-110	4871	10040110	40	110	2498	
America 40-110	6936	10040110	40	110	211	
America 48-50	5766	10048050	48	50	2098	
America 48-110	7535	10048110	48	110	353	
America 58-50	8051	10058050	58	50	958	
America 58-70	3771	10058070	58	70	54	
Gama 40-50	1321	20040050	40	50	337	
Gama 40-60	4350	20040060	40	60	328	
Gama 40-70	638	20040070	40	70	255	
Gama 40-80	8309	20040080	40	80	769	
Gama 40-84	5158	20040084	40	84	544	
Gama 40-90	7921	20040090	40	90	2361	
Gama 40-100	4914	20040100	40	100	410	
Gama 48-60	9141	20048060	48	60	452	
Gama 48-80	4759	20048080	48	80	496	
Gama 48-90	2725	20048090	48	90	1059	
Gama 48-100	714	20048100	48	100	190	
Gama 48-100	7187	20048100	48	100	2836	
PROPALCOTE 115 Gramos-70	5450	65115070	115	70	2742	
PROPALCOTE 115 Gramos-70	2187	65115070	115	70	234	
PROPALCOTE 210-70	9379	65210070	210	70	1075	
PROPALCOTE C1S 280-70	4986	66280070	280	70	1889	

Figura 46 Listado de bobinas registradas en la bodega de D'Cartón.

		Producto	Producción	Solicitudes	Inventarios	Ayuda
Inventario Bobinas D'CARTON Inventario Bobinas COOP Inventario EN TRANSITO Inventario de Formatos		<b>LISTADO DE CARTONES EN TRANSITO</b>				
Nombre Carton	Codigo Carton	Cantidad de formatos	Dimensiones	Ordenes de Produccion Asociadas	Metros <sup>2</sup>	Fecha estimada de entrega
America 40-70	10040070	2250	36 X 70	15	575	05/03/2005
America 40-96	10040096	5000	38 X 24	0	462	07/03/2005
America 48-60	10048060	20000	50.5 X 60	14	6060	09/03/2005
Gama 40-60	20040060	1000	35 X 30	8	107	07/03/2005
Gama 40-70	20040070	5000	56.5 X 35	4	1007	05/03/2005
Gama 40-80	20040080	5000	56.5 X 40	3	1150	05/03/2005
Gama 40-84	20040084	4998	46.5 X 28	5	665	05/03/2005
Gama 40-100	20040100	5500	54 X 45	2	1513	05/03/2005
Gama 40-100	20040100	2500	74.5 X 50	11	944	07/03/2005
Gama 40-105	20040105	1000	35 X 30	8	468	07/03/2005
Gama 40-105	20040105	18000	42.5 X 52.5	13	3969	08/03/2005
Gama 48-50	20048050	1000	35 X 25	9	89	07/03/2005
Gama 48-60	20048060	2500	89 X 6	10	1350	07/03/2005
Gama 48-60	20048060	18000	51.5 X 60	12	5508	08/03/2005
Gama 48-71	20048071	1000	35 X 25	6	127	07/03/2005
Gama 48-80	20048080	2500	71 X 40	1	720	07/03/2005
Gama 48-84	20048084	996	37 X 28	7	105	07/03/2005

**Figura 47** Listado de órdenes de corte enviadas a la Cooperativa de Impresores.

#### 6.7.4.5. Módulo de Ayuda

Este módulo contiene los vínculos a archivos PDF que contienen toda la ayuda necesaria para corregir problemas en el software y acerca del correcto uso del mismo.

**PARTE IV**  
**CONSIDERACIONES**  
**FINALES**

## 7. CONCLUSIONES

Luego de un arduo esfuerzo investigador de aproximadamente ocho meses, en los cuales no solo se fortalecieron conocimientos profesionales propios de la ingeniería industrial, sino también otros aspectos multidisciplinarios, que deberían ser vinculados y promovidos con mayor profundidad, se concluye:

- El éxito de la metodología desarrollada depende en su mayor parte de las capacidades de abstracción, el grado de vinculación y conocimiento de la dinámica de las decisiones por parte de los desarrolladores del sistema experto.
- La Programación Lineal (PL), es una de las técnicas de modelización matemática más utilizada, sin embargo dadas las características de problema combinatorio que tiene la programación de operaciones, hace complejo la aplicación del enfoque PL, y costoso en términos de recursos para encontrar la solución óptima del modelo planteado.
- Los métodos heurísticos tienen ventajas como la obtención de soluciones cercanas al óptimo en tiempos reducidos y la representación compleja de sistemas productivos comparados con los métodos de programación matemática. La desventaja de estas heurísticas es que no se garantizan las soluciones resultantes, aunque la probabilidad de obtener muy buenos resultados es elevada.
- La combinación de procedimientos heurísticos para la solución de problemas de optimización combinatorios arroja mejores resultados, ya que estos se complementan, permitiendo un manejo más eficiente y racional de soluciones iniciales, y además, facilitan la búsqueda en el vecindario de soluciones factibles.
- A medida que aumentan el número de productos y de máquinas existentes en un problema de secuenciación de actividades, es menos probable encontrar soluciones cercanas al óptimo por medio del desarrollo de los procedimientos heurísticos propuestos, quedando a veces, atrapado en óptimos locales.

- En la mayoría de los departamentos de una empresa se toman decisiones que impactan directa o indirectamente el procedimiento de secuenciación y programación de actividades, por lo que es necesario analizar cuidadosamente todas las áreas de la organización y estudiar la dinámica de las decisiones de la misma.
- Es vital para toda empresa manufacturera con procesos intermitentes de producción, cumplir con las fechas de entrega pactadas con los clientes. El modelo de planeación operativa y secuenciación de actividades pretende mejorar la toma de decisiones en este campo por medio de la utilización de los sistemas expertos y procedimientos heurísticos, para así lograr secuencias de trabajos que intentan lograr una minimización de cierto criterio escogido por los directivos.
- Las empresas suelen priorizar los trabajos por medio de diferentes reglas como FIFO, primero que pague, fechas de entrega, tipo de pago, etc. Es necesario que el proceso de programación y secuenciación de actividades considere estos posibles aspectos para arrojar valores acordes con la realidad empresarial y útiles para el usuario final.
- Al trabajar con el criterio de minimización del retraso ponderado, se presiona la heurística para que los trabajos con mayor prioridad sean secuenciados antes que los de menor prioridad. Aunque no se puede concluir que esta regla se aplique para todos los casos, ya que existen casos en donde trabajos con prioridad más baja son colocados primero que los demás trabajos de mayor ponderación, y además sería inútil el desarrollo del modelo propuesto si esta regla fuera válida para todos los problemas.
- Los beneficios que traen las herramientas de información tecnológica, para las organizaciones son incalculables, ya que permiten y facilitan las interrelaciones entre las distintas áreas del sistema, logrando así la sinergia necesaria para alcanzar los objetivos empresariales.

## 8. RECOMENDACIONES

Se debe concientizar a la empresa que aplica el modelo para la planeación operativa y secuenciación de actividades en los siguientes aspectos, para que este proceso culmine con éxito y grandes beneficios para la misma:

- El desarrollo del sistema experto es la última etapa del modelo, pero el desarrollo del mismo debe pensarse desde el inicio de la aplicación de la metodología, considerando las necesidades y toma de decisiones en la empresa. Es por esta razón que todas las etapas impactan directamente en la estructuración del sistema experto, y viceversa.
- Dentro de todo el proceso se debe dar a conocer a todos los involucrados la importancia y beneficios que se pretenden alcanzar con la aplicación de la metodología, el éxito depende de que tan vinculados estén las áreas o departamentos que impactan en el proceso de planeación operativa.
- Para el desarrollo de la aplicación se recomienda mantener un diseño modular y orientado a objetos, que facilite el esfuerzo de programación permitiendo realizar correcciones y cambios después de la implementación de la misma.
- Siempre se debe tener presente que todo el proceso requiere paciencia, ya que podría tomar meses o hasta años, antes que el programa se comporte de acuerdo a los fines deseados. Por lo tanto se debe poner ahínco y esmero no solo en el diseño y desarrollo de la aplicación, sino también en la posterior implementación del mismo.
- Se debe desarrollar un módulo en el cual se lleve un control del programa de producción, donde se retroalimente la información del estado del taller y del avance de las órdenes, con el fin de hacer las correcciones al plan programado de operaciones y la secuencia de pedidos.
- Es recomendable introducir un pequeño menú en el sistema experto que permita al usuario variar los parámetros del Recocido Simulado de acuerdo a la complejidad del problema, obteniendo un mejor desempeño del algoritmo en problemas grandes.

## BIBLIOGRAFÍA

ALFONSO GALIPIENSO, María I. Un modelo de integración de técnicas de *CLAUSURA* y *CSP* de restricciones temporales: Aplicación a problemas de Scheduling. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Alicante: 2001.

BULA, Gustavo A. Programación de Operaciones en el Taller de Trabajo utilizando la Meta-Heurística de Recocido Simulado. En Revista de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Vol. 3, No. 1, 2004. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

BRUCKER, Peter. Scheduling Algorithms. 4 ed. Berlin: Springer, 2004.

CHASE, AQUILANO, JACOBS. Administración de Producción y Operaciones: Manufactura y Servicios. 8 ed. Bogotá: Mc Graw-Hill Interamericana S.A, 2000.

DEURMEYER, B. Interoffice Memorandum on Undergraduate Curriculum in Industrial Engineering, Texas A&M University, 1994.

DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y los servicios. Madrid: McGraw Hill, 1995.

DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. Madrid: McGraw Hill, 1995.

DOWSLAND K, DIAZ B. Diseño de Heurísticas y Fundamentos del Recocido Simulado. En Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. No 20, 2001. Universidad de Oviedo.

GLENN Brookshear J. *Teoría de la Computación* Lenguajes formales, autómatas y complejidad: Edit Addison-Wesley Iberoamericana, S.A 1993.

HAYES, R.H ,WHEELWRIGHT, S.C. Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing. Nueva York: John Wiley & Sons, 1984.

HOPP, Wallace J. y SPEARMAN, Mark L. Factory Physics. New York: McGraw-Hill, 2001.

MARTÍ Rafael. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Valencia.2002.

NIÑO, M. Modelamiento a través de la programación lineal entera mixta del problema de programación de operaciones en el taller de trabajo. En Revista de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Vol. 2, No. 1, 2003. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

PATHN, D.T y KARABOGA, D. Intelligent Optimization Techniques. Gran Bretaña: Springer-Verlag, 2000.

PÉREZ GOROSTEGUI, E. Economía de la Empresa. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A. 1991.

PINEDO, Michael. Scheduling: Theory, Algorithms and System. 2 ed. New York: Prentice Hall, 2002.

SCHOROEDER Roger G. Administración de Operaciones. Ciudad de México: Fuentes Impresores S.A ,1993.

SILVER Edward, PIKE David y PETERSON Rein. Inventory Managment and Production Planning and Scheduling. New York : Jhon Wiley & Sons, 1998.

TAHA Hamdy. Investigación de Operaciones. 5 ed. México, D.F: Alfaomega S.A, 1995.

TAWFIK L., CHAUVEL A. Administración de la Producción. México: Mc Graw-Hill Interamericana S.A, 1992.

TORRES Acosta, J. H. Planeacion Agregada en la PYME: Aplicación al sector industrial colombiano. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigación y Desarrollo Científico, Bogota, 2002.

WOODWARD, J. Industrial Organization: Theory and Practice. Oxford: Oxford University Press, 1965.

YAMADA T. Studies on Metaheuristics for Jobshop and Flowshop Scheduling Problems. Tesis Doctoral. Universidad de Kyoto. Japón: 2003.

----- [En línea] <URL<http://www.dc.uba.ar/people/proyinv/celldevs/espanol.html>>  
Recuperado el 12 Noviembre de 2004.

----- [En línea] <URL<http://ingenierosinformatica.org/recurso/tutoriales/sistexp>>  
Recuperado el 13 de Febrero de 2005.

# ANEXOS

## ANEXO A

### Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Primer Caso [ Apartado 6.6 – p. 133 ]

---

```
enum Task = {inicioCR, inicioTC, inicioLA, inicioLC, dCR, fCR, dGUI, fGUI, bLA, cLA, dLC, eLC, fLC, gLC, hLC, dTC, fTC, gTC, hTC, aTC, bTD, cTD, eTD, fina, finb, finc, find, fine, finf, fing, finh };
```

```
enum Resource = {CR, GUI, LA, LC, TC, TD};
```

```
struct Precedence{  
    Task before;  
    Task after;  
    int tiempo;  
};
```

```
int duration[Task] = #[ inicioCR:0, inicioTC:0, inicioLA:0, inicioLC:0, dCR:6020, fCR:4395, dGUI:5994, fGUI:4169, bLA:40879, cLA:7946, dLC:14868, eLC:14868, fLC:14868, gLC:23943, hLC:23943, dTC:9932, fTC:9932, gTC:8188, hTC:8188, aTC:13419, bTD:15162, cTD:13419, eTD:9932, fina:0, finb:0, finc:0, find:0, fine:0, finf:0, fing:0, finh:0 ]#;
```

```
{Precedence} precedences = {<inicioCR, dCR, 0>, <inicioCR, fCR, 0>, <dCR, dGUI, 6020>, <fCR, fGUI, 4395>, <inicioLA, bLA, 86400>, <inicioLA, cLA, 86400>, <inicioTC, aTC, 82256>, <bLA, bTD, 36735>, <cLA, cTD, 3802>, <dGUI, dLC, 5994>, <dLC, dTC, 10724>, <inicioLC, eLC, 86400>, <eLC, eTD, 10724>, <fGUI, fLC, 4169>, <fLC, fTC, 10724>, <inicioLC, gLC, 86400>, <inicioLC, hLC, 86400>, <gLC, gTC, 19799>, <hLC, hTC, 19799>, <aTC, fina, 13419>, <bTD, finb, 15162>, <cTD, finc, 13419>, <dTC, find, 9932>, <eTD, fine, 9932>, <fTC, finf, 9932>, <gTC, fing, 8188>, <hTC, finh, 8188> };
```

```
{Task} res[Resource] = #[ CR :{inicioCR, dCR, fCR}, GUI  
:{dGUI, fGUI}, LA: {inicioLA, bLA, cLA}, LC:{inicioLC, dLC,  
eLC, fLC, gLC, hLC}, TC:{inicioTC, aTC, dTC, fTC, gTC,  
hTC, fina, find, finf, fing, finh}, TD:{bTD, cTD, eTD, finb,  
finc, fine}]#;
```

```
int maxDuration = sum (t in Task) duration[t] ;  
scheduleHorizon=maxDuration;  
Activity a[t in Task](duration[t]);  
UnaryResource maq[Resource];
```

```
int+ fea=115200;  
int+ feb=172800;  
int+ fec=115200;  
int+ fed=172800;  
int+ fee=172800;  
int+ fef=172800;  
int+ feg=86400;  
int+ feh=86400;
```

### **minimize**

```
a[fina].start - fea+ a[finb].start- feb+ a[finc].start- fec+ a[find].start-  
fed+ a[fine].start- fee+ a[finf].start- fef+ a[fing].start- feg+  
a[finh].start- feh
```

### **subject to {**

```
forall(t in precedences)  
a[t.before].start+t.tiempo <= a[t.after].start;
```

```
forall (r in Resource)  
forall (t in res[r])  
a[t] requires maq[r];  
};
```

---

## ANEXO B

### Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Segundo Caso [ Apartado 6.6 – p. 136 ]

---

```
enum Task = {inicioCR, inicioTA, inicioTB, inicioLA, inicioLB,
rCR, iCR, cCR, aCR, rG, iG, cG, aG, tLA, sLA, mLA, lLA,
kLA, eLA, dLA, rLB, qLB, pLB, nLB, jLB, iLB, hLB, gLB,
cLB, bLB, aLB, sTA, oTA, mTA, kTA, qTB, pTB, iTB, gTB,
fTB, cTB, bTB, aTB, tTC, rTC, nTC, lTC, jTC, hTC, eTC,
dTC, fina, finb, finc, find, fine, finf, fing, finh, fini, finj, fink,
finl, finm, finn, fino, finp, finq, finr, fins, fint } ;
```

```
enum Resource = {CR, G, LA, LB, TA, TB, TC};
```

```
struct Precedence{
    Task before;
    Task after;
    int tiempo;
};
```

```
int duration[Task] = #[ inicioCR:0, inicioTA:0, inicioTB:0,
inicioLA:0, inicioLB:0, rCR:3583, iCR:2770, aCR:4395,
cCR:6020, iG:2344, rG:3257, aG:4169, cG:5994, eLA:7946,
kLA:18347, lLA:18347, dLA:36645, mLA:37400, tLA:43751,
sLA:43751, pLB:29539, bLB:14868, cLB:4868, aLB:14868,
iLB:23943, hLB:23909, jLB:23943, gLB:23943, nLB:37400,
qLB:28177, rLB:28177, oTA:9932, kTA:8188, mTA:11675,
sTA:13419, aTB:9932, fTB:15162, pTB:11675, iTB:8188,
cTB:9932, bTB:9932, gTB:8188, qTB:9932, eTC:13419,
dTC:13419, lTC:8188, hTC:8188, jTC:8188, rTC:9932,
tTC:13419, nTC:11675, fina:0, finb:0, finc:0, find:0, fine:0, finf:0,
fing:0, finh:0, fini:0, finj:0, fink:0, finl:0, finm:0, finn:0, fino:0,
finp:0, finq:0, finr:0, fins:0, fint:0 ]# ;
```

```
{Precedence} precedences={<inicioCR, aCR , 0>, <aCR, aG,
4395>, <aG, aLB, 4169>, <aLB, aTB, 10724>, <inicioLB,
bLB, 86400>, <bLB, bTB, 10724>, <inicioCR, cCR, 0>,
<cCR, cG, 6020>, <cG, cLB, 5994>, <cLB, cTB, 10724>,
<inicioLA, dLA, 86400>, <dLA, dTC, 32501>, <inicioLA, eLA,
86400>, <eLA, eTC, 3802>, <inicioTB, fTB, 82256>,
```

```

<inicioLB, gLB, 86400>, <gLB, gTB, 19799>, <inicioLB, hLB,
86400>, <hLB, hTC, 1965>, <inicioCR, iCR, 0>, <iCR, iG,
2770>, <iG, iLB, 2344>, <iLB, iTB, 19799>, <inicioLB, jLB,
86400>, <jLB, jTC, 19799>, <inicioLA, kLA, 86400>, <kLA,
kTA, 14203>, <inicioLA, lLA, 86400>, <lLA, lTC, 14203>,
<inicioLA, mLA, 86400>, <mLA, mTA, 33256>, <inicioLB,
nLB, 86400>, <nLB, nTC, 33256>, <inicioTA, oTA, 82256>,
<inicioLB, pLB, 86400>, <pLB, pTB, 25395>, <inicioLB, qLB,
86400>, <qLB, qTB, 24033>, <inicioCR, rCR, 0>, <rCR, rG,
3583>, <rG, rLB, 3257>, <rLB, rTC, 24033>, <inicioLA, sLA,
86400>, <sLA, sTA, 39607>, <inicioLA, tLA, 86400>, <tLA,
tTC, 39607>, <aTB, fina, 9932>, <bTB, finb, 9932>, <cTB, finc,
9932>, <dTC, find, 13419>, <eTC, fine, 13419>, <fTB, finf,
15162>, <gTB, fing, 8188>, <hTC, finh, 8188>, <iTB, fini, 8188>,
<jTC, finj, 8188>, <kTA, fink, 8188>, <lTC, finl, 8188>, <mTA,
finm, 11675>, <nTC, finn, 11675>, <oTA, fino, 9932>, <pTB, finp,
11675>, <qTB, finq, 9932>, <rTC, finr, 9932>, <sTA, fins,
13419>, <tTC, fint, 13419> };

```

```

{Task} res[Resource] = #[ CR :{inicioCR, rCR, iCR, aCR, cCR},
G :{iG, rG, aG, cG}, LA: {inicioLA, eLA, kLA, lLA, dLA, mLA, tLA,
sLA}, LB:{inicioLB, pLB, bLB, cLB, aLB, iLB, hLB, jLB, gLB, nLB,
qLB, rLB}, TA:{inicioTA, oTA, kTA, mTA, sTA}, TB:{inicioTB,
aTB, fTB, pTB, iTB, cTB, bTB, gTB, qTB}, TC:{eTC, dTC, lTC,
hTC, jTC, rTC, tTC, nTC}]#;

```

```

int maxDuration = sum (t in Task) duration[t] ;
scheduleHorizon=maxDuration;
Activity a[t in Task](duration[t]);
UnaryResource maq[Resource];

```

```

int+fea=201600;
int+feb=201600;
int+fec=201600;
int+fed=230400;
int+fee=259200;
int+fef=230400;
int+feg=230400;
int+feh=230400;
int+fei=230400;
int+fej=230400;
int+fek=172800;
int+fel=172800;
int+fem=288000;
int+fen=288000;
int+feo=201600;
int+fep=201600;

```

```
int+feq=316800;  
int+fer=316800;  
int+fes=374400;  
int+fet=374400;
```

### **minimize**

```
a[fin].start - fea+ a[finb].start- feb+ a[finc].start- fec+ a[find].start-  
fed+ a[fine].start- fee+ a[finf].start- fef+ a[finj].start- feg+  
a[finh].start- feh+ a[fini].start- fei+ a[finj].start- fej+ a[fink].start-  
fek+ a[finl].start- fel+ a[finm].start- fem+ a[finn].start- fen+  
a[fino].start- feo+ a[finp].start- fep+ a[finq].start- feq+ a[finr].start-  
fer+ a[fins].start- fes+ a[fint].start- fet
```

### **subject to {**

```
forall(t in precedences)  
a[t.before].start+t.tiempo <= a[t.after].start;
```

```
forall (r in Resource)  
forall (t in res[r])  
a[t] requires maq[r];  
};
```

---

## ANEXO C

### Código de Programación ILOG OPL 3.0 Studio para el Tercer Caso [ Apartado 6.6 – p. 143 ]

---

```
enum Task = {inicioCR, inicioTA, inicioTC, inicioLA, inicioLB,
iCR, cCR, aCR, iG, cG, aG, ILA, kLA, dLA, pLB, iLB, gLB, cLB,
bLB, aLB, oTA, kTA, pTB, iTB, gTC, fTC, cTB, bTB, aTC, ITC,
dTC, fina, finb, finc, find, finf, fing, fini, fink, finl, fino, finp} ;
```

```
enum Resource = {CR, G, LA, LB, TA, TB, TC};
```

```
struct Precedence {
    Task before;
    Task after;
    int tiempo;
};
```

```
int duration[Task] = #[ inicioCR:0, inicioTA:0, inicioTC:0,
inicioLA:0, inicioLB:0, iCR:2770, aCR:4395, cCR:6020, iG:2344,
aG:4169, cG:5994, kLA:18347, ILA:18347, dLA:36645,
pLB:29539, bLB:14868, cLB:4868, aLB:14868, iLB:23943,
gLB:23943, oTA:9932, kTA:8188, aTC:9932, fTC:15162,
pTB:11675, iTB:8188, cTB:9932, bTB:9932, gTC:8188,
dTC:13419, ITC:8188, fina:0, finb:0, finc:0, find:0, finf:0, fing:0,
fini:0, fink:0, finl:0, fino:0, finp:0]# ;
```

```
{Precedence} precedences = {<inicioCR, aCR, 0>, <aCR, aG,
4395>, <aG, aLB, 4169>, <aLB, aTC, 10724>, <inicioLB, bLB,
86400>, <bLB, bTB, 10724>, <inicioCR, cCR, 0>, <cCR, cG,
6020>, <cG, cLB, 5994>, <cLB, cTB, 10724>, <inicioLA, dLA,
86400>, <dLA, dTC, 32501>, <inicioTC, fTC, 82256>, <inicioLB,
gLB, 86400>, <gLB, gTC, 19799>, <inicioCR, iCR, 0>, <iCR, iG,
2770>, <iG, iLB, 2344>, <iLB, iTB, 19799>, <inicioLA, kLA,
86400>, <kLA, kTA, 14203>, <inicioLA, ILA, 86400>, <ILA, ITC,
14203>, <inicioTA, oTA, 82256>, <inicioLB, pLB, 86400>, <pLB,
pTB, 25395>, <aTC, fina, 9932>, <bTB, finb, 9932>, <cTB, finc,
9932>, <dTC, find, 13419>, <fTC, finf, 15162>, <gTC, fing,
8188>, <iTB, fini, 8188>, <kTA, fink, 8188>, <ITC, finl, 8188>,
<oTA, fino, 9932>, <pTB, finp, 11675> };
```

```

{Task} res[Resource] = #[ CR :{inicioCR, iCR, aCR, cCR}, G
:{iG, aG, cG}, LA: {inicioLA, kLA, lLA, dLA}, LB:{inicioLB, pLB,
bLB, cLB, aLB, iLB, gLB}, TA:{inicioTA, oTA, kTA}, TB:{pTB,
iTB, cTB, bTB}, TC:{inicioTC, aTC, dTC, lTC, gTC, fTC}]#;
```

```

int maxDuration = sum (t in Task) duration[t] ;
scheduleHorizon=maxDuration;
Activity a[t in Task](duration[t]);
UnaryResource maq[Resource];
```

```

int+fea=201600;
int+feb=201600;
int+fec=201600;
int+fed=230400;
int+fef=230400;
int+feg=230400;
int+fei=230400;
int+fek=172800;
int+fel=172800;
int+feo=201600;
int+fep=201600;
int+ alto=100;
int+ medio=10;
int+ bajo=1;
```

### **minimize**

```

(a[final].start - fea)*medio+ (a[finb].start- feb)*bajo+ (a[finc].start-
fec)*alto + (a[find].start- fed)*bajo+ (a[finf].start- fef)*medio +
(a[finj].start- feg)*bajo + (a[fini].start- fei)*alto + (a[fink].start-
fek)*medio + (a[finl].start- fel)*alto + (a[fino].start- feo)*alto +
(a[finp].start- fep)*medio
```

### **subject to {**

```

/*forall (t in precedences)
a[t.before] precedes a[t.after];
*/
forall(t in precedences)
a[t.before].start+t.tiempo <= a[t.after].start;

forall (r in Resource)
forall (t in res[r])
a[t] requires maq[r];
};
```

---

## ANEXO D

### Bases de Datos del Sistema Experto de D'Carton.

Base de datos de Productos	
<b>producto</b>	
	<b>char<sup>57</sup></b>
codigoProducto	5
ref	30
codigoCliente	5
dimension	30
tipoCaja	1
codigoCarton	8
impresiones	2
paquetes	5
<b>cortesFormatos</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
tipoCorte	1
largo	7
ancho	7
cantidad	2
<b>cortesPliego</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
codigoCarton	8
largo	7
udPliego	3
unas	1
tipoCorte	1
division	1
refiles	1
<b>impresiones</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
tinta	7
plancha	6
orden	1
<b>troqueles</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
codigoTroquel	5
<b>ventana</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
acetato	30
largo	7
ancho	7
formato	2
<b>barnizado</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
brilloFrente	1
brilloRever	1
congFrente	1
congRever	1
plastFrente	1
plastRever	1
<b>nombreClientes</b>	
	<b>char</b>
codigoCliente	6
cliente	30
<b>pedidos</b>	
	<b>char</b>
codigoPedido	6
codigoCliente	5
codigoProducto	5
cantidad	10
ordenProduccion	int <sup>58</sup>
prog	1
fechaIngreso	date <sup>59</sup>
fechaEntrega	date
ProgProd	1
<b>pegante</b>	
	<b>char</b>
codigoProducto	5
tapa	4
lado	4
base	4
ventana	4

<sup>57</sup> Char significa, que la variable se guarda en la base de datos como una cadena de caracteres de longitud especifica. En este caso el largo de la cadena se observa al lado del nombre del campo.

<sup>58</sup> Int quiere decir, que la variable se guarda como entero.

<sup>59</sup> Date hace referencia a que la variable se guarda como una fecha con el formato dd/mm/yyyy

## Base de datos Auxiliar2

solicitudTroquel		solicitudPlancha	
	char		char
solicitado	30	solicitado	30
fecha	date	fecha	date
trabajo	1	lado	1
espPleg	1	trabajo	2
espTapa	1	codigoProducto	5
espBase	1	codigoCliente	5
espForm	1	lito	1
espVent	1	planchanva	6
sector	30	planchaant	6
codigoTroquel	5	motivo	1
medidas	20	obs	50
tapa	15	autor	30
base	15	aprob	30
ventana	15		
pegueLat	1	pegantes	
pegueAce	1		char
pegueAut	1	codigoPegante	4
tipoTroquel	1	nombrePegante	30
entraFisica	1		
entraMano	1	plancha	
entraPlano	1		char
otro	15	codigoProducto	5
fechaEntrega	date	codigoPlancha	6
troqueles		tintas	
	char		char
codigoTroquel	6	tipoTinta	10
T2	1	codigoTinta	7
T3	1	ref	30
T4	1	prep	1

Base de datos Cartón	
<b>nombreCarton</b>	
	<b>char</b>
codigoCarton	8
nombreCarton	30
calibre	3
ancho	3
tipoCarton	1
<b>inventarioCarton</b>	
	<b>char</b>
codigoCarton	8
codigoRollo	5
bodega	1
metros	int
ordenProduccion	int
<b>tipoCarton</b>	
	<b>char</b>
nombreCarton	20
codigoCarton	2
tipoCarton	1

Base de datos Producción	
<b>pedidos</b>	
	<b>char</b>
codigoPedido	6
codigoCliente	5
codigoProducto	5
cantidad	10
ordenProduccion	int
prog	1
fechaIngreso	date
fechaEntrega	date
propgProd	1
<b>decisionCorte</b>	
	<b>char</b>
ordenProduccion	int
lugar	1
tipoCorte	1
ordenCorte	int
fechaEntCoop	date
<b>maquinas</b>	
	<b>char</b>
codigoMaquina	2
nombreMaquina	30
estado	1

## Base de datos Tiempos

<b>cortarrollo</b>	
	<b>char</b>
codOper	8
nomOper	30
tipo	3
tiempo	3

<b>guillotina</b>	
	<b>char</b>
codOper	8
nomOper	30
tipo	3
tiempo	3

<b>impresión</b>	
	<b>char</b>
codOper	8
nomOper	30
tipo	3
tiempo	3

<b>barnizado</b>	
	<b>char</b>
codOper	8
nomOper	30
tipo	3
tiempo	3

<b>troquelado</b>	
	<b>char</b>
codOper	8
nomOper	30
tipo	3
tiempo	3