UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

PROGRAMACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN HÍBRIDO MAKE-TO-STOCK/MAKE-TO-ORDER MEDIANTE UN PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO DE ORDENACIÓN GRUPAL (GAHPO)

SCHEDULING OF A HYBRID MAKE-TO-STOCK/MAKE-TO-ORDER PRODUCTION SYSTEM THROUGH THE GROUP ANALYTIC HIERARCHY PROCESS ORDERING (GAHPO)

PAMELA ESCOBAR JARAMILLO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA MAESTRIA EN INGENIERIA

INDUSTRIAL CON ENFASIS EN DPO

2012

PROGRAMACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN HÍBRIDO MAKE-TO-STOCK/MAKE-TO-ORDER MEDIANTE UN PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO DE ORDENACIÓN GRUPAL (GAHPO)

Caso de una Empresa Metalmecánica de Manizales, Colombia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Industrial con énfasis en DPO

AUTOR

PAMELA ESCOBAR JARAMILLO

TUTORES

DRA. DIANA MARÍA CÁRDENAS AGUIRRE

DR. JAIME ALBERTO GIRALDO GARCÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA MAESTRIA EN INGENIERIA

INDUSTRIAL CON ENFASIS EN DPO

2012

1 TABLA DE CONTENIDO

1 TABLA DE CONTENIDO 3
1.1 LISTA DE TABLAS 4
1.2 LISTA DE FIGURAS 5
2 RESUMEN 6
3 ABSTRACT 6
4 INTRODUCCIÓN 7
5 JUSTIFICACIÓN 8
6 OBJETIVOS 9
6.1 OBJETIVO GENERAL 9
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
7 CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO 10
7.1 PROBLEMÁTICA MTS/MTO 10
7.1.1 Problemas en ambiente combinados MTS/MTO 10
7.1.2 Decisión MTS ó MTO 11
7.1.3 Enfoques Híbridos de MTS y MTO 13
7.1.4 Juego de Capacidad 15
7.2 SECUENCIACIÓN 17
7.2.1 Reglas de Secuenciación 18
7.2.2 Reglas de secuenciación simples 18
7.2.3 Reglas de Secuenciación Combinadas 19
7.3 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) 21
7.3.1 MADM y secuenciación 21
7.3.2 Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal 21
7.4 CONCLUSIONES PARCIALES 22
8 CAPÍTULO 2: DESARROLLO METODOLÓGICO 24
8.1 REALIDAD DE LA EMPRESA 24
8.1.1 Mercado Nacional: Enfoque de producción MTS 25
8.1.2 Mercado del Exterior: Enfoque de producción MTO 25
8.1.3 Interacción: Niveles de inventario y tiempos de entrega 26
8.2 REQUERIMIENTOS DEL MERCADO 27
8.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO 29
8.4 PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN 31
8.4.1 Problemas del método actual 32
8.4.2 Necesidades identificadas 33
8.5 MODIFICACIONES AL MÉTODO ACTUAL 33
8.5.1 Calificación multi-criterio 33
8.5.2 Regla Multi-Criterio - Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO) 35

8.5.3 Procedimiento de lotificación de órdenes para asignación balanceada. 43
8.6 CONCLUSIONES PARCIALES 44
9 CAPÍTULO 3: VALIDACIÓN Y RESULTADOS 46
9.1 OBJETIVO DE LA VALIDACIÓN 46
9.2 SIMULACIÓN COMO MÉTODO DE EVALUACIÓN 47
9.2.1 Metodología 48
9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS 60
9.4 CONCLUSIONES PARCIALES 66
10 CONCLUSIONES FINALES 67
Sobre el estado del arte 67
Sobre los objetivos múltiples 67
Sobre el caso de estudio 68
Sobre los resultados 68
11 RECOMENDACIONES 69
12 BIBLIOGRAFÍA 71
13 ANEXOS 76
13.1 ANEXO 1: ENCUESTA COMPARACIÓN POR PARES AHP 76
13.2 ANEXO 2: LISTADO DE ÓRDENES CON SU PRIORIDAD 77
13.3 ANEXO 3: CÓDIGO DEL MODELO DE SIMULACIÓN 82
13.4 ANEXO 4: PARTICIPACIÓN EN CONFERENCIA 93

1.1 LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aportes sobre los problemas de los ambientes combinados MTS/MTO ... 11
Tabla 2. Definición de los criterios de prioridad 34
Tabla 3: Escala de Valores para calificación por pares de Saaty 37
Tabla 4: Calificación de Criterios por Experto 38
Tabla 5: Matriz de Ínidces de Consistencia de Saaty 40
Tabla 6: Proporción de Consistencia (CP) por cada Experto 40
Tabla 7: Métodos de Agregación de Preferencias 41
Tabla 8. Ubicación de juicios en la matriz de comparación 41
Tabla 9. Matriz Agregada de Calificación de Criterios 42
Tabla 10. Pesos definitivos por criterio 42
Tabla 11: Procedimiento de Normalización por Criterio 43
Tabla 12. Definición de prioridades por cada regla 46
Tabla 13. Efecto de las características del producto en la ruta del proceso 52
Tabla 14. Atributos utilizados en la simulación - Elaboración propia del autor 54
Tabla 15. Días de producción- reales y simulados 58
Tabla 16. Resumen resultados en cada medida de desempeño 60
Tabla 17. Makespan por cada regla 61

Tabla 18. Resumen de pedidos a tiempo, retrasados y adelantados. 61
Tabla 19. Resumen de días totales de retraso y adelanto. 62
Tabla 20. Porcentaje de pedidos a tiempo por MTS y MTO..... 63
Tabla 21. Resumen de Penalización 64
Tabla 22. Penalización en MTS y MTO 65

1.2 LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes estrategias de producción..... 14
Figura 2. Serie de tiempo de Enero 2010-Enero 2011 de entradas, ventas, Inventario final y pendientes..... 26
Figura 3. Resumen de la Problemática..... 26
Figura 4. Diferencias en el flujo del proceso de acuerdo a las características del producto..... 31
Figura 5. Procedimiento aplicación del GAHPO..... 35
Figura 6: Jerarquización del problema Multi-Criterio..... 36
Figura 7: Importancia Relativa de los Criterios según cada Experto 39
Figura 8. Diferencias en el flujo del proceso de acuerdo a las características del producto. 43
Figura 9. Diferentes formas de experimentación (Kelton y Law, 2007) 47
Figura 10: Etapas para realizar un estudio de simulación. 48
Figura 11. Flujograma General del Proceso..... 51
Figura 12. Imagen del layout del modelo de simulación. –..... 53
Figura 13. Diferencias en la ruta del proceso según los atributos de la entidad 55
Figura 14. Archivo de Arribos para el modelo de simulación..... 55
Figura 15. Período de Calentamiento 56
Figura 16. Fracción de archivo externo 57
Figura 17. Resultados de la Prueba Kruskal-Wallis para 3 variables 61
Figura 18. Barras de Error - Días retraso/adelanto por cada Regla 62
Figura 19. Barras de Error. Días de retraso/adelanto por cada regla en MTS y MTO 63
Figura 20. Barras de Error- Penalización total por cada regla 64
Figura 21. Diagrama de Cajas- Días de retraso por Regla, agrupado por Importancia del pedido..... 65

2 RESUMEN

Este estudio se ocupa de la programación de una planta de producción que produce productos fabricados bajo inventario (Make-to-Stock, MTS) y productos fabricados bajo pedido (Make-to-Order, MTO). Los ambientes combinados MTS/MTO han atraído recientemente el interés de la industria y la academia para satisfacer los requerimientos del competitivo mercado actual. En el caso particular, este ambiente ofrece la ventaja de permitir una nivelación de capacidad de producción cuando la demanda varía, pero genera dificultades ya que tiene múltiples objetivos. Con múltiples respuestas de interés, el proceso de programación en un ambiente híbrido MTS/MTO necesita considerar múltiples criterios. El estudio está separado en tres etapas: primero, se realiza una revisión profunda de la literatura, explorando los casos MTS/MTO y los métodos de programación multicriterio. Luego, por medio del Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO), se propone una regla de secuenciación multicriterio y se aplica en una industria metalmecánica en Manizales, Colombia. Finalmente, a través del análisis de los resultados de un modelo de Simulación de Eventos Discretos (DES), se compara el desempeño en las respuestas de interés seleccionadas de la regla propuesta y otras reglas de secuenciación simples.

Palabras clave: Make-to-Stock (MTS), Make-to-Order (MTO), programación de sistemas de producción, reglas de secuenciación multicriterio, proceso analítico jerárquico de ordenación grupal (GAHPO).

3 ABSTRACT

This study deals with the scheduling of a production facility which produces both make-to-stock (MTS) and make-to-order (MTO) products. Hybrid MTS/MTO environment has recently attracted industrial and academic interest in order to meet requirements of today's competitive market. On the particular case study, this environment offers the advantage of allowing capacity leveling when demand varies, but generates difficulties because it targets several objectives. With multiple responses of interest, the scheduling process of a hybrid MTS/MTO environment needs to consider multiple criteria. The study is divided on three stages: First, a deep literature review is done, exploring combined MTS/MTO cases and multiple criteria scheduling methods. Afterwards, using the Group Analytic Hierarchy Process Ordering (GAHPO), a multi-criteria dispatching rule is proposed and applied on a metal-mechanic industry located in Manizales, Colombia. Finally, through the analysis of the results of a Discrete Event Simulation (DES) model, the performance of the responses of interest selected of the proposed rule and other single-criteria dispatching rules is compared.

Keywords: Make-to-Stock (MTS), Make-to-Order (MTO), scheduling production systems, multi-criteria dispatching rules, group analytic hierarchy process ordering (GAHPO)

4 INTRODUCCIÓN

La programación de la producción en ambientes combinados Make-to-Stock (MTS)/Make-to-Order (MTO) es el tema que desarrolla este trabajo final, con aplicación específica a una empresa local del sector metalmecánico. Aunque en la cotidianidad de las empresas es una situación común, su tratamiento en la literatura es relativamente reciente y aún limitado; no obstante, el primer capítulo presenta las alternativas que algunos investigadores han presentado y que permiten identificar y evaluar variables y metodologías, tanto desde su factibilidad técnica, como desde su aplicabilidad en la empresa objeto del trabajo.

El segundo capítulo inicia exponiendo características relevantes de la empresa estudiada, especialmente aquellas que influyen en el proceso de programación de la producción a partir de las demandas de dos tipos de mercado, con exigencias conflictivas desde el punto de vista del sistema de producción. Posteriormente, se proponen modificaciones al procedimiento actual de programación que consisten en la secuenciación basada en criterios múltiples utilizando la técnica del Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO).

El tercer capítulo, presenta los resultados más relevantes de su aplicación en el ambiente de la empresa. La técnica seleccionada para la realización de la validación de la propuesta es la simulación, y los resultados obtenidos a partir del modelo son sometidos a análisis estadísticos que demuestran la influencia de los procedimientos modificados en las variables de respuesta seleccionadas.

El trabajo finaliza con conclusiones referidas al cumplimiento de los objetivos propuestos y a los principales resultados obtenidos, así como recomendaciones sobre aquellos aspectos que es necesario abordar tanto en el campo teórico como en el práctico para lograr los mejores resultados de este proceso de mejoramiento.

5 JUSTIFICACIÓN

Los enfoques de producción como Make-to-Stock (MTS) y Make-to-Order (MTO) han sido ampliamente estudiados y aplicados en la práctica. Sin embargo, con un mercado cada vez más variado y exigente, es muy común encontrar casos en los que estos enfoques no se aplican de forma pura sino que diferentes enfoques se aplican conjuntamente en una misma planta de producción. Tener enfoques combinados implica responder a objetivos diferentes, en ocasiones hasta opuestos. Estas combinaciones hacen de cada caso un caso único. Las reglas de secuenciación básicas responden a requerimientos específicos de los diferentes enfoques, y las reglas combinadas existentes son creadas para casos específicos. El presente trabajo propone concentrase en la programación de producción de una planta de manufactura de la ciudad de Manizales que combina los enfoques MTS y MTO, debiendo responder con el nivel de servicio y los tiempos de entrega requeridos, de acuerdo a las prioridades específicas de la planta.

El trabajo resulta novedoso, pues no son muy abundantes los estudios realizados en casos de este tipo y especialmente en aplicaciones prácticas. Adicionalmente, todos los casos son únicos y los detalles de cada investigación son novedosos por sí solos. Este trabajo enriquecerá los antecedentes y permitirá a la Universidad y a la Empresa acercarse a la resolución de problemas mediante métodos particulares.

El trabajo es de interés para la universidad, pues enriquece la documentación en un tema tan importante como es la programación de la producción, pero principalmente por permitirle el acceso a una aplicación en un entorno real y cercano.

El proceso de análisis y sus resultados son de gran utilidad para la empresa, pues su objetivo es atacar un problema real y específico, mediante una forma sistemática, académica y rigurosa. Adicional a los resultados, el mismo proceso de análisis le aportará a la empresa pues la naturaleza de la planta será estudiada profundamente, lo que permitirá encontrar nuevos panoramas de mejora diferentes a los acotados en el presente trabajo.

6 OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Rediseñar el proceso de programación detallada de la producción en una empresa del sector metalmecánico de la ciudad de Manizales, con miras a elevar el nivel de desempeño en los indicadores propuestos.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión de los enfoques de producción MTS y MTO y de los métodos de secuenciación, tanto en la teoría como en el caso específico.
2. Seleccionar las reglas de secuenciación que más se acoplen a las características de la planta y a los requerimientos de los mercados y adaptarlas a la prioridad de los requerimientos.
3. Evaluar las reglas seleccionadas y adaptadas mediante un modelo de simulación según los indicadores definidos.

7 CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

En las compañías de manufactura se utilizan diferentes enfoques de producción para satisfacer los requerimientos de los clientes. Los enfoques más aplicados son Make-To-Stock (MTS), Make-To-Order (MTO), Assemble-To-Order (ATO) y Engineer-To-Order (ETO) (Kalantari, Rabbani, & Ebadian, 2011). Cada uno de estos enfoques responde a diferentes requerimientos del mercado. Por ejemplo, MTS está basado en pronósticos de demanda y se utiliza generalmente para producir productos genéricos y de alta rotación (Rafiei & Rabbani, 2009a). Por otro lado, MTO responde exclusivamente a órdenes en firme y permite mayor flexibilidad de producto, aunque con un tiempo de respuesta menor (Chen, Mestry, Damodaran, & C. Wang, 2009).

No obstante, algunas empresas comparten sus recursos de producción entre varios de estos enfoques, lo que representa un reto adicional a la administración de sus operaciones. La mezcla entre los enfoques MTS/MTO es uno de estos casos, del cual se ocupa el presente trabajo.

7.1 PROBLEMÁTICA MTS/MTO

El ambiente MTS, es un ambiente en el que la empresa manufactura de forma continua artículos para los cuales no hay aún una demanda explícita por parte de algún cliente. Como su nombre lo indica "Make to Stock" - "Fabricado para inventario", los productos manufacturados bajo este esquema se caracterizan porque no se necesita una orden especial para fabricarse, y se producen en forma estándar.

El ambiente MTO representa el escenario de una empresa de manufactura que produce determinado artículo sólo bajo pedido. Se diferencia de ATO (Assembly To Order) en que el artículo es total o parcialmente producido por la empresa (no sólo ensamblado).

La literatura sobre el tema de MTS versus MTO viene desde los 60's cuando Popp (1965) presentó un modelo de un producto con inventario estocástico con lead time cero para comparar los costos simples de fabricarlo bajo MTS o bajo MTO (Rajagopalan, 2002). El estudio de la problemática MTS/MTO se ha mantenido relevante (Soman, 2004), pero se ha vuelto más complejo a medida que la variación de producto aumenta y las condiciones del mercado son más dominantes (Kerkkanen, 2007). Durante los últimos años se ha observado una serie de cambios en las políticas de producción de las compañías y se han visto moverse gradualmente hacia la producción híbrida MTS/MTO (Kalantari et al., 2011).

7.1.1 Problemas en ambiente combinados MTS/MTO

La revisión de literatura deja claro que existen diversos problemas que necesitan ser analizados en la producción en un ambiente combinado MTO/MTS. Soman (2004) divide la problemática en tres grupos de problemas: La pregunta sobre cuáles productos fabricar bajo pedido y cuáles bajo inventario, es la abordada con más frecuencia. Otro problema investigado es el de las políticas de producción e inventario,

el cual incluye decisiones de aceptación de pedidos, determinación de fechas de entrega y niveles de inventario adecuados, asignación de capacidad y tamaños de lote. Por último, están las decisiones sobre la programación y control de la producción que pretenden resolver problemas de secuenciación.

A las problemáticas identificadas por Soman (2004), se suma el "enfoque híbrido de MTS y MTO" o Make-to-Forecast (MTF) como la llaman Meredith & Akinc (2007). Esta problemática se viene estudiado con más fuerza recientemente y consiste en empezar produciendo modelos de productos generales según un pronóstico (MTS) para después modificar los productos parcialmente terminados según los pedidos vayan llegando (MTO). La tabla 1 muestra un resumen de los problemas tratados y los autores que han hecho aportes para su identificación y tratamiento.

Tabla 1. Aportes sobre los problemas de los ambientes combinados MTS/MTO

	Tipo de problemas	Autores
PROBLEMAS FRECUENTEMENTE ANALIZADOS EN UN AMBIENTE COMBINADO MTO/MTS	¿Cuáles productos fabricar bajo pedido y cuáles bajo inventario?	(Rajagopalan, 2002) (Kerkkanen, 2007) (Zaerpour, Rabbani, Gharehgozli, & Tavakkoli-Moghaddam, 2008) (Olhager, 2001) (Soman, 2004)
	Aceptación de pedidos, determinación de fechas de entrega y niveles de inventario, asignación de capacidad y tamaños de lote	(Corti, Pozzetti, & Zorzini, 2006) (Gharehgozli & Rabbani, 2006) (L. Jiang & Geunes, 2006) (Kalantari et al., 2011) (Kaminsky & Kaya, 2006)
	Secuenciación de la producción	(Soman, Pietervandonk, & Gaalman, 2006) (S. Chang, 2003) (Federgruen & Katalan, 1999) (Soman, Vandonk, & Gaalman, 2007) (Wu, J. Jiang, & W. Chang, 2008)
	Enfoques híbridos MTS/MTO (Finish-to-Order - FTO)	(Meredith & Akinc, 2007) (Cattani, Dahan, & Schmidt, 2003) (Kerkkanen, 2007) (Rafiei & Rabbani, 2009b) (Rafiei & Rabbani, 2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores mencionados

Las siguientes secciones desarrollan brevemente los tipos de problemas referidos en la tabla 1. Finalmente, se hará una ampliación del tema de secuenciación en ambientes mixtos MTS/MTO, por ser uno de los temas prioritarios del presente trabajo.

7.1.2 Decisión MTS ó MTO

El aumento de los costos ha llevado a implementar cada vez procesos más eficientes y esbeltos (lean) con el mínimo inventario posible, guiando a las empresas a

basarse en sistemas pull o de "fabricación bajo pedido" - MTO. Al mismo tiempo, el aumento de la presión de la competencia ha llevado a aumentar el énfasis en el servicio al consumidor, lo cual induce a las empresas a tener productos fabricados para inventario – MTS. (Kaminsky & Kaya, 2006).

La mayoría de los estudios encontrados sobre la combinación de MTS/MTO se refieren a la decisión de producir un producto bajo MTS ó bajo MTO. Por ejemplo, por medio de una metodología novedosa que combina un análisis DOFA (debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas) con un Proceso Jerárquico Analítico (AHP), Zaerpour et al. (2008) proponen una estructura de toma de decisiones estratégicas para determinar si un producto particular debe ser producido bajo MTS ó MTO.

Sin embargo, estas decisiones no siempre son posibles, como lo señala Rajagopalan (2002) quien hace referencia a los ambientes combinados MTS/MTO: "*Algunas empresas fabrican todos sus productos bajo pedido y otras fabrican para inventario. Hay una serie de empresas que mantienen una posición intermedia, donde algunos artículos se fabrican para inventario y otros bajo pedido. El ambiente de producción se caracteriza por altos tiempos de cambio, capacidad limitada y efectos de congestión. En dicho ambiente, fabricar un producto bajo pedido reduce el costo del inventario pero puede incrementar el tamaño del lote y los costos de inventario del producto fabricado para inventario. Además, los tiempos de producción aumentan debido a efectos de congestión, resultando en mayores niveles de inventario de seguridad para los productos fabricados para inventario y un nivel de servicio menor para los productos fabricados bajo pedido, lo que conduce a un complejo trade-off.*" Rajagopalan (2002) presenta una heurística para resolver el problema de cuáles productos fabricar bajo pedido y cuáles bajo inventario, por medio de formulación de un problema de programación no lineal entera.

Soman (2004) considera que la decisión sobre si utilizar la política MTO ó MTS es una decisión estratégica y compleja debido a que los factores involucrados son variados, y que la solución debe considerar los trade-offs entre características producto-proceso y los requerimientos del mercado. Kerkkanen (2007), por su parte, distingue estos trade-offs al anotar que producir para inventario es normalmente más efectivo en términos de costo pero producir bajo pedido abre la posibilidad de ofrecer una variedad más amplia de productos personalizados. Además, señala que la necesidad de variar la política de producción para diferentes productos resulta de diferentes motivos, como la nivelación de la capacidad de producción o para garantizar tiempos de entrega más cortos para algunos productos.

La literatura consultada presenta algunos casos de empresas que han enfrentado estos trade-offs: En el caso de la empresa de procesamiento de alimentos que describen Soman, Vandonk, & Gaalman, (2007), producir un gran número de productos en una política MTS pura no es viable debido a la demanda impredecible y por la naturaleza perecedera de los productos. Por otro lado, la política MTO pura también debe descartarse debido a la cantidad de relativamente largas y costosas puestas a punto de las máquinas. Sin embargo, existe la necesidad de ser flexible y

reaccionar a la demanda del consumidor, al mismo tiempo de querer restringir los cambios y producir económicamente por medio de ciclos estables y repetitivos.

Jiang & Geunes (2006) analizan un modelo de ventas detallistas donde el almacén ofrece dos opciones de precio: un precio "Make-to-Stock", donde los productos en inventario son ofrecidos a un precio base, y un precio reducido "Make-to-Order", donde el producto es entregado al cliente después del tiempo de reposición desde el proveedor. Los productos MTO en este estudio son productos estándares y no productos con especificaciones especiales, como son definidos en la mayoría de los demás estudios.

Rafiei & Rabbani (2009a) anotan que, si bien el ambiente MTO logra un mayor nivel de personalización, menor inventario de producto en proceso, menores pendientes o costos de ventas perdidas, menor costo de inventario, mayor flexibilidad, etc., a su vez se le puede atribuir menor utilización de la capacidad, mayores lead times y costos unitarios. Por este motivo el ambiente híbrido MTS/MTO puede lograr un equilibrio entre dos enfoques tan extremos como MTS y MTO.

Una tendencia reciente en la literatura es la consideración de enfoques híbridos MTS/MTO, las cuales se discuten a continuación.

7.1.3 Enfoques Híbridos de MTS y MTO

El enfoque híbrido de MTS y MTO consiste en empezar produciendo modelos de productos generales según un pronóstico (MTS) para después modificar los productos parcialmente terminados según los pedidos que vayan llegando (MTO). Esta política es mencionada por algunos autores como ensamblar-bajo-pedido (assemble-to-order-ATO), terminar-bajo-pedido (finish-to-order FTO) (Olhager, 2001), producir-para-pronóstico (make-to-forecast-MTF) (Meredith & Akinc, 2007).

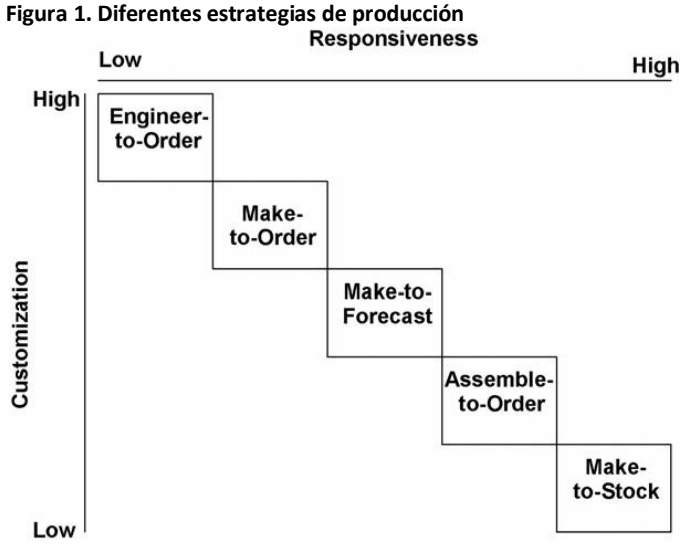
Aunque este enfoque de la combinación MTS/MTO es el más encontrado en la literatura, tampoco hay muchas investigaciones sobre el tema. (Rafiei & Rabbani, 2009a).

Meredith & Akinc, (2007) realizan una descripción de este nuevo enfoque, conceptualizándolo en diferentes industrias frente a otros enfoques de la teoría de producción. Argumentan que el reto más demandante de este enfoque es coincidir las unidades parcialmente terminadas con las órdenes de pedido entrantes, y analizar las reglas de decisión para realizar esta labor.

Kalantari et al. (2011) cita a Yingdong Mu (2001) al describir el estilo de producción MTS/MTO como un sistema en el que una porción opera en modo MTS y la porción restante en modo MTO, refiriéndose a la porción MTS como la inicial y la MTO como la final. Argumentan que una combinación adecuada de MTS y MTO puede explotar las dos ventajas de bajo inventario y tiempo de entrega corto, siendo los beneficios del enfoque de Diferenciación Retrasada (Delayed Differentiation - DD).

En este enfoque, aparecen conceptos como CODP (Customer Order Decoupling Point) u OPP (Order Penetration P oint), que de manera general es el momento cuando un producto es vinculado a un cliente específico y también divide las etapas manejadas con base en los pronósticos de aquellas manejadas con base en las órdenes de los clientes (Kalantari et al., 2011). Diferentes enfoques de manufactura como MTS, ATO, MTO y ETO se refieren a diferentes posiciones de este punto(Gharehgozli & Rabbani, 2006), como lo muestra la Figura 1. En un ambiente híbrido de producción, este punto es cuando operaciones MTS se convierten en MTO, y para determinarlo el factor más importante es el ratio entre el tiempo de producción y el tiempo de entrega requerido más el costo del inventario (Kerkkanen, 2007).

Figura 1. Diferentes estrategias de producción



Fuente: (Meredith & Akinc, 2007)

Rafiei & Rabbani (2009b) proponen una estructura de decisión para abordar el problema de cuáles productos fabricar bajo pedido y cuáles bajo inventario así como para determinar la ubicación del punto OPP en el contexto híbrido MTS/MTO.

El caso analizado en el estudio de Soman et al. (2007), considera una línea de producción con capacidad limitada que produce 230 referencias de productos, presentando una heurística para resolver el problema de la programación de corto plazo. La heurística pretende elegir durante la marcha cuáles productos se fabrican MTO y cuáles MTS, y en el momento de la secuenciación le dan prioridad a las órdenes MTO ordenadas según la fecha de entrega.

Tsubone, Ishikawa, & Yamamoto (2002) proponen un método para diseñar un sistema eficiente de producción combinada MTS y MTO. La demanda insatisfecha de los mercados MTS y el tiempo de producción de los productos MTO son utilizados como medidas de desempeño de la producción. Primero analizan cómo el desempeño de la planta es afectado por la reserva de capacidad y la regla de planeación de producción, para luego presentar un método para diseñar el sistema de planeación de producción para un ambiente combinado MTS/MTO.

7.1.4 Juego de Capacidad

La planeación de la capacidad bajo las políticas de MTS y de MTO es diferente en cada caso. Chen et al. (2009) señalan que la mayor diferencia entre estas dos políticas es que en MTS se producen productos estandarizados utilizando un proceso estandarizado, manteniendo productos en inventario como buffer en contra de la variación de la demanda; en cambio MTO requiere mantener capacidad disponible para satisfacer la demanda futura. Por este motivo, en MTO es primordial el uso efectivo y eficiente de la capacidad disponible, pues la capacidad inutilizada representa disminución de la utilidad.

El objetivo de la planeación de capacidad de corto plazo es asegurar una correspondencia adecuada entre la disponiblidad de recursos y los requerimientos de capacidad para un plan de producción. Chen et al. (2009) describen la dificultad de la planeación en los ambientes MTO. En una operación MTO, se debe especificar los requerimientos de cada recurso para cada ítem de las órdenes existentes y mientras en una operación MTS es posible nivelar la producción mediante la imposición de un período congelado durante el cual no es posible realizar cambios al plan de producción, no es posible hacer lo mismo en una operación pura MTO. Corti, Pozzetti, & Zorzini (2006) también resaltan las dificultadas del control en ambientes MTO: "En particular, los tres elementos fundamentales que dificultan el control de las realidades MTO son: (i) el dinamismo debido a la fluctuación de los volúmenes y las mezclas; (ii) la incertidumbre relacionada con las especificaciones del producto; (iii) la complejidad del flujo del producto."

Debido a que en un operación MTO no es posible apalancarse con el inventario, se debe contar con una estrategia de tiempo extra o subcontratación para ajustar la capacidad a las fluctuaciones de la demanda(Chen et al., 2009). Por el contrario en un ambiente MTS la producción puede ser nivelada y la utilización de la planta aumentada, como ejemplificaGharehgozli & Rabbani, (2006) con un caso de productos de demanda estacional, en el que es poco económico responder a toda la demanda cuando ésta ocurra, así que se recurre al inventario en períodos de baja demanda para anticiparse a demandas pico.

Olhager (2001) también menciona la diferencia del efecto de las fluctuaciones de la demanda en cada tipo de ambiente. En un ambiente MTS la táctica utilizada es mantener una producción fija a través del horizonte planeado, absorbiendo las fluctuaciones en las ventas por medio cambios en el inventario. En ambientes MTO estas fluctuaciones son manejadas por cambios en las órdenes pendientes que, por supuesto, afectan los tiempos de entrega y la confiabilidad.

Como es discutido por Soman et al. (2007), el sistema MTS/MTO es una combinación de los dos sistemas productivos por lo que los problemas que se presentan son diferentes a aquellos de los sistemas puros MTS ó MTO, y es difícil manejar estos problemas simultáneamente. Por ejemplo, mientras que los productos MTS pueden ser manufacturados para llenar la capacidad en períodos de baja

demanda de productos MTO, es difícil entender estas interacciones para saber exactamente cuánto inventario mantener o qué fecha de entrega prometer.

A pesar de dichas dificultades, algunos autores consideran el enfoque híbrido como un método para maximizar la capacidad y sacarle provecho a cada enfoque independiente. Con el enfoque híbrido se utiliza parte de la capacidad para operar en MTS y así reducir los costos de producción en detrimento de costos por excedentes o faltantes, pero al mismo tiempo se utiliza la flexibilidad de la producción MTO para reducir los costos por excedentes o faltantes pero a expensas del aumento en los costos de producción.

Cattani, Dahan, & Schmidt (2003) se enfocan en la decisión de capacidad, analizando las condiciones bajo las cuales una empresa debe adoptar el enfoque dual, y determinando los niveles apropiados de "capacidad eficiente" destinada para MTS y de "capacidad flexible" para MTO. Su método consiste en restringir la capacidad eficiente para evadir exceso de inventario y separar capacidad flexible que utilizará en modo MTO sólo cuando la demanda excede la capacidad de productos MTS. La diferencia de lo propuesto por Cattani et al. (2003) a lo encontrado en el resto de literatura, es que los productos MTO son también productos estándares y no hechos a la medida. De igual forma, Kumar, Nottestad, & Macklin (2007), hacen claridad en que designar un producto como MTO únicamente indica que carece de inventario y no implica que el producto sea hecho bajo pedido debido a especificaciones personalizadas.

Bemelmans (1986) también propone el ambiente híbrido como método para nivelar la capacidad, al describir el concepto de "inventario orientado a la capacidad", en el que la incertidumbre de la demanda de un producto determinado puede ser cubierta con el inventario de otro producto cuya demanda es mayor o menos incierta. Dice que este concepto puede ser extendido a la posibilidad de tener más inventario de productos MTS para tener mayor capacidad disponible para productos MTO. El caso de estudio de la investigación de Wu et al. (2008) consiste en una empresa de fundición de semiconductores que es esencialmente una planta MTO pero que, en temporadas de demandas bajas, puede entrar en un modelo híbrido, produciendo productos MTS así como productos MTO para mantener la utilización de la maquinaria.

Los diferentes enfoques referenciados, muestran la dificultad de la administración de ambientes de producción combinados, especialmente en el nivel de programación a corto plazo. La siguiente sección, aborda en un mayor nivel de detalle la función de secuenciación, que junto con la asignación de cargas, se convierte en una de las funciones centrales del proceso de programación detallada.

La siguiente sección menciona y desarrolla algunas de las propuestas que la literatura especializada hace al respecto, a partir de los procesos de secuenciación y administración de la capacidad.

7.2 SECUENCIACIÓN

Según Vollman (1997), la secuenciación permite establecer el orden de paso de los pedidos por los centros de trabajo para cumplir las fechas de entrega con el menor volumen de inventarios y recursos posible. En los entornos combinados MTS/MTO la secuenciación es una de las funciones de más alto impacto en el proceso de gestión de la producción, como lo muestran los casos presentados por diferentes autores que se citan a continuación.

Soman et al. (2006) examinan el problema de programación y secuenciación en un ambiente combinado MTS/MTO de procesamiento de alimentos e informan sobre el desarrollo de una política de control de la producción y los inventarios. En cuanto a la secuenciación, utilizan una política simple de darle mayor prioridad a los productos MTO en el momento en el que ocurre la demanda, argumentando que deben tener prioridad para lograr un buen desempeño de tiempo de entrega, ya que, por definición, éstos no tienen inventario de producto terminado.

El estudio de Rajagopalan (2002) se enfoca en el problema de decidir cuáles productos se producen bajo pedido y cuáles bajo inventario, proponiendo un procedimiento heurístico con restricciones de nivel de servicio.

El estudio de Youssef, Delft, & Dallery (2004) se centra en el análisis del impacto en el desempeño global que tiene el método de secuenciación utilizado en una producción con enfoque híbrido MTS/MTO. En el estudio comparan dos reglas de secuenciación: Primero en entrar, rimero en salir (FIFO) y una Política de Prioridad (PR) en la que las órdenes de productos de Bajo Volumen tienen prioridad sobre los productos de Alto Volumen.

Jiang, & Chang (2008) presentan un método de secuenciación para un fábrica de semiconductores. El procedimiento de secuenciación consiste primero en priorizar las órdenes MTS según la regla SRPT (tiempo de procesamiento restante más corto); segundo en priorizar las órdenes MTO según la fecha de entrega más próxima y tercero darle prioridad a las órdenes MTO sobre las órdenes MTS ya que es más importante la entrega a tiempo que la generación de trúput de productos MTS.

El método de secuenciación propuesto por S. Chang (2003) se trata de separar en 4 colas diferentes cada orden, siendo la cola 1 de mayor prioridad y la 4 la de menor prioridad. A los productos MTO se les asigna el número de cola de acuerdo al cálculo del Slack (tiempo a fecha de entrega menos tiempo restante de producción). A los productos MTS, el número de cola es asignado de acuerdo al producto en proceso disponible para el cuello de botella. Dentro de cada cola, el orden se define según el tiempo de procesamiento más corto.

El estudio de Federgruen & Katalan, (1999) busca medir el impacto de fabricar productos MTO en un sistema MTS, analizando el efecto de diferentes reglas de prioridad en medidas de desempeño como niveles de inventario, tiempo de espera, así como costos de montaje, de almacenamiento y de pendientes. Las reglas de prioridad

definen la forma en la que las órdenes MTO interrumpen la producción normal de los productos MTS.

7.2.1 Reglas de Secuenciación

Las reglas de secuenciación se utilizan para seleccionar el siguiente trabajo a procesar de varios trabajos que esperan del servicio de un recurso libre. La selección de la regla de secuenciación a utilizar se dificulta pues hay n! formas de secuenciar los n trabajos que hay en cola para un recurso particular y las condicionas de la planta influyen en la secuencia óptima para dicho recurso (Rajendran & Holthaus, 1999). Las reglas de secuenciación son normalmente destinadas a minimizar costos de inventario y/o de tardanzas.

Holthaus y Rajendran (1997) proponen la siguiente clasificación para las reglas de secuenciación:

1. Reglas basadas en tiempo de proceso.
2. Reglas basadas en fechas de entrega.
3. Reglas simples que no consideren tiempo de proceso ni fechas de entrega.
4. Reglas que consideren condiciones de la planta de producción
5. Reglas que combinen 2 ó más de las reglas anteriores.

7.2.2 Reglas de secuenciación simples

Las reglas de prioridad más conocidas son (Heizer & Render, 2004):

- PEPS (Primero en entrar, primero en salir): El primer trabajo en llegar al centro de trabajo se procesa primero.
- TCP (Tiempo de procesamiento más corto): Los trabajos más breves se procesan y terminan primero.
- FEP (Fecha de entrega más próxima): El trabajo que tiene fecha de entrega más próxima se selecciona primero.
- TPL (Tiempo de procesamiento más largo): Los trabajos más largos y más grandes a menudo son muy importantes y se seleccionan primero.
- RC (Razón crítica): Es un índice que se calcula dividiendo el tiempo que falta para la fecha de entrega entre el tiempo de trabajo que queda.
- Regla de Johnson: Es un enfoque que minimiza el tiempo de procesamiento para establecer la secuencia de un grupo de trabajos en dos centros de trabajo, al mismo tiempo que minimiza el tiempo muerto total en los centros de trabajo.

El tiempo de procesamiento más corto es, en general, la mejor técnica para minimizar el flujo de trabajo y el número promedio de trabajos en el sistema. Su mayor desventaja es que los trabajos con tiempo de procesamiento más largo podrían retrasarse de manera continua por dar prioridad a los trabajos de duración más corta.

A los clientes puede parecerles injusto y es necesario realizar ajustes periódicos para hacer los trabajos más largos.

Primero en entrar, primero en salir, no califica bien en la mayoría de los criterios (pero tampoco califica mal). Sin embargo, tiene la ventaja de que a los clientes les parece justo, lo cual es importante en los sistemas de servicios.

La fecha de terminación más próxima minimiza la tardanza máxima, lo cual puede ser necesario para los trabajos que imponen una penalización costosa si no se entrega en la fecha comprometida.

En su concepción original, las reglas de secuenciación mencionadas no consideran el tipo de entorno de producción en el que son utilizadas, por lo que su aplicación requiere la definición previa de una medida de desempeño comparativa, que generalmente está relacionada con consideraciones de tiempo promedio del ciclo del cliente, promedio de pedidos retrasados o tiempos máximos de retraso que por definición están muy relacionadas con ambientes MTO.

No obstante, los ambientes combinados MTS/MTO, de interés en el presente trabajo, requieren un manejo diferenciado, tal como se propone por parte de los autores que se consideran en la siguiente sección.

7.2.3 Reglas de Secuenciación Combinadas

Aunque las reglas de secuenciación simples han sido aplicadas ampliamente en la práctica, su eficacia se mantiene limitada debido a su falta de visión global. Las reglas de secuenciación compuestas han demostrado ser más efectivas ya que son construidas por medio de la experiencia humana (Tay & Ho, 2008).

Dabbas, et. al. (2001) proponen un modelo con el objetivo de optimizar simultáneamente múltiples respuestas de interés. Esto se logra al combinar múltiples criterios de secuenciación utilizando una combinación lineal con pesos relativos. Los pesos identifican la contribución relativa o importancia de los diferentes criterios en las respuestas objetivo.

Wang & Chang (2006) utilizaron una combinación de reglas para evaluar el desempeño de una planta de fabricación de circuitos. Los resultados de la simulación sugirieron que la combinación de las reglas 'Distancia más corta', 'Producto más cerca' y 'Primero-en-entrar-primero-en-salir' logró los mejores resultados.

Lin et al. (2006) citan a Hodgson and Wang, quienes estudiaron estrategias de control para un sistema híbrido Push/Pull, y sus resultados mostraron que la política híbrida logró reducir el inventario total y aumentó la fiabilidad de las entregas.

Yao, Jiang, Li, Zhang, & Geng (2011) proponen un enfoque de programación dinámica multi-objetivo, que combina tres atributos, basado en una técnica híbrida de

toma de decisiones con múltiples atributos (MADM - multiple atribute decisionmaking). Los tres criterios de secuenciación que consideran como atributos son: 1. fecha de entrega para maximizar la entrega a tiempo, 2. el costo de los montajes para aumentar la utilización de las máquinas y los tiempos de producción y 3. el balanceo de la línea para balancear la línea de producción.

Cada sector de la industria experimenta problemas de decisión diferentes en relación al tipo de cliente que atienden, sus necesidades y el tipo de ambiente competitivo en el cual operan, así que diferentes sistemas de control de producción y de mercadeo son requeridos para cada sector (Kingsman, Hendry, Mercer, & Souza, 1996).

Wu et al. (2008) anotan que la mayoría de estudios se centran en fábricas que trabajan ya sea con un modelo MTO o con un modelo MTS. En la práctica, la medida de desempeño clave para productos MTO es el porcentaje de entregas a tiempo, mientras que para productos MTS es trúput. Estas dos medidas están normalmente en oposición. Los métodos de secuenciación desarrollados para escenarios MTO o MTS simples pueden lograr un desempeño menor en un escenario híbrido MTS/MTO.

Kaminsky & Kaya (2006) consideran una cadena de abastecimiento híbrida con productos fabricados bajo MTO y otros bajo MTS. Su estudio tiene diferentes objetivos como la decisión de producir cada producto MTO ó MTS, la secuenciación de producción y la definición de fecha de entrega. En el objetivo de secuenciación, proponen una heurística que secuencia los trabajos según Tiempo más corto de Procesamiento (SPT).

La regla de secuenciación utilizada en la investigación de Soman et al. (2006) consiste en darle prioridad a los productos con nivel de inventario menor al inventario de seguridad definido. En cuanto a los productos MTO, debido a que su inventario de seguridad es cero, cuando una orden MTO entra al sistema, tendrá prioridad por encima de las órdenes MTS. Igualmente, Soman et al. (2007) dan preferencia a las órdenes MTO, pero por ser un problema en el que los cambios de referencia son importantes, el método de secuenciación consiste en separar los productos a fabricar por tipo de familia, secuenciar las familias para lograr tiempos de cambio menores, y dentro de la familia, los productos son secuenciados basándose en su fecha de entrega.

El proceso de secuenciación en el estudio de Chang (2003) consiste en programar las órdenes MTO primero de acuerdo a las fechas de entrega prometidas y luego liberar las órdenes de MTS, con el fin de completar la capacidad restante del programa de MTO. El autor argumenta el hecho de darle prioridad a las órdenes MTO al decir que un proceso de secuenciación rígido es clave para los productos MTO debido a que hay fechas de entrega que se deben cumplir, pero que para los productos MTS no es necesaria esta rigidez debido a que la producción de estos productos es para inventarios de seguridad.

7.3 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

La creciente complejidad del entorno de la ingeniería y la gestión ha aumentado el interés en los problemas sobre la toma de decisiones. En la última década, algunos estudios se centraron en los problemas de decisión multi-criterio (MADM) para proporcionar resultados fiables al tener en cuenta el análisis de los expertos en lugar del análisis de un solo experto. Esto hace que los métodos de decisión grupal multi-criterio (MAGDM) estén atrayendo cada vez más atención en la gestión y han recibido una gran atención de los investigadores Yue (2011). Los problemas MAGDM tienen tres características comunes: alternativas, atributos múltiples con unidades inconmensurables y varios expertos, en la que los pesos de los expertos juegan un papel muy importante, por lo que en la actualidad muchos métodos han sido propuestos para determinar los pesos de los expertos (Huizingh & Vrolijk, 1997).

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es un método de decisión multi-criterio que produce un vector de prioridad correspondiente a la información de preferencias del tomador de decisión, basada en comparaciones por pares de los diferentes factores de decisión.

El Proceso Analítico Jerárquico fue introducido como respuesta a la necesidad de planeación y asignación de recursos militares en la década de los 70's (Zaerpour, Rabbani, Gharehgozli, & Tavakkoli-Moghaddam, 2008). AHP ha sido ampliamente utilizado como una herramienta de toma de decisiones con criterios múltiples o como una técnica de estimación de pesos, en áreas como selección, evaluación, planeación, desarrollo y demás.

7.3.1 MADM y secuenciación

Debido a que uno de los usos de los métodos de decisión multi-criterio (MADM) es la priorización, estos métodos pueden ser utilizados para la secuenciación de la producción cuando hay diferentes criterios para priorizar las órdenes a producir.

Por ejemplo, Yao, Jiang, Li, Zhang, & Geng (2011) proponen un enfoque de programación dinámica multi-objetivo, que combina tres atributos, basado en una técnica híbrida de toma de decisiones con múltiples atributos.

Topaloglu (2006) utilizó el método AHP para hallar la importancia relativa de las restricciones flexibles en la programación de una sala de emergencias de un hospital.

7.3.2 Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal

El Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO- Group Analyitic Hierarchy Process Ordering) es un nuevo método de ayuda para la decisión multi-criterio (MADM), para ordenar alternativas en una decisión de grupo (Escobar, 2004). Otra particularidad de GAHPO es la incorporación de la "equidad" en la asignación de

pesos a los tomadores de decisiones. Al aplicar este método, Ishizaka & Labib (2011a) encontraron cuatro ventajas principales: reducción significativa de tiempo y esfuerzo en el proceso de decisión; facilidad para la toma de decisiones para llegar a un consenso, la mejora de la calidad de la decisión y la documentación con la justificación de la decisión tomada.

7.4 CONCLUSIONES PARCIALES

La búsqueda bibliográfica desarrollada ha permitido identificar y validar los entornos de producción MTS/MTO como una realidad que va más allá del día a día de las organizaciones, para convertirse en un tema de estudio novedoso para el que se han producido y validado un número significativo de técnicas en respuesta a las complejidades que le son propias a este tipo de entornos de producción.

Si bien algunos de los autores consultados han tratado de simplificar el reto que representa la administración de estos ambientes duales, buscando la opción de decidir entre uno y otro de manera prioritaria, son también notables los aportes documentados sobre alternativas de gestión, especialmente en las funciones del nivel más detallado del proceso de planeación de la producción.

Las decisiones de administración de la capacidad y secuenciación aparecen en la literatura consultada como claves dentro del proceso de gestión de la producción en ambientes combinados MTS/MTO, por lo que serán puntos focales de la propuesta a desarrollar en el presente trabajo final.

En lo referente a la administración de la capacidad, los autores plantean diferentes estrategias, basadas fundamentalmente en la priorización de los objetivos de disponibilidad y cumplimiento en la entrega, para lo cual utilizan recursos como la subcontratación y los inventarios. Uno de los aportes más interesantes encontrados en la revisión bibliográfica lo constituye el denominado *enfoque híbrido,* consistente en la asignación de una porción de capacidad a la producción MTS, dejando un margen flexible que favorezca la oportunidad de respuesta a los pedidos específicos.

También es notable en los aportes estudiados, la estrecha relación entre las funciones de administración de capacidad y secuenciación, de tal manera que es la priorización de las diferentes órdenes de producción, la que define finalmente la manera más eficiente de asignar la capacidad disponible entre los requerimientos de producción.

Las decisiones de secuenciación, por su parte, se toman en los casos documentados a partir de reglas de priorización multicriteriales. Los criterios más utilizados en la literatura consultada son tiempo de respuesta, fiabilidad, trúput y nivel de inventarios, los cuales guardan coincidencia con los que habitualmente son utilizados en el entorno que constituye el objeto de trabajo del presente documento.

Los elementos señalados a partir de la bibliografía consultada permiten una mejor comprensión del problema que significa la gestión de la producción en ambientes combinados MTS/MTO, y servirán como bases metodológicas y conceptuales para el abordaje propuesto en el presente trabajo.

8 CAPÍTULO 2: DESARROLLO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se presenta la problemática actual de la empresa y se plantea una solución. Primero se presenta la realidad de la empresa, donde quedan consignadas las características relevantes para lograr la claridad sobre la necesidad de intervenir el proceso de programación de la planta que funciona bajo un ambiente MTS/MTO. Luego se exponen los requerimientos de cada mercado los cuales se traducen en medidas de desempeño concretas. Se continúa con la descripción del proceso de programación actual y la identificación de los problemas y las necesidades de intervención. Con las necesidades identificadas, se procede con el planteamiento de la solución que consiste en la selección de los criterios de priorización y la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO) para la definición de pesos relativos a dichos criterios, para la calificación de las órdenes de producción. Se termina con la descripción del procedimiento para la lotificación de órdenes para la asignación balanceada de carga.

8.1 REALIDAD DE LA EMPRESA

Las acciones administrativas utilizadas en enfoques de producción MTS ó MTO puros son necesarios en ambientes mixtos MTS-MTO, pero la producción, en una mezcla de productos MTS y productos MTO y sus interacciones con la capacidad limitada compartida, abre posibilidades interesantes así como problemas para la planeación de la producción. Por ejemplo, los productos MTS pueden ser producidos para llenar la capacidad en períodos de baja demanda de productos MTO, pero por otro lado es de gran dificultad entender completamente estas interacciones para responder preguntas como cuánto inventario se debe mantener o cómo cumplir las fechas de entrega.

La empresa a la que se aplica el presente trabajo se dedica a la fabricación, distribución y venta de herramientas en general, principalmente para el agro, la construcción, sectores industriales y el hogar. Cuenta con una estructura de fabricación ubicada en Manizales distribuida en cinco plantas. El presente trabajo se centra en una de las cinco plantas, la cual es la planta más grande (por operarios empleados y facturación) y es la base económica de la empresa.

El sistema productivo como configuración un layout funcional orientado a los procesos, con un flujo en lotes, según la clasificación de Miltenburg (2005). Produciendo un solo producto con características muy definidas, se manejan muchas variaciones (marcas, terminados, ensamble, formas, empaque, etc), en volúmenes medios y altos. La producción de la planta se distribuye aproximadamente en un 30% para el mercado nacional y un 70% para clientes en el exterior, ambos mercados contando con gran importancia:

- El **mercado nacional** se atiende por medio de marcas propias las cuales son líderes del mercado, manteniendo una participación no menor del 70%. A pesar de ser de menores volúmenes frente al mercado de exportación, el trúput que

aportan las ventas del mercado nacional alcanza a ser hasta de un 50% del trúput total de la planta. Además, la venta del producto fabricado en esta planta es vital para el fortalecimiento del canal de distribución que permite estimular las ventas de los demás productos del catálogo.

- El **mercado de exportación**, por su parte, se compone de más de 50 países, atendidos con numerosas marcas propias y ajenas, siendo líderes en diferentes mercados. La sumatoria de estos mercados le aporta a la planta el volumen necesario para mantener una alta productividad.

Las características diferentes de cada mercado obligan a que cada uno deba ser abastecido con un enfoque de producción distinto.

.

8.1.1 Mercado Nacional: Enfoque de producción MTS

La fabricación de productos con destino al mercado nacional se realiza por medio de un enfoque de producción MTS debido principalmente a:

- Las referencias exigidas por el mercado son estándares y hay poca variación en los modelos.
- Las cantidades requeridas son muy pequeñas debido a la cercanía al consumidor final.
- El tiempo de entrega requerido por los clientes es muy corto.
- Las cantidades totales de ventas se dividen en muchas referencias, lo que hace que las cantidades vendidas por referencias sean relativamente pequeñas comparadas con la capacidad diaria de la planta.

8.1.2 Mercado del Exterior: Enfoque de producción MTO

Los productos con destino en el exterior se fabrican bajo un enfoque de producción MTO debido principalmente a:

- Se fabrican los modelos requeridos en cada país, los cuales son muy variables y con exigencias personalizadas de características específicas.
- Las cantidades y la frecuencia de los pedidos son muy variables.
- Por optimización de los costos de transportes, se despachan generalmente grandes cantidades.

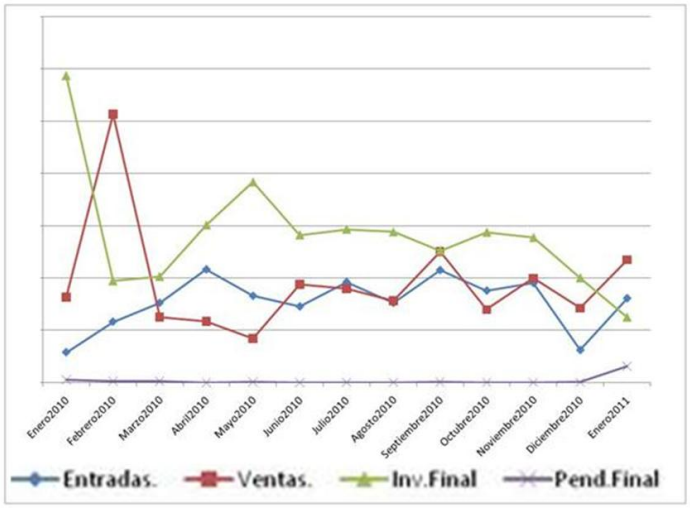
Por motivos prácticos, a partir de ahora se utilizará el término "Producto MTS" para referirse a los productos para el mercado nacional y "Producto MTO" para los productos del mercado de exportación.

8.1.3 Interacción: Niveles de inventario y tiempos de entrega

Debido a la flexibilidad de la programación de la producción, los niveles de inventario de los productos del mercado nacional tienen una alta variabilidad, pues en ocasiones están muy altos (cuando no hay suficientes pedidos del exterior) y en otras llega a puntos críticos, incluso roturas de stock.

La Figura 2 muestra la variación del inventario de productos MTS que resulta de la interacción entre ventas y producción, y el aumento de los pendientes durante el mes de enero. A principio de año había escasez de pedidos del exterior mientras que al final se produjo muy poco de productos del mercado nacional para poder cumplir con los pedidos del exterior.

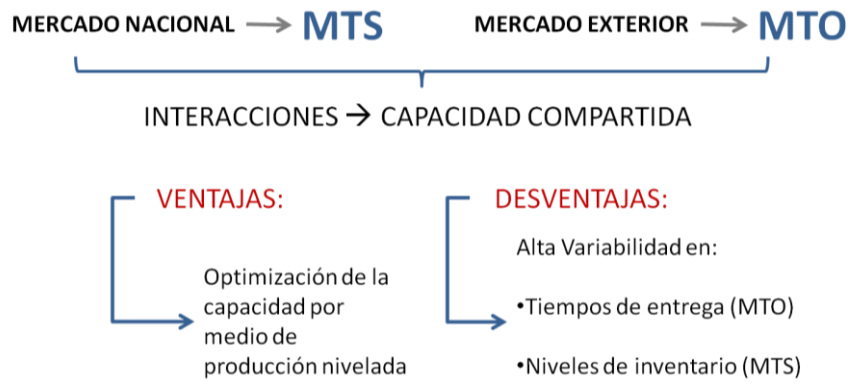
Figura 2. Serie de tiempo de Enero 2010-Enero 2011 de entradas, ventas, Inventario final y pendientes



Fuente: Elaboración propia del autor

La situación de tener la capacidad compartida entre productos fabricados para inventario y productos fabricados bajo pedido, permite maximizar la capacidad de producción al mantener una producción nivelada, pero agrega una alta variabilidad en los tiempos de entrega de productos MTO y en los niveles de inventario de productos MTS, poniendo en riesgo el nivel de servicio ofrecido en ambos mercados:

Figura 3. Resumen de la Problemática



Fuente: Elaboración propia del autor

En cualquier caso, la programación de la producción debe apuntar a maximizar las ventajas y minimizar las desventajas. En un ambiente con estas características, la programación debe contribuir a maximizar la capacidad de producción, pero manteniendo los niveles de inventario y tiempos de entrega requeridos para lograr el nivel de servicio esperado.

8.2 REQUERIMIENTOS DEL MERCADO

En el presente trabajo se definen medidas de desempeño, como los objetivos que el sistema de producción busca cumplir, con relación a la empresa en sí misma y a los mercados que atiende. Estos han sido divididos en tres escenarios, las medidas de desempeño de orden general, y las que se relacionan con los objetivos o indicadores principales de cada uno de los dos tipos de mercado que son atendidos.

8.2.1.1 Requerimientos Generales

La principal medida de desempeño de la planta es las unidades totales entregadas por período, debido al requerimiento de aumentar la utilización de la capacidad instalada y las unidades por operario contratado. Cuando la unidades a producir son la variable de entrada, la variable de desempeño sería el tiempo utilizado para fabricar dichas unidades. Para esto se utiliza el indicador "makespan" total. El "makespan" de una orden es el tiempo desde el inicio de su producción hasta su terminación (Olafsson & Li, 2010).

8.2.1.2 Requerimientos Mercado MTS

El requerimiento base del mercado nacional (MTS) es mantener el Nivel de Servicio definido. El nivel de servicio es definido por Christopher (2005) como el porcentaje de veces que el pedido es despachado al 100%. Debido a que el mercado MTS se atiende del inventario de producto terminado, el Nivel de Servicio depende de los niveles de inventario.

Para lograr el nivel de servicio deseado debe mantenerse el nivel de inventario suficiente para atender las órdenes entrantes. El inventario debe ser repuesto oportunamente para así evitar roturas de stock. Con este objetivo se calcula la fecha en la que la mercancía debe entrar a la bodega, así:

$$\boldsymbol{F_{Ent}} = \boldsymbol{F_{Hoy}} + \boldsymbol{D_{Inv}}$$

Donde:

$\boldsymbol{F_{Ent}} = Fecha\ de\ entrega$
$\boldsymbol{F_{Hoy}} = Fecha\ del\ cálculo$
$\boldsymbol{D_{Inv}} = Duración\ del\ inventario\ (días)$

La duración del inventario se calcula de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{D_{Inv} = \frac{I_{ini} - I_{seg}}{P_{mes}} \; x \; 30 \; días}$$

Donde:
$\boldsymbol{I_{ini}} = Unidades\ en\ inventario$
$\boldsymbol{I_{seg}} = Inventario\ de\ seguridad$
$\boldsymbol{P_{mes}} = Pronóstico\ de\ ventas\ del\ mes$

Por ejemplo, para un producto con pronóstico de ventas de 100 unidades mes, tiene en existencia 80 unidades, pero el inventario de seguridad está calculado en 20, así que tiene 60 para responder a la venta, que durarían 0.6 meses, o en días, (0.6 x 30), el inventario tienen una duración de 18 días.

Para el cálculo del inventario de seguridad se utiliza la siguiente fórmula:
$\boldsymbol{I_{seg} = k\sigma_L}$
Donde:
$\boldsymbol{k} = Factor\ de\ seguridad, que\ depende\ del\ nivel\ de\ seguridad.$

$\boldsymbol{\sigma_L} = \sigma\ x\ LT =$
$Desviación\ estándar\ de\ las\ ventas\ pronosticadas\ para\ el\ lead\ time$

Sin embargo, hay otros dos factores que agudizan la rotura de stock, que son la importancia del producto y el trúput de la orden.

1. **Importancia**: una rotura de stock es más crítica cuando se da en un producto de mayor importancia que otro. La importancia de un producto la dan características como las siguientes:
    a. Participación en el mercado: cuando un producto tiene una alta participación en el mercado, no tener el producto disponible pone en riesgo la imagen de la marca y las ventas de la línea.
    b. Estado de la competencia: si el producto tiene una fuerte competencia, no tener el producto disponible le da oportunidades a la competencia.
    c. Importancia para el canal de distribución: son productos que se deben tener disponibles pues son ejes de distribución importantes para otros productos del portafolio.
    d. Ubicación en la curva de vida del producto: si un producto está en la etapa de introducción o crecimiento, la disponibilidad del producto es clave para el éxito del producto en el mercado.
    e. Trúput aportado al año: los productos con mayor contribución al año son los productos estrella y sus ventas se deben cuidar con prioridad.
    f. Factores estacionales: hay productos que por su característica de uso estacional deben estar disponibles en el momento justo o la venta se pierde.

2. **Trúput de la orden:** Mientras más trúput aporte el producto que tenga una rotura de stock, mayor será la disminución de la utilidad de la empresa. Por este motivo, es peor tener rotura de stock de un producto con un trúput mayor que otro.

8.2.1.3 Requerimientos Mercado MTO

El principal requerimiento de los productos del mercado del exterior (MTO) es que su pedido sea despachado a tiempo. Para el satisfactorio cumplimiento de estas fechas de entrega debe analizarse el método de asignación de las mismas.

Clientes tipo 1: La fecha es definida según los plazos estipulados en el contrato de relación comercial.

Clientes tipo 2: La fecha se define según la disponibilidad de producción en el momento de llegada del pedido, se le comunica al cliente y éste acepta el compromiso de entrega.

Sin embargo, estas fechas en ocasiones son modificadas por la recepción de pedidos "urgentes" y por solicitudes especiales de los clientes.

El cumplimiento de estas fechas de entrega también tiene factores que intensifican su importancia o la rebajan:

1. **Importancia del cliente o pedido:** El incumplimiento de la fecha de entrega puede ser más crítico en unos pedidos que en otros, según las siguientes características:
    a. Exigencia del cliente: es de máxima importancia el cumplimiento de fechas de entrega a clientes altamente exigentes que tienen, por ejemplo, cláusulas de penalización por incumplimiento.
    b. Importancia relativa del pedido: hay pedidos que son realizados para una época específica del año, como para la cosecha estacional o una licitación especial, los cuales el cumplimiento de la fecha de entrega es muy importante.
    c. Nivel de inventario del cliente: si un cliente está con riesgo de una rotura de stock, cumplirle a éste es más importante que cumplirle a otro que tiene un buen inventario.
2. **Trúput del pedido**: el retraso de una orden con un alto trúput es más crítico que el de una de menor trúput.

8.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO

De acuerdo a lo enunciado anteriormente sobre los requerimientos de los mercados MTS y MTO, la medidas de desempeño a evaluar son:

1. **% Entrega a tiempo (ET):** Se refiere al porcentaje de órdenes despachadas a tiempo. Es la razón entre las órdenes despachadas a tiempo y el total de

órdenes solicitadas. Las fechas de entrega son dadas en semanas; por consiguiente, si una orden se despacha en la semana para la cual tenía fecha de entrega, es considerada como Entrega a Tiempo. Si se despacha la semana siguiente o después, es considerada Entrega Tardía. El objetivo es maximizar la Entrega a Tiempo.

$$ET = \frac{\text{Número de órdenes despachadas a tiempo}}{\text{Órdenes a tiempo} + \text{órdenes tardías} + \text{órdenes anticipadas}} \text{ x } 100\%$$

2. **Variabilidad de la entrega (VarEnt):** se refiere a la variabilidad ponderada promedio del retraso/adelanto de las órdenes entregadas (desviación estándar). El objetivo es minimizar la variabilidad de la entrega.

$$VarEnt = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ER_i - FE_i)^2}{n}}$$

Donde:

$n = número\ total\ de\ órdenes$
$ER_i = Fecha\ entrega\ real\ de\ la\ orden\ i$
$FE_i = Fecha\ entrega\ prometida\ de\ la\ orden\ i$

3. **"Makespan:" total (hrs):** El "makespan" de una orden es el tiempo desde el inicio de su producción hasta su terminación (Olafsson & Li, 2010). El valor a medir será la sumatoria del "makespan" de todas las órdenes. El objetivo será minimizar el "makespan" total.

$$Makespan\ total = \sum_{j=1}^{n} t_{fj} - t_{ij}$$

Donde:

$t_{fj} = Tiempo\ final\ para\ la\ orden\ j$
$t_{ij} = Tiempo\ inicial\ para\ la\ orden\ j$

4. **Penalización por tardanza ($):** ésta es de las medidas de desempeño más importantes pues agrupa todos los requerimientos del mercado. La medida consiste en agregarle al retraso los factores de criticidad de importancia y trúput. La penalización se calcula multiplicando el número de días de retraso por un porcentaje del trúput de la orden, porcentaje definido de acuerdo a la importancia del cliente:

$$Penalización\ por\ tandanza = \sum_{i=1}^{n} DR_i \times TR_i \times \frac{IM_i}{10000}$$

Donde:

$DR_i = Días\ de\ retraso\ en\ la\ orden\ i$ (Días)
$TR_i = Trúput\ de\ la\ orden\ i$ ($)
$IM_i = Importancia\ de\ la\ orden\ i$ (Cte)

Al dividir por 10000, se está penalizando por cada día de retraso en un 0.01% del trúput para los clientes de importancia 1 y 0.09% para los clientes de importancia 9.

Por ejemplo, para una orden retrasada en cinco días, con un trúput de 70.000 y una importancia de 6, la penalización para esta orden se calcularía así:

5 x $70.000.000 x 0.0006 = $210.000

5. **Penalización por adelanto:** esta medida de desempeño es importante pues su minimización reduce los costos de inventario provenientes de almacenar un pedido por más tiempo del necesario. Se calcula con el producto del número de días de adelanto, el número de unidades del pedido y la constante de costo de almacenamiento por unidad.

$$Penalización\ por\ adelanto = \sum_{i=1}^{n} DA_i \times Ud_i \times C$$

Donde:

$DA_i = Días\ de\ adelanto\ en\ la\ orden\ i$ (Días)

$Ud_i = Número\ de\ unidades\ de\ la\ orden\ i$ (Uds)

$C = Costo\ de\ mantenimiento\ diario\ de\ almacenamiento\ por\ unidad$ ($)

6. **Penalización por no entrega a tiempo:** se calcula sumando la penalización por retraso y la penalización por adelanto. Esta medida de desempeño es considerada la más importante de todas pues, como Indicador Global, considera casi todos los aspectos, como la entrega a tiempo, la importancia y el trúput de la orden y el costo de almacenamiento. El objetivo será minimizar la penalización.

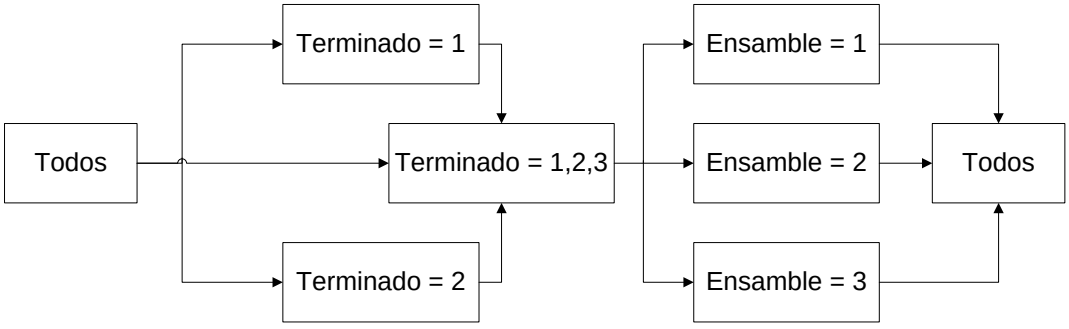
$$Penalización\ por\ no\ entrega\ a\ tiempo = Penalización\ por\ retraso + Penalización\ por\ adelanto$$

8.4 PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN

La planta se programa para un período de un mes y el proceso de programación llevado a cabo actualmente es el siguiente:

1. **Capacidad de producción:** El primer paso es precisar la capacidad de producción en el período programado, tanto en número de unidades totales como en unidades máximas por tipo de producto, de acuerdo a la capacidad de cada ruta del proceso.

Figura 4. Diferencias en el flujo del proceso de acuerdo a las características del producto



Fuente: Elaboración propia del autor

2. **Asignación a cada mercado:** Después se define la cantidad a producir para el mercado nacional y para el mercado de exportación. Para el mercado nacional se utiliza el software ForecastPro, que arroja los rangos probables de ventas para cada referencia. Mediante el cálculo del inventario de seguridad y su relación con el inventario existente, se establecen las cantidades que se deben producir en el mes. La diferencia entre la capacidad total y la asignada al Mercado nacional es la que se destina a cubrir los pedidos de exportación.

3. **Selección de pedidos de exportación:** Con las unidades asignadas al mercado de exportación, se procede a seleccionar los pedidos que serán producidos. Los pedidos seleccionados son aquellos que tienen fecha de entrega más próxima, hasta que su sumatoria alcance las unidades asignadas para dicho mercado, teniendo en cuenta no superar las restricciones de unidades por tipo de producto. En caso de que no haya suficientes pedidos de exportación, se procede a aumentar el nivel de cubrimiento del pronóstico de ventas para aumentar la producción para el mercado nacional.

4. **Ordenación de pedidos de exportación:** Los pedidos de exportación se ordenan de acuerdo a la fecha de entrega prometida, la cual se establece según la capacidad disponible en el momento de recepción del pedido.

5. **Lanzamiento de órdenes a producción:** De forma empírica, el jefe de planta va abriendo órdenes de pedidos del exterior según el orden pero teniendo en cuenta las restricciones de cada línea de producción. Las órdenes para el mercado nacional se van intercalando con las órdenes para exportación, dando prioridad según categoría ABC, que se define de acuerdo el trúput anual aportado por el producto y su importancia en el canal de distribución.

8.4.1 Problemas del método actual

- Sólo se considera la fecha de entrega para dar prioridad a los pedidos de exportación y la categoría ABC para las órdenes del mercado nacional, pero otros criterios, como la importancia específica del cliente o pedido, la relación inventario/pronóstico de ventas y el trúput de la orden, se consideran de forma aislada y sin técnica específica.
- Las órdenes del mercado nacional se lanzan intercalando con las de exportación de acuerdo a urgencias, pero esto hace que el riesgo de retrasos en los pedidos de exportación y rompimiento de stock en los productos del mercado nacional sea mayor, pues no se tiene forma de comparar la urgencia de una orden del mercado nacional con una de exportación.
- La asignación empírica a cada línea de producción hace que éstas puedan quedar sobrecargadas en ocasiones y desocupadas en otras, disminuyendo la productividad de la planta.

8.4.2 Necesidades identificadas

- Calificar las órdenes considerando diferentes criterios y no únicamente la fecha de entrega y la razón inventario/pronóstico de ventas.
- Un procedimiento que permita ordenar en forma conjunta las órdenes de ambos mercados.
- Un método que permita liberar las órdenes de forma que la asignación en cada línea quede balanceada y se pueda maximizar la capacidad.

8.5 MODIFICACIONES AL MÉTODO ACTUAL

Según las necesidades identificadas, se proponen tres modificaciones al método de programación actual que serán desarrolladas independientemente a continuación:

1. **Calificación multi-criterio:** Inclusión de más criterios para priorizar las órdenes.
2. **Regla multi-criterio- GAHPO:** Diseñar una regla de secuenciación que incluya los criterios seleccionados para priorizar los productos MTS y los MTO conjuntamente.
3. **Procedimiento de lotificación de órdenes:** Plantear un método de liberación de órdenes que balancee la carga en las diferentes líneas de producción.

8.5.1 Calificación multi-criterio

Uno de los problemas que se identificó en el proceso de programación fue que el método utilizado para secuenciar la producción considera diferentes criterios de secuenciación de forma aislada y sin técnica específica. El hecho de que la planta atienda dos mercados con características tan diferentes (MTS y MTO), aumenta la necesidad de considerar diferentes criterios de secuenciación, pues son variadas las medidas de desempeño y la capacidad es compartida por ambos tipos de producto.

Las reglas convencionales sólo consideran un aspecto de cada orden, como fecha de entrega, tiempo de proceso o momento de llegada. En un ambiente MTS/MTO donde hay órdenes con exigencias diferentes y las medidas de desempeño son variadas, las reglas simples no logran obtener un resultado óptimo para las diferentes órdenes.

Aunque las reglas de secuenciación simples han sido aplicadas ampliamente en la práctica, su eficacia se mantiene limitada debido a su falta de visión global. Las reglas de secuenciación compuestas han demostrado ser más efectivas ya que son construidas por medio de la experiencia humana (Tay & Ho, 2008). Como lo propone Dabbas (2001), al combinar múltiples criterios de secuenciación se logra satisfacer simultáneamente múltiples respuestas de interés.

La selección de los criterios se hizo teniendo en cuenta los indicadores de desempeño que son considerados importantes en la empresa. En el mercado de

exportación es importante cumplir con las fechas de entrega prometidas, pero un pedido que genera más trúput que otro debe tener más prioridad, y de igual forma, los clientes más importantes para la empresa tienen primacía sobre otros. En el mercado nacional, aunque mantener el nivel de inventario de productos de categoría A es de vital importancia, cuando un producto de categoría C está cerca de incurrir en faltantes, éste debe tener prioridad, y si una orden va a aportar más trúput que otra, debe ir primero.

De acuerdo al párrafo anterior, se identificaron tres criterios generales que se definen de forma diferente para cada mercado.

Tabla 2. Definición de los criterios de prioridad

CRITERIO		EXPORTACIÓN	NACIONAL
TRÚPUT	**DEFINICIÓN**	Fabricar primero las órdenes que más trúput aporten.	
	UNIDAD DE MEDIDA	(Precio de venta- Costo variable) x número de unidades a producir.	
IMPORTANCIA	**DEFINICIÓN**	Fabricar primero los pedidos de exportación relativamente más importantes (según la importancia del cliente o del pedido).	Fabricar las órdenes en orden de su categoría ABC. La clasificación es definida previamente teniendo en cuenta factores como el trúput aportado al año, la importancia para el canal de distribución, la participación en el mercado, etc.
	UNIDAD DE MEDIDA	Escala de 1 a 10, siendo 10 el más importante. Definida por el Gerente de Exportaciones al comienzo del período de programación.	Escala de 1 a 10, siendo 10 el más importante. Definida previamente.
CUMPLIMIENTO	**DEFINICIÓN**	Fabricar primero los pedidos con fecha de entrega más próxima.	Fabricar primero las órdenes con menos días de inventario.
	UNIDAD DE MEDIDA	Días a la fecha de entrega. Mientras menor el número, mayor prioridad.	Días de duración del inventario. Se calcula sacando la relación entre la existencia actual y el pronóstico de venta y multiplicando por 30.

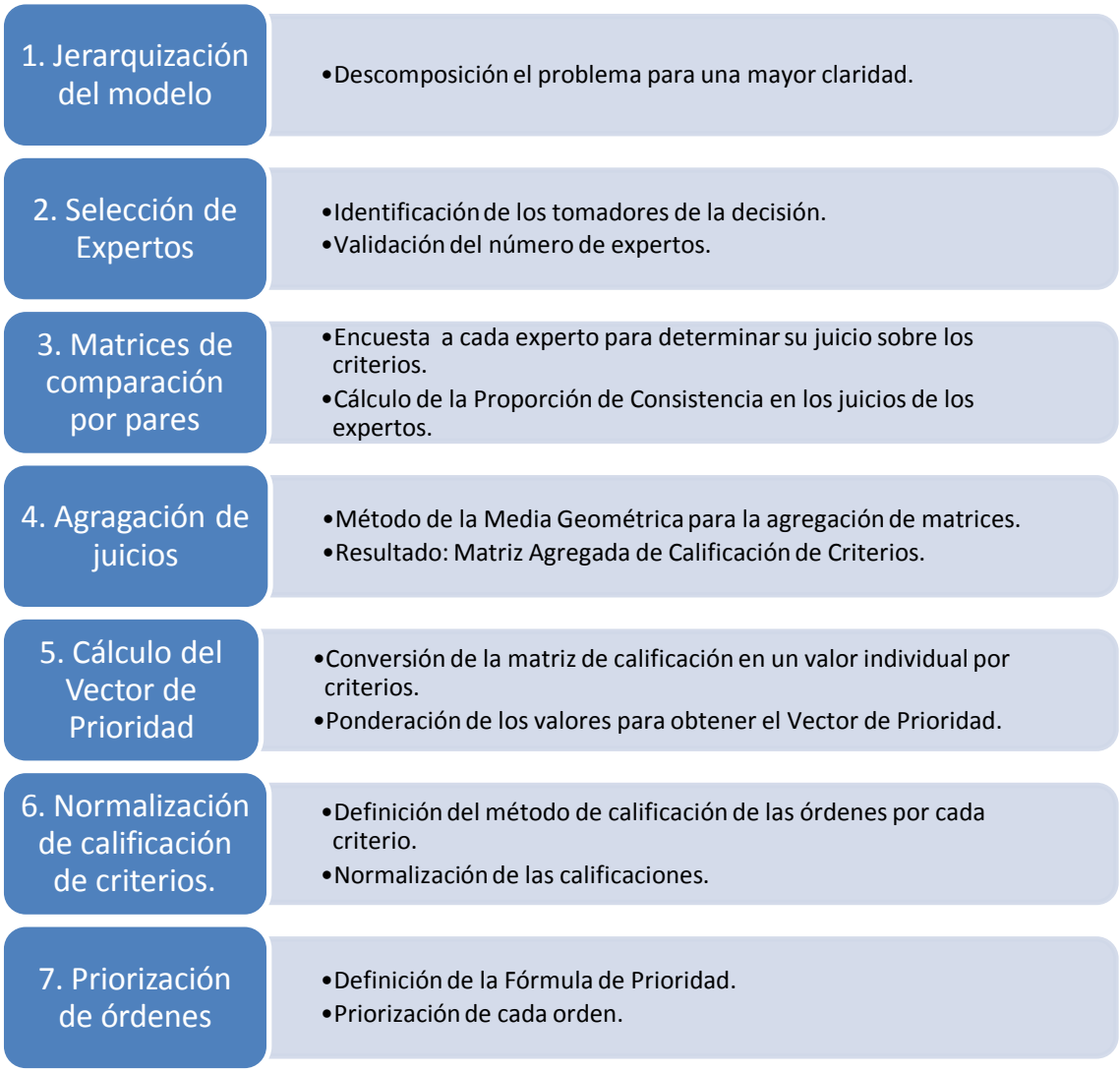
Fuente: Elaboración propia del autor

8.5.2 Regla Multi-Criterio - Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO)

Para el presente caso, se definió el Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO) como el método para encontrar el peso relativo de los criterios de priorización previamente definidos.

El procedimiento que se llevó a cabo para la aplicación del GAHPO fue el siguiente:

Figura 5. Procedimiento aplicación del GAHPO

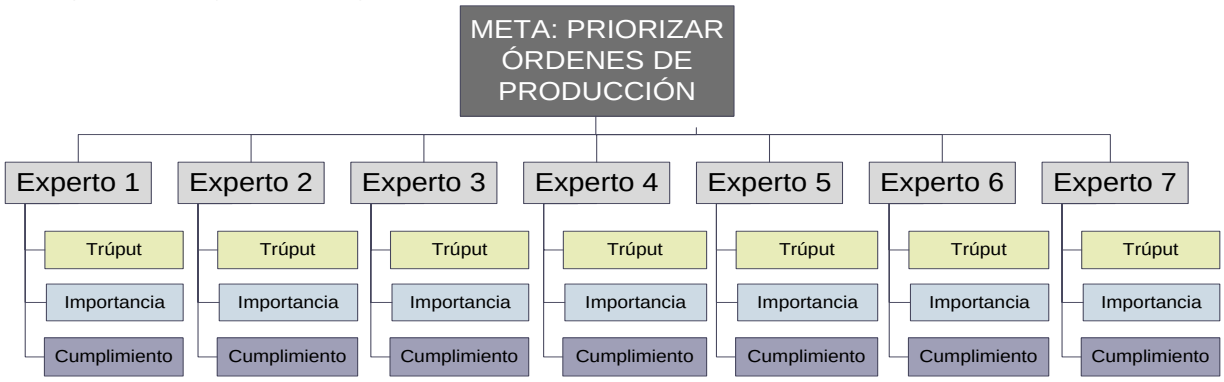


Fuente: elaboración propia del autor.

8.5.2.1 Jerarquización del Modelo:

El primer paso para la aplicación del método AHP es descomponer el problema en una jerarquía para facilitar la comprensión (Camare, 2011). En este caso, debido a que se utilizará el concepto de diferentes expertos, los expertos deben componer el primer nivel de la jerarquía después de la meta (Dong, Zhang, Hong, & Xu, 2010). La Figura 6 muestra el modelo jerárquico del problema.

Figura 6: Jerarquización del problema Multi-Criterio



Fuente: Elaboración propia del autor

8.5.2.2 Selección de Expertos

La calificación de los criterios debe corresponder al beneficio de la empresa como unidad de negocio y no a un área en específico. Por tal motivo, es importante que todos los involucrados con las decisiones estratégicas hagan parte de la calificación.

Para calcular el número de expertos, se utilizó la expresión basada en el modelo binomial, utilizado por varios autores para este mismo fin (Utkin, (2004), Schwing, Zach, Zheng, & Pollefeys (2011)).

$$M = \frac{K(1-p)p}{i^2}$$

Donde:

M: número de expertos

K: parámetro que depende del nivel de confianza

p: proporción del error que como máximo se tolerará en el juicio de los expertos

i: nivel de precisión que expresa la discrepancia o variabilidad que muestra en general el grupo.

El nivel de confianza se precisó en 99%, el más comúnmente utilizado, obteniendo el parámetro k como 6.6564. Se consideró un nivel de precisión de 0.10 pues las personas que toman la decisión tienen conceptos homogéneos, y una proporción de error de 0.09. Con la fórmula se obtiene que son necesarios 7 expertos.

En el Comité de Producción, que se reúne cada 15 días para tratar diferentes temas, se debatió el tema y se identificaron las 7 personas que les corresponde tomar esta decisión, pertenecientes todas a este comité:

1. Presidente General
2. Gerente de Exportaciones
3. Gerente de Producto
4. Gerente de Ventas Nacionales
5. Gerente Administrativo
6. Gerente de Producción
7. Director de Operaciones

Se excluyó al Gerente Técnico debido a que no está involucrado con la programación de la producción. También se consideró incluir a los dos Promotores de Ventas, pero se decidió considerarlos sólo si se necesitaban más expertos para tomar la decisión.

8.5.2.3 Matrices de Comparación por Pares

El siguiente paso después de definir la jerarquía del problema, es la calificación por pares de cada nivel de la jerarquía. En este caso, el primer nivel es el de los diferentes expertos. Se consideró que los expertos deberían tener el mismo peso, por lo que este paso se ignora y se pasa a la comparación por pares de los criterios de priorización.

Tabla 3: Escala de Valores para calificación por pares de Saaty

Valor	Definición	Explicación
1	Igual de relevantes	Las dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
3	Ligeramente más relevante	Experiencia y juicio favorece moderadamente a una actividad sobre la otra.
5	Más relevante	Experiencia y juicio favorece fuertemente a una actividad sobre la otra.
7	Fuertemente más relevante	Una actividad es fuertemente favorecida y su dominio está demostrado en la práctica.
9	Extremadamente más relevante	La evidencia favoreciendo a una actividad sobre la otra es del máximo orden de afirmación posible.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se requiere una calificación intermedia entre los valores impares.

Fuente: Camare (2011).

Esta comparación captura la importancia relativa de cada elemento de la jerarquía para tomar la decisión con base en el problema objetivo (Camare, 2011).

Para la calificación por pares por parte de cada experto, se realizó la encuesta que se encuentra en el Anexo 1 en forma de diálogo para evitar malinterpretaciones.

Los valores numéricos utilizados son basados en la tabla sugerida inicialmente por Saaty (Camare, 2011):

Con las calificaciones se construye una matriz recíproca de *n x n*:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{ij} & \dots \\ \dots & a_{ji} = 1/a_{ij} & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Donde a_{ij} es la comparación entre el elemento i y el elemento j.

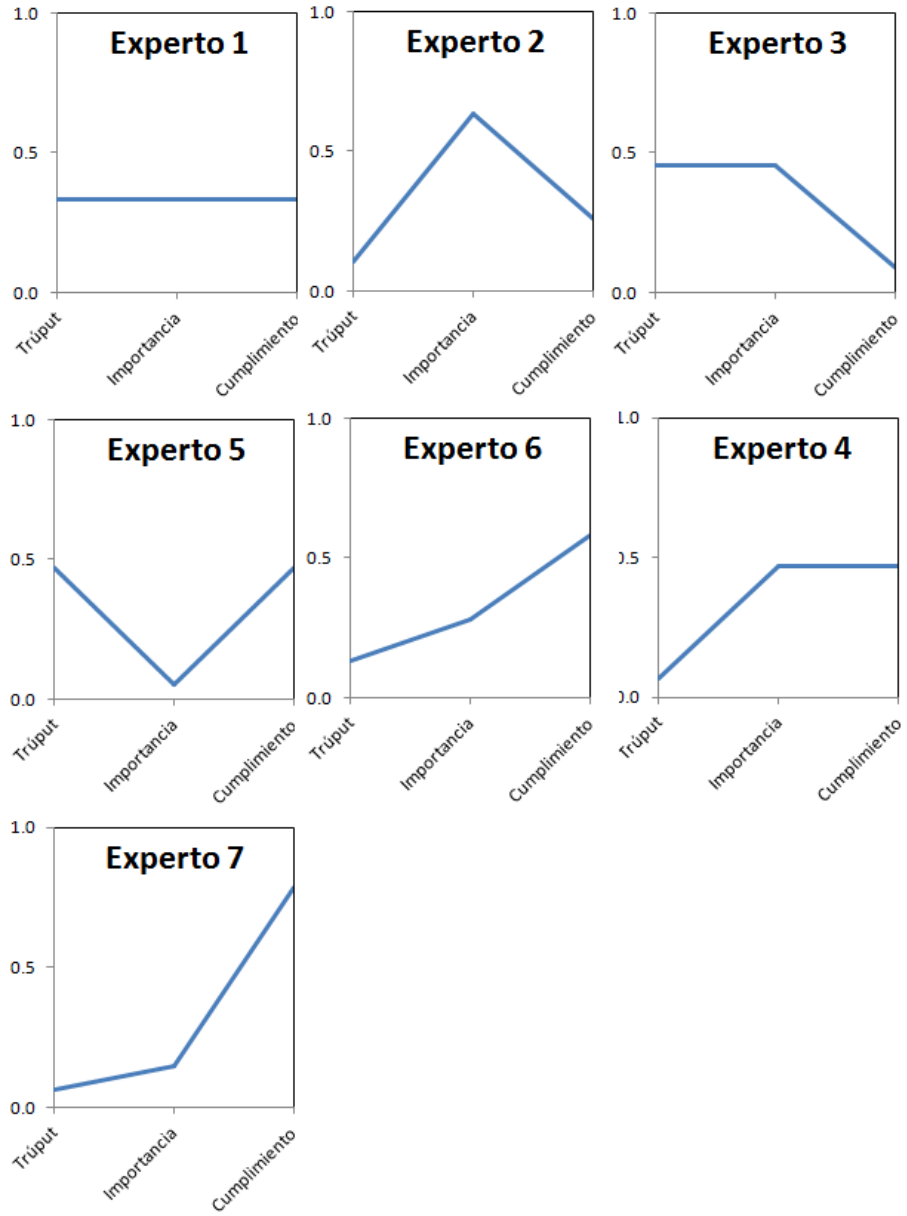
La Tabla 4 muestra las calificaciones de cada experto:

Tabla 4: Calificación de Criterios por Experto

Experto (k)	Criterios (a_{ij})	Trúput	importancia	Cumplimiento
Experto 1	Trúput	1.00	1.00	1.00
	Importancia	1.00	1.00	1.00
	Cumplimiento	1.00	1.00	1.00
Experto 2	Trúput	1.00	0.20	0.33
	Importancia	5.00	1.00	3.00
	Cumplimiento	3.00	0.33	1.00
Experto 3	Trúput	1.00	1.00	5.00
	Importancia	1.00	1.00	5.00
	Cumplimiento	0.20	0.20	1.00
Experto 4	Trúput	1.00	0.14	0.14
	Importancia	7.00	1.00	1.00
	Cumplimiento	7.00	1.00	1.00
Experto 5	Trúput	1.00	9.00	1.00
	Importancia	0.11	1.00	0.11
	Cumplimiento	1.00	9.00	1.00
Experto 6	Trúput	1.00	0.33	0.33
	Importancia	3.00	1.00	0.33
	Cumplimiento	3.00	3.00	1.00
Experto 7	Trúput	1.00	0.33	0.11
	Importancia	3.00	1.00	0.14
	Cumplimiento	9.00	7.00	1.00

Fuente: Elaboración propia del autor

Figura 7: Importancia Relativa de los Criterios según cada Experto



Fuente: Elaboración propia del autor

Antes de calcular los vectores de prioridad y agregar los vectores en uno solo, se debe medir la consistencia de los juicios de los expertos.

Saaty (1977) propone calcular la **Proporción de Consistencia,** que es el resultado de la relación entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio. El valor de esta proporción de consistencia no debe superar el 10%, para que sea evidencia de un juicio informado (Ishizaka & Labib, 2011a).

$$Proporción\ de\ Consistencia\ (CP) = \frac{Índice\ de\ consistencia\ (CI)}{Índice\ Aleatorio\ (AI)}$$

Si ocurriera el caso de que la proporción de consistencia es mayor a 10%, entonces hay que volver a revisar los juicios ingresados en la matriz de comparaciones a pares y solucionar la inconsistencia (buscando consensos entre el o los agentes).

Índice de Consistencia: es una medida de la desviación de la consistencia de la matriz de comparaciones por pares. La forma de obtenerlo es a través del máximo valor propio de la matriz de comparaciones. En casos donde pueda existir inconsistencia en los juicios el valor propio tiende a ser mayor que el rango de la matriz.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde:

λ_{max} : es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

n: es el número de criterios.

Índice Aleatorio: es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados, del mismo rango de escala de 1 hasta 9. Saaty definió esta matriz para permitir hacer los cálculos de la proporción de consistencia. El índice aleatorio por cada tamaño de la matriz (*n*) significa el valor esperado del Índice de Consistencia, calculado a partir de un gran número de matrices recíprocas positivas de orden *n* generadas aleatoriamente (Moreno, Altuzarra, & Escobar, 2003).

Tabla 5: Matriz de Ínidces de Consistencia de Saaty

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	**0.58**	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: Moreno, Altuzarra & Escobar (2003)

La tabla 6 muestra la Proporción de Consistencia (CP) de la calificación de cada experto:

Tabla 6: Proporción de Consistencia (CP) por cada Experto

	CP
Experto 1	0.000
Experto 2	0.033
Experto 3	0.000
Experto 4	0.000
Experto 5	0.000
Experto 6	0.017
Experto 7	0.069

Fuente: Elaboración propia del autor

Con la consistencia de las calificaciones aprobadas se puede proseguir con la agregación de las calificaciones para obtener los vectores definitivos.

8.5.2.4 Agregación de Juicios

El proceso analítico jerárquico puede ser utilizado para la toma de decisiones en grupo mediante la agregación de los juicios individuales (AJI) o prioridades individuales (API). Los métodos de agregación más comúnmente utilizados son el método de la media geométrica (MMG) y el método de media aritmética ponderada (MAP) (Aullhyde, Erdogan, & Duke, 2006).

Ishizaka & Labib (2011a) presentan la Tabla 7 con las cuatro formas existentes para combinar preferencias en una calificación de consenso.

Tabla 7: Métodos de Agregación de Preferencias

	Agregación matemática	
Agregación por:	**Sí**	**No**
Juicios	Media geométrica en juicios	Consenso en juicios
Prioridades	Media Aritmética ponderada en prioridades	Consenso en Prioridades

Fuente: (Ishizaka & Labib, 2011a)

Saaty (1977) argumenta que el método de media geométrica es la única función separable sintetizable que satisface las propiedades de unanimidad, homogeneidad y reciprocidad (Escobar, 2004). Según Condon, Golden, & Wasil (2003), el método de media geométrica es el más comúnmente utilizado por grupos para establecer prioridades, citando el uso de Lai et al. (2002) en la combinación de los juicios individuales de seis ingenieros de software, y mencionando que el método se ha incorporado al popular Expert Choice 2000 Team Software.

Para el caso actual, se decide utilizar el método de media geométrica (GMM) para la agregación de las calificaciones de los siete expertos.

Si para cada experto *k* hay una matriz con la comparación por pares, siendo $\boldsymbol{a_{ij}}$ el valor de la compración entre el elemento *i* y el elemento *j*, así:

Tabla 8. Ubicación de juicios en la matriz de comparación

	Trúput	**Importancia**	**Cumplimiento**
Trúput	$\boldsymbol{a_{11}}$	$\boldsymbol{a_{21}}$	$\boldsymbol{a_{31}}$
Importancia	$\boldsymbol{a_{12}}$	$\boldsymbol{a_{22}}$	$\boldsymbol{a_{32}}$
Cumplimiento	$\boldsymbol{a_{13}}$	$\boldsymbol{a_{23}}$	$\boldsymbol{a_{33}}$

Fuente: Elaboración propia del autor

El valor $\boldsymbol{a_{11}}$ de la matriz agregada se obtiene multiplicando todos los valores en esa ubicación de cada experto y elevando al exponencial 1/7.

La fórmula de la media geométrica se expresa de la siguiente forma:

$$a_{ij} = [a_{ij}^1 \; x \; a_{ij}^2 \; x \ldots x a_{ij}^7]^{\frac{1}{7}}$$

Si
$\boldsymbol{a_{ij}}$ es la comparación entre el elemento *i* y el elemento *j*
$\boldsymbol{k}$ $(k = 1{,}2 \ldots{,}7)$ denota el experto
$\boldsymbol{a_{ij}^k}$ es la comparación entre el elemento *i* y el elemento *j* del experto *k*.

Calculando para *i*$= 1{,}2y3$ y *j*$= 1{,}2y3$, queda definida la matriz completa:

Tabla 9. Matriz Agregada de Calificación de Criterios

	Trúput	Importancia	Cumplimiento
Trúput	1.000	0.602	0.509
Importancia	1.662	1.000	0.696
Cumplimiento	1.966	1.436	1.000

Fuente: Elaboración propia del autor

8.5.2.5 Cálculo del Vector de Prioridad

Para el cálculo de los vectores, se decide utilizar también el método de media geométrica (GMM), pues ofrece la ventaja de la ausencia de inversiones de rangos y presenta menor inconsistencia que el método Eisenvalue original (Ishizaka & Labib, 2011b).

1. Media geométrica de las columnas:
   ej fila 1: $[1.000 \; x \; 0.602 \; x \; 0.509]^{1/3}$ --> $[\, 0.674 \,, 1.050 \,, 1.413 \,]$

2. Con la normalización, se obtienen los pesos definitivos de prioridad:

Tabla 10. Pesos definitivos por criterio

Criterio	Peso
Trúput	0.215
Importancia	0.335
Cumplimiento	0.451
	1.000

Fuente: Elaboración propia del autor

8.5.2.6 Normalización de Calificación de Criterios

Con el vector de prioridad calculado, el siguiente paso es dar la calificación a cada orden para la priorización. Para poder hacerlo, cada criterio debe ser normalizado con una normalización de cambio de magnitud a una escala fija (Pomerol & Barba-Romero, 2000). Como cada criterio tiene datos de diferente modalidad, su normalización es diferente. A continuación se muestran los detalles:

Tabla 11: Procedimiento de Normalización por Criterio

	Unidad	Máx/min	Procedimiento normalización
Trúput	Pesos	Máx	$v_i = \frac{a_i}{max\ a_i}$
Importancia	Escala 1-10	Máx	$v_i = \frac{a_i}{max\ a_i}$
Cumplimiento	Días	Min	$v_i = 1 - \frac{a_i - min\ a_i}{\max\ a_i - \min\ a_i}$

Fuente: Elaboración propia del autor

En el Anexo 2 se encuentra el listado con las órdenes y sus prioridades.

8.5.2.7 Priorización de Órdenes: Fórmula de Prioridad

Con los pesos calculados y el procedimiento de normalización claro, falta definir la fórmula para calcular la prioridad de cada orden:

$$\boldsymbol{P_i = CT_i \cdot W_1 + CI_i \cdot W_2 + CC_i \cdot W_3}$$

Donde

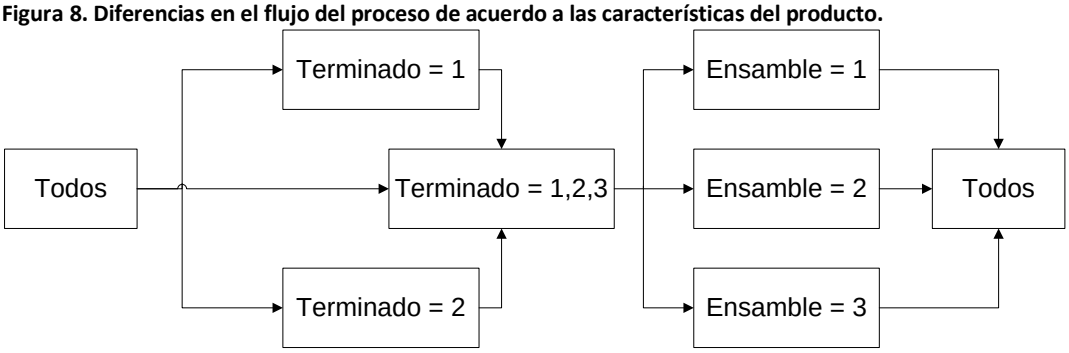
P_i : $prioridad\ de\ la\ orden\ i$
CT_i: $Valor\ normalizado\ del\ trúput\ de\ la\ orden\ i$
CI_i: $Valor\ normalizado\ de\ la\ importancia\ de\ la\ orden\ i$
CC_i: $Valor\ normalizado\ del\ cumplimiento\ de\ la\ orden\ i$
W_c: $Pesos\ de\ prioridad\ por\ criterio\ para\ c = 1, 2\ y\ 3.$

De ahora en adelante se referirá a la regla representada por esta fórmula como **AHP**.

8.5.3 Procedimiento de lotificación de órdenes para asignación balanceada.

Un tercer problema identificado en el método actual de la programación de la planta es que la liberación de órdenes se modifica empíricamente tratando de que las diferentes líneas de producción queden con la carga asignada de forma balanceada a través del mes.

Figura 8. Diferencias en el flujo del proceso de acuerdo a las características del producto.



Fuente: Elaboración propia del autor

Es necesario establecer un procedimiento que permita lotificar las órdenes de producción con el objetivo de que las diferentes líneas de producción queden con suficiente carga asignada durante todo el período de producción.

El procedimiento diseñado consiste en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la carga diaria para cada línea:

$$Tamaño\ de\ Lote\ Línea_i = \frac{Unidades\ programadas\ Atributo_{\ i}}{Días\ programados}$$

Para i= tipo de atributo

2. Definición del lote mínimo por cada orden según sus atributos:

$$\min(Tamaño\ de\ Lote\ Línea_1, Tamaño\ de\ Lote\ Línea_2, Tamaño\ de\ Lote\ Línea_3, Tamaño\ de\ Lote\ Línea_4, Tamaño\ de\ Lote\ Línea_5, Tamaño\ de\ Lote\ Línea_6)$$

3. División de las órdenes en el número de lotes necesarios para no superar el tamaño de lote calculado en paso dos por cada atributo.

4. Ordenar todas las órdenes lotificadas pertenecientes a cada línea de producción de acuerdo a la prioridad calculada con la regla de secuenciación a utilizar.

8.6 CONCLUSIONES PARCIALES

La realidad de la empresa en cuanto a los mercados que atiende hace que sea necesaria la producción bajo un ambiente mixto MTS/MTO. La situación de tener la capacidad compartida entre productos fabricados para inventario y productos fabricados bajo pedido, permite maximizar la capacidad de producción al mantener una producción nivelada, pero agrega una alta variabilidad en los tiempos de entrega de productos MTO y en los niveles de inventario de productos MTS, poniendo en riesgo el nivel de servicio ofrecido en ambos mercados.

Los requerimientos de cada mercado son distintos. Mientras para MTS el objetivo es mantener inventario suficiente para satisfacer la demanda, especialmente de los productos más importantes y que más contribución dejen, para MTO es cumplir con las fechas de entrega prometidas, dándole prioridad a los clientes y pedidos más importantes.

Ambos tipos de productos tienen una fecha de entrega objetivo, pero su cálculo es diferente. Para los productos MTS, se calcula basándose en la duración del inventario actual y las ventas pronosticadas. Para los productos MTO, la fecha de entrega es definida por medio de negociaciones con el cliente y de acuerdo a la disponibilidad de producción.

Una sola medida de desempeño no es suficiente, pues son varios los criterios los que determinan si la operación de la empresa es exitosa o no. Es necesario considerar la importancia del producto, del pedido y del cliente y la contribución a la utilidad de la empresa.

Las medidas de desempeño se obtienen con tres variables: 'Días de retraso/adelanto', 'Makespan' y 'Penalización'.

El procedimiento de programación no está ni oficial ni detalladamente definido lo que hace que muchas decisiones se tomen empíricamente y que el resultado de la programación no sea consistente, pues los criterios no están definidos para ser estandarizados durante cada proceso de programación.

Aunque la fecha de entrega es el único criterio utilizado para la priorización de órdenes, la política para el establecimiento de las fechas de entrega no está claramente definida.

Los tres criterios identificados como los que representan satisfactoriamente los requerimientos de los mercados y los objetivos de la empresa son: Trúput, Importancia y cumplimiento.

El Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal resulta un método muy apropiado para definir pesos de ponderación a los criterios de decisión en situaciones en las el tomador de decisión es un grupo compuesto por varias personas.

La inclusión de diferentes expertos de la organización en la calificación de los criterios permite que la solución tenga un alcance más global y sobrepase los requerimientos o visiones de un área en específico.

Una fórmula clara y única para la calificación de cada orden facilita el proceso de programación y estandariza los factores subjetivos que en ocasiones se incluyen en la toma de decisiones.

9 CAPÍTULO 3: VALIDACIÓN Y RESULTADOS

El capítulo 3 consiste en la validación de la solución propuesta en el capítulo 2. El método de validación consistió en la evaluación del desempeño del sistema según las medidas de desempeño ya definidas, mediante la simulación del proceso productivo utilizando la regla de secuenciación multicriterio denominada AHP y en comparar los resultados con los de 3 reglas más.

El capítulo está separado en dos partes. La primera es el desarrollo de la metodología llevada a cabo para la construcción del modelo de simulación. La segunda consta del análisis estadístico y analítico de los resultados que generó el modelo de simulación.

9.1 OBJETIVO DE LA VALIDACIÓN

1. **Qué se quiere validar**
   a. Evaluar el desempeño de la regla **AHP** frente a otras reglas simples.
2. **Reglas para comparación**
   a. Fecha de entrega más próxima **(FEP**): se seleccionó esta regla porque la fecha de entrega es el criterio más importante según los requerimientos de los mercados.
   b. Tiempo de procesamiento más corto **(TPC)**: se seleccionó porque es una regla muy recomendada en la literatura.
   c. Mayor trúput (**TRUP)**: se seleccionó porque el trúput es siempre un factor de decisión en la empresa y también aparece en la literatura como regla apropiada para sistemas MTS.

La Tabla 12 muestra el procedimiento que se utilizó para calcular la prioridad de cada regla.

Tabla 12. Definición de prioridades por cada regla

REGLA	CÁLCULO PRIORIDAD	descripción
AHP	$P_i = CT_i \cdot W_1 + CI_i \cdot W_2 + CC_i \cdot W_3$	La suma de las calificaciones de cada criterio multiplicado por el peso relativo de prioridad.
FEP	$P_i = 1 - \frac{a_i - min\ a_i}{\max a_i - \min a_i}$	La ubicación de la fecha de entrega en el rango de las fechas de entrega.
TPC	$P_i = 1 - \frac{a_i}{max\ a_i}$	Uno menos las unidades del pedido sobre cantidad del pedido más grande.
TRÚPUT	$P_i = \frac{a_i}{max\ a_i}$	El trúput del pedido sobre el mayor valor de trúput de todos los pedidos.

Fuente: Elaboración propia del autor

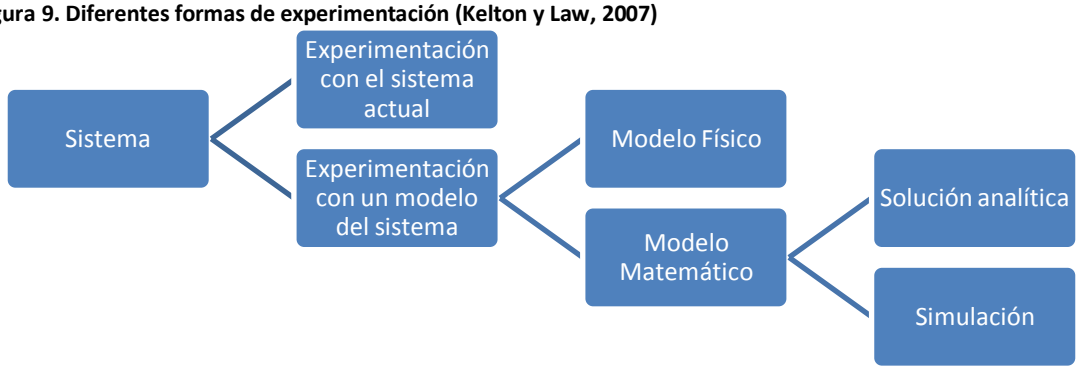
Período de Comparación: El período mínimo para la validación debe ser de un año debido principalmente a:

- El producto es de consumo estacional: en el mercado nacional, al atender el mercado desde tan cerca, la estacionalidad del consumo se ve reflejado en el inventario de producto terminado, teniendo meses de hasta el doble de ventas que otros. En el mercado de exportación, aunque la estacionalidad la absorben en parte las bodegas de los clientes, hay pedidos que se realizan únicamente para cosechas específicas en determinada época del año.
- Baja frecuencia de los pedidos del exterior: los pedidos de los clientes, por motivo de reducción de costos de transporte, son generalmente de contenedores completos, lo que hace que algunos clientes pidan pocas veces al año manteniendo el producto en sus bodegas. Las ventas al año por cliente generalmente corresponden las ventas reales.
- El juego de capacidad MTS/MTO cambia en los diferentes meses del año, pues hay unos meses en los que es mucho mayor la producción para el mercado nacional que en otros.

9.2 SIMULACIÓN COMO MÉTODO DE EVALUACIÓN

Para lograr evaluar el desempeño de la regla en el sistema, es necesaria la experimentación. Giraldo (2011) señala que hay diferentes maneras mediante las cuales un sistema puede ser estudiado a través de la experimentación, y cita a Kelton y Law (2007), al decir que este estudio puede hacerse a través de un modelo, el cual es una representación simplificada de un sistema. La Figura 9 muestra las diferentes formas de experimentación:

Figura 9. Diferentes formas de experimentación (Kelton y Law, 2007)



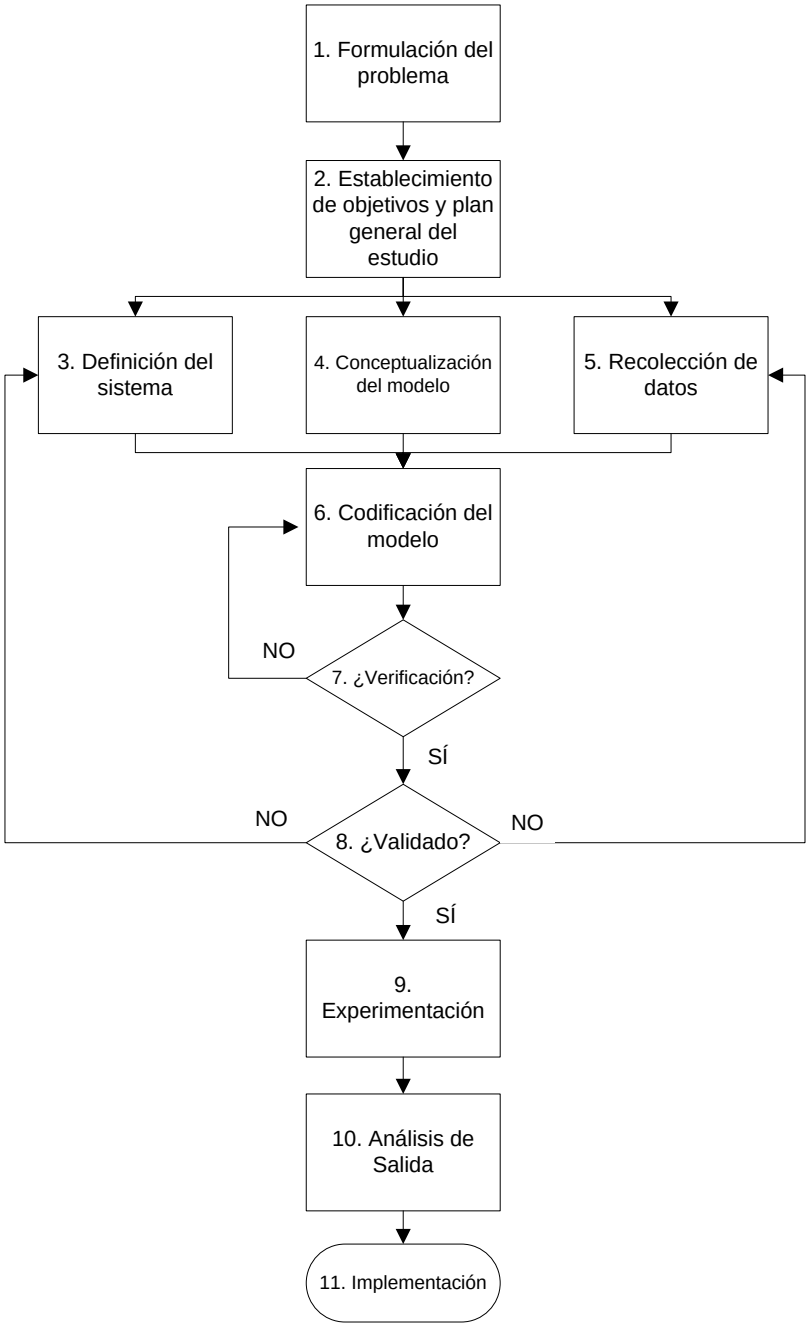
Fuente: Kelton y Law, 2007)

Dado que el sistema a simular es dinámico, estocástico y discreto, y los procesos tienen alta variabilidad e interdependencia entres sus componentes, la simulación de eventos Discretos (DES) es la herramienta apropiada (Giraldo, 2011). Para Banks, Carson, Barry, & Nicol (2009), la simulación de eventos discretos produce una secuencia de instantáneas (o imágenes del sistema) que representan la evolución del sistema a través del tiempo. El software de simulación permite representar y analizar un sistema real mediante la creación de un modelo y su ejecución.

9.2.1 Metodología

Para llevar a cabo exitosamente el estudio basado en la simulación es necesario planear cuidadosamente el proyecto, basándose en principios y prácticas de administración de proyectos, siguiendo un procedimiento claro. La metodología que se llevó a cabo fue la propuesta por Giraldo (2011), adaptada de varios autores:

Figura 10: Etapas para realizar un estudio de simulación.



Fuente: Adaptación de varios autores por Giraldo (2007).

9.2.1.1 Formulación del Problema

En el capítulo 2 se presentó el desarrollo de una regla de secuenciación multi-criterio, que prioriza las órdenes de producción de acuerdo a los pesos de cada criterio definidos por medio del método GAHPO (Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal). La regla debe responder a los requerimientos del sistema, los cuales fueron también definidos en el capítulo anterior. Para evaluar el desempeño de la regla propuesta, es necesario enfrentarla a otras reglas de secuenciación.

9.2.1.2 Establecimiento de objetivos y plan general de estudio.

1. **Objetivo general:** Comparar el desempeño del sistema de acuerdo a los indicadores definidos, al utilizar la regla de secuenciación propuesta en el capítulo 2 y otras reglas simples.

2. **Plan de trabajo**
   a. **Recursos**: La Universidad Nacional de Colombia posee licencia de dos softwares de simulación: Promodel y FlexSim. Debido a que el analista tiene conocimientos previos en Promodel, se decidió utilizar este último. La licencia del software sólo permite utilizarlo en las instalaciones de la universidad, pero se utilizará la versión estudiantil para las corridas y el análisis de resultados. Para el levantamiento de datos, el analista tiene acceso total a los procesos e información de la empresa y cuenta con el apoyo de los conocedores del sistema. Los tiempos deben ser recogidos con ayuda de herramientas de toma de tiempos, como cronómetro, cámara de video, etc. También es necesario contar con el apoyo del departamento técnico para la obtención de los datos de tiempos de parada de maquinarias (DTS), que deben ser extraídos del software de mantenimiento utilizado en la empresa.
   b. **Tiempo**: Para tener tiempo para el análisis de resultados y preparación del documento, el modelo debe quedar terminado y validado para finales de Septiembre de 2011.

9.2.1.3 Definición del sistema

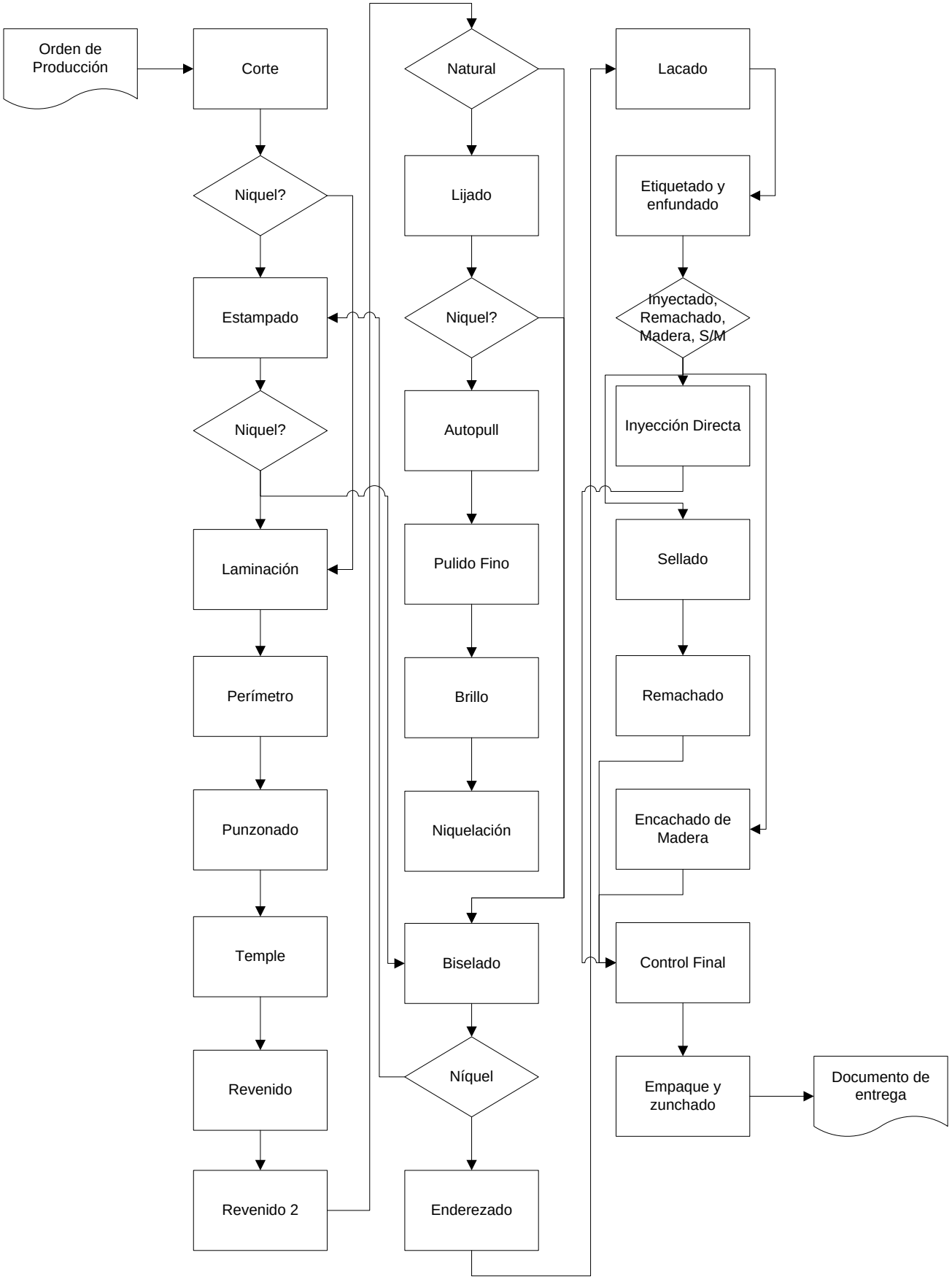
a. **Clasificación del sistema**
   - El sistema a modelar tienen alta variabilidad e interdependencia entres sus componentes, y éstos cambian de estado con el paso del tiempo, por lo que se puede clasificar el sistema como un **proceso discreto**.

- Debido a que la planta de producción trabaja durante todo el año y siempre contiene producto en proceso, el sistema no tiene un inicio ni un fin determinado, por lo que se puede clasificar el sistema como **sin terminación.**

b. Alcance

El alcance del modelo será simular la planta de machetes desde la sección de Corte de Mango hasta la sección de Empaque. Esto incluye todas las actividades de conformación, proceso térmico, terminado, ensamble y empaque. Excluye la preparación de las materias primas (fleje, plástico, empaque, etc.), así como la fabricación de cachas plásticas y de madera. A continuación se muestra el flujograma del proceso con las actividades que serán incluidas en el modelo.

Figura 11. Flujograma General del Proceso



Fuente: Elaboración propia del autor

c. Nivel de Detalle

Definir el nivel de detalle es muy importante pues determina la extensión del modelo. Este nivel debe ser el punto medio para que permita lograr el objetivo propuesto sin entrar en detalles innecesarios.

La definición del nivel de detalle se basó en las diferencias importantes de los productos a procesar. Aunque la planta fabrica una alta variedad de referencias, ésta son de características muy similares; la Tabla 13 muestra el efecto de estas características en la ruta del proceso.

Tabla 13. Efecto de las características del producto en la ruta del proceso

Característica	Cambio en la ruta
1. Forma de la hoja (incluida longitud)	No
2. Forma de la cacha	No
3. Terminado	Sí
4. Tipo de bisel	No
5. Etiquetas y empaques individuales	No
6. Tipo de ensamble	Sí
7. Tipo de empaque	No

Fuente: Elaboración propia del autor

Debido a que las características 1, 2, 4, 5 y 7 no modifican la ruta ni los tiempos de procesamiento, se decidió excluirlas y diferenciar el producto por los atributos Terminado y Tipo de Ensamble. Esta decisión permite definir el nivel de detalle tal que permita simular el proceso con las diferentes rutas de acuerdo a las características del producto. La Figura 11 muestra el flujograma del proceso con el detalle que se decidió modelar, teniendo cada actividad como un proceso con un tiempo de procesamiento, pero sin entrar en detalles del proceso interno de la actividad.

d. Tipo de experimentación

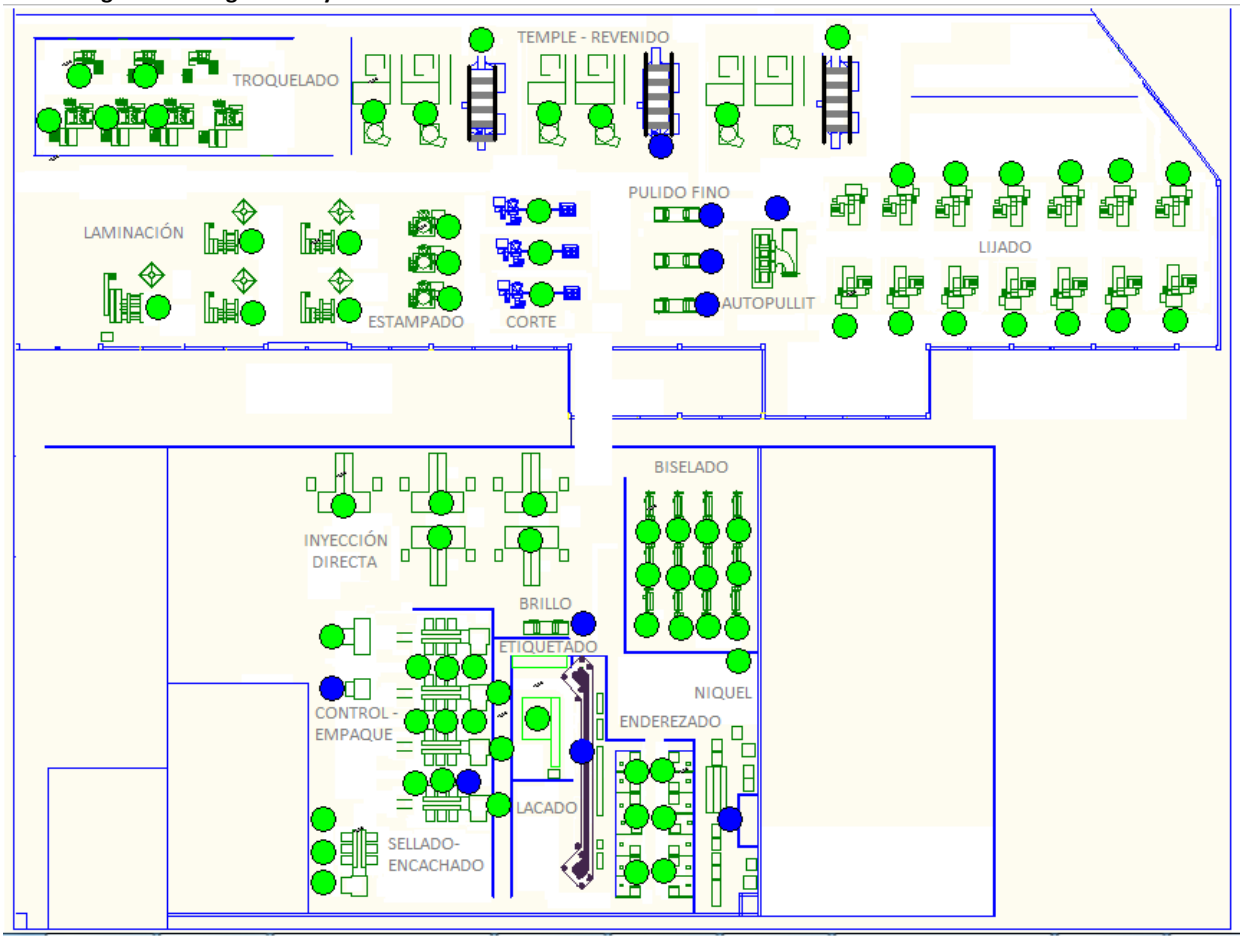
El tipo de experimentación corresponde a la cantidad y características de las alternativas a ser evaluadas, pues esto determina si con un solo modelo basta o se requieren modificaciones importantes para la evaluación de las alternativas. Las alternativas que serán evaluadas son las diferentes reglas de secuenciación que definen el orden de los arribos al proceso. Esto significa que el mismo modelo podrá ser utilizado para las diferentes alternativas, ya que sólo es necesario cambiar los arribos.

9.2.1.4 Conceptualización del modelo

La conceptualización del modelo, aunque similar para los diferentes software, se hará con el lenguaje y los elementos específicos de Promodel. Ver Anexo 3 con el código completo de la simulación para ver detalles sobre todos los elementos de la simulación.

A continuación se muestra la imagen del layout en el modelo donde se observan las diferentes actividades:

Figura 12. Imagen del layout del modelo de simulación. –



Fuente: Imagen de pantalla en Promodel

a. Locaciones:

Las locaciones se dividen en dos tipos:

i. De proceso: estas locaciones corresponden a las actividades generales del proceso. En cada actividad puede haber más de una máquina que fue creada como multi-locación (por ejemplo, una misma locación, pero en cantidad 5). Todas tienen capacidad 1, por lo que es necesario crear locaciones de almacenamiento.

ii. De almacenamiento: por cada locación creada, fue necesario crear locaciones de almacenamiento, que permitieran acumular material mientras las máquinas procesan cada unidad. Debido a que no existe problema de espacio para almacenamiento y éste no interviene con los objetivos del estudio, la capacidad de estas locaciones es infinita.

iii. Bandas: Los hornos de revenido fueron los únicos que se modelaron con banda transportadora. Sus dimensiones y velocidades corresponden a la capacidad real de las máquinas.

Tiempos de Fallas (DTS): Las locaciones de proceso tienen tiempos de falla que fueron creadas con la herramienta de DTS (Downtimes). Se seleccionó Clock Downtime pues es la que permite agregar paradas de acuerdo a distribuciones de frecuencia y duración. Los datos para definir estas frecuencias y duraciones se extrajeron en formato excel del software de mantenimiento con el que cuenta la empresa. Los datos consistían en el listado de todas las paradas de las máquinas, con fecha, hora y duración. Estos datos se ingresaron al programa StatFit para que arrojara las distribuciones que mejor representaran los datos.

b. Entidades: Debido a que el lote mínimo de transferencia es de 120 unidades, una unidad de la entidad "Producto" representará 120 unidades. Las variaciones del producto serán diferenciadas por medio de atributos:

ID	Type	Classification
AtOrden	Integer	Entity
AtTerminado	Integer	Entity
AtEnsamble	Integer	Entity
AtPrioridad	Integer	Entity
AtPedido	Integer	Entity

Tabla 14. Atributos utilizados en la simulación - Elaboración propia del autor

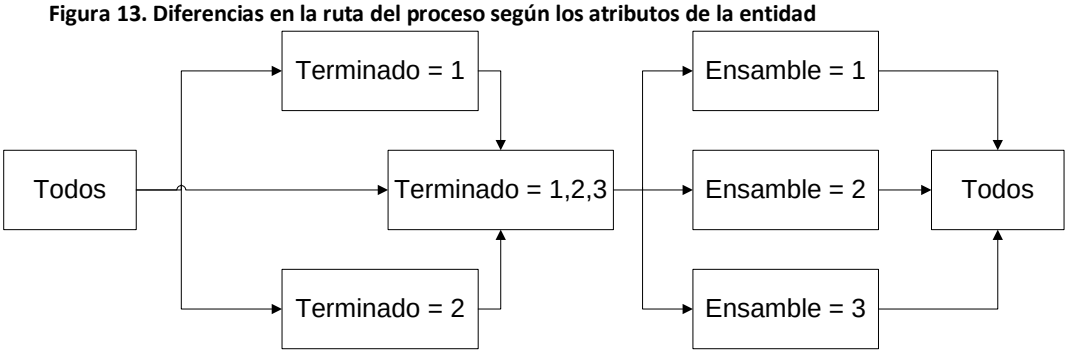
Atributo	Valor	Significado
AtTerminado	1	Pulido
	2	Niquelado
	3	Natural
AtEnsamble	1	Remaches
	2	Inyección
	3	Madera
AtPrioridad	1-n, n= # de pedidos	Según regla
AtPedido	Id del pedido	Pedido
AtOrden	Id de la orden	Orden

Fuente: Elaboración propia del autor

AtPrioridad: este atributo es el encargado de darle la prioridad a la orden, definiendo el orden en que se procesan los pedidos. Este valor se modifica de acuerdo a la orden a evaluar.

AtTerminado y AtEnsamble: son utilizados para enrutar los pedidos a través del proceso, pues su valor hace que la ruta del pedido cambie. La Figura 13 muestra la síntesis.

Figura 13. Diferencias en la ruta del proceso según los atributos de la entidad



Fuente: Elaboración propia del autor

AtPedido: este atributo identifica cada entidad como parte de un pedido específico. Éste es el que servirá para el análisis de datos, pues es el valor que conecta con las características del pedido, como fecha de entrega, trúput, importancia y lo identifica como MTS ó MTO.

AtOrden: El atributo AtOrden identifica los lotes que pertenecen a un mismo pedido, pues por motivos de balanceo, los pedidos se dividieron en órdenes más pequeñas según las capacidades de las líneas.

Los atributos AtTerminado y AtEnsamble son utilizados para enrutar los pedidos a través del proceso, pues éstos determinan la ruta que lleva cada pedido.

c. Arribos

Los arribos determinan lo que se va a procesar. En el modelo se simularon lo arribos por medio de la herramienta "Archivos Externos". Un archivo en excel con los datos de todos los pedidos a procesar facilita el ingreso de la información. El archivo tienen un formato así:

Figura 14. Archivo de Arribos para el modelo de simulación

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	entidad	Locación	Cantidad	Time of First Arrival	# Arribos	Frecuencia	AtOrden	AtPedido	AtTerminado	AtEnsamble	AtPrioridad
2	Producto	Ordenes	56	0	1		146	30	3	1	1
3	Producto	Ordenes	95	0	1		157	41	1	2	2
4	Producto	Ordenes	39	0	1		150	34	2	2	3
5	Producto	Ordenes	88	0	1		157	41	1	2	4
6	Producto	Ordenes	39	0	1		150	34	2	2	5
7	Prc						89	16	1	3	6
							50	11	1		
								41			

Fuente: Imagen de pantalla en Microsoft Excel.

Donde las columnas a-f son las requeridas por Promodel y en las columnas G-K están los valores de cada atributo.

Un archivo diferente se requiere para cada regla de secuenciación que se quiera analizar.

d. Proceso.

I. Rutas: El proceso se creó como se muestra en el flujograma de la Figura 11. Para definir las rutas de cada tipo de producto, se utilizaron los atributos en lógicas como las que se muestra a continuación:

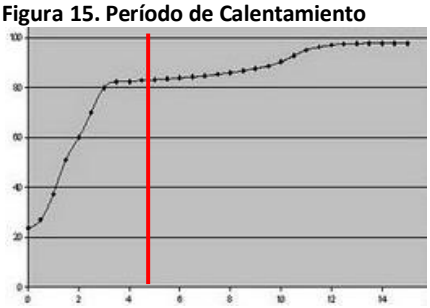
if AtEnsamble=1 then route 1
if AtEnsamble=2 then route 2
if AtEnsamble=3 then route 3

II. Reglas de enrutamiento: Para la selección de la locación se definió First Available, el cual es la opción predeterminada.

III. Tiempos de procesamiento: Para definir los tiempos de procesamiento se utilizó la herramienta de archivo externo Entity-Location, en el cual se encuentran las distribuciones de los tiempos de proceso por cada actividad:

e. Período de calentamiento: debido a que el sistema es "sin terminación", es importante definir un período de calentamiento. Este tiempo es en el que el sistema llega a un estado "normal", con producto en proceso. Este tiempo fue calculado mediante el análisis del archivo de escritura de modo texto que genera Promodel y se definió en número de unidades por línea adicionales a la programación real para "llenar" la planta.

Figura 15. Período de Calentamiento



Unidades adicionales = Número de unidades cortadas al momento en el que sale del sistema la primera

Fuente: Elaboración propia del autor

9.2.1.5 Recolección de datos

a. Tiempos procesamiento: los tiempos de procesamiento se obtuvieron con datos históricos de cada sección, definiendo valor mínimos, medias y máximos de producción por máquina por turno. Esto se convirtió a minutos en lotes de 120 para obtener las distribuciones finales.

b. Tiempos paradas: Los datos para definir estas frecuencias y duraciones se extrajeron en formato excel del software de mantenimiento con el que cuenta la empresa. Los datos consistían en el listado de todas las paradas de las máquinas, con fecha, hora y duración. Estos datos se ingresaron al programa StatFit para que arrojara las distribuciones que mejor representaran los datos.

9.2.1.6 Codificación del modelo

Sólo con el modelo conceptual claro y los datos recogidos, es posible comenzar la codificación del modelo. Como se dijo anteriormente, el software utilizado para esta codificación es Promodel, en su versión 7.0 en instalaciones de la universidad. La versión estudiantil 7 fue utilizada para corridas y análisis de datos.

9.2.1.7 Verificación del modelo

A medida que se iba construyendo el modelo en el software, se debía ir verificando para cerciorarse de que la lógica definida en el modelo conceptual estuviera bien representada. Para dicha verificación se utilizaron herramientas como las variables y el display para ayudar a identificar los inconvenientes resultantes en la lógica.

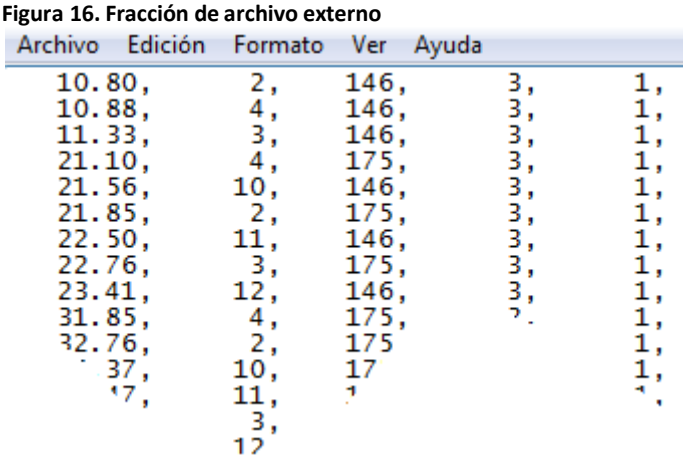
9.2.1.8 Validación del modelo

Con un modelo verificado en el software, se da paso a la validación del modelo. Este paso consiste en comparar los resultados del modelo con los del sistema real. Para esta validación se recurrió a un archivo plano de escritura que genera el software con la información que uno especifique. En cada sección de procesamiento se le ordenó al programa grabar el tiempo, la locación, y algunos atributos, con una lógica como la siguiente:

```
write seguimiento,clock()
write seguimiento,location()
write seguimiento,AtOrden
write seguimiento,AtTerminado
writeline seguimiento,AtEnsamble
```

Esto generaba un archivo de más de 370 mil filas, pero que daba información sobre el comportamiento de cada orden en las diferentes locaciones a través del tiempo.

Figura 16. Fracción de archivo externo



Fuente: Elaboración propia del autor

La principal medida de validación fue el tiempo que tomó al modelo procesar las unidades programadas versus el tiempo que le tomó al sistema real. La Tabla 15 muestra que los días que le tomó al modelo procesar las unidades programadas fueron muy ajustados a los días hábiles del mes.

Tabla 15. Días de producción- reales y simulados

Mes	Días hábiles reales	Duración de la corrida (promedio de las 4 reglas)	Diferencia
nov-10	21	21.3	-0.3
dic-10	24	23.4	0.6
ene-11	26	25.9	0.1
feb-11	25	24.3	0.7
mar-11	26	24.7	1.3
abr-11	26	25.1	0.9
may-11	24	25.1	-1.1
jun-11	26	28.0	-2.0
jul-11	26	24.5	1.5
ago-11	25	27.1	-2.1
sep-11	24	22.3	1.8
oct-11	19	18.7	0.3
Total	292.0	290.3	1.7

Fuente: Elaboración propia del autor

9.2.1.9 Experimentación

Con el modelo construido, verificado y validado, se puede proceder a realizar las corridas. Como se dijo anteriormente, el mismo modelo sirve para correr las diferentes alternativas a evaluar.

- **Corrida de Alternativas:** Para correr las diferentes alternativas, se cambiaba el archivo utilizado para los arribos en Archivos Externos. Por cada regla se tenía un archivo en el que sólo cambiaba el valor del atributo AtPrioridad, el cual era utilizado en la primera locación del modelo para escoger las órdenes a procesar.
- **Cálculo de AtPrioridad por cada regla:** para las tres reglas de secuenciación seleccionadas para servir de punto de comparación, se debió calcular la prioridad con las fórmulas descritas al principio del capítulo. Con esta prioridad calculada, se debió realizar el procedimiento de lotificación descrito en la sección 8.5.3 del capítulo 2 para cada una de las reglas.
- **Variables de Respuesta:** La simulación debía arrojar información de tiempo de las entregas de cada orden, la cual se debería analizar para extraer datos como fecha de entrega final de cada orden.
- **Registros de Resultados**: El archivo que el modelo de simulación creaba al final de cada corrida contenía el minuto en el que cada entidad de cada orden pasaba por la locación 'Empaque'.

9.2.1.10 Análisis de Resultados

Los resultados generados por el software de simulación se debieron convertir en datos que permitieran calcular las medidas de desempeño necesarias para el análisis estadístico y la evaluación conceptual de los resultados.

- Tiempo mínimo registrado: Fecha primera entrada
- Tiempo máximo registrado: Fecha última de entrada

Como cada registro incluía el número de la orden, éste fue utilizado para extraer de la base de datos con la información de cada orden para sacar los datos necesarios para el análisis completo, como:

- Fecha de entrega prometida
- Importancia de la orden
- Trúput

Con todos estos datos, fue posible el cálculo de los días de retraso/adelanto, el tiempo de producción o 'Makespan' y la penalización, los cuales fueron los utilizados para el análisis estadístico de la siguiente sección.

9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Los resultados se evaluaron según las medidas de desempeño descritas en la sección de requerimientos del mercado del capítulo dos. Los resultados se evaluaron comparando las 4 reglas denominadas AHP, FEP, TCP y TRUP.

La Tabla 16 muestra el resumen de los resultados por cada orden y por cada medida de desempeño:

Tabla 16. Resumen resultados en cada medida de desempeño

	AHP	FEP	TCP	TRUP
% Entrega a tiempo (ET):	62.8%	63.0%	37.5%	39.4%
Variabilidad de la entrega (VarEnt):	7.66	7.76	12.12	12.04
"Makespan:" total (horas)	28113.33	33984.86	24368.54	32559.39
Penalización por tardanza:	$10,625,628	$23,934,067	$62,949,939	$42,477,673
Penalización por adelanto:	$23,095,800	$19,189,000	$60,348,200	$56,543,000
Penalización por no entrega a tiempo:	$33,721,428	$43,123,067	$123,298,139	$99,020,673

Fuente: Elaboración propia del autor

Para evaluar si las diferencias presentadas en cada orden son estadísticamente significativas se debe realizar una prueba de comparación de medias. Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a todas las variables para realizar un Análisis de Varianza (ANOVA), pero al ninguna variable presentar un comportamiento normal, se debió proceder a utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Walpole, Myers, & Myers, 1999), la cual es idéntica al ANOVA pero no asume normalidad de los datos.

La prueba de Kruskal-Wallis considera una las siguientes hipótesis:

$$\boldsymbol{H_o}: \mu_{AHP} = \mu_{FEP} = \mu_{TCP} = \mu_{TRUP}$$

donde μ es la media de la variable para cada regla de secuenciación.

$$\boldsymbol{H_1}: Al\ menos\ una\ media\ es\ diferente\ a\ otra$$

Si se acepta la hipótesis nula H_o, significa que la variable se comporta igual para todas las diferentes reglas evaluadas, y que no existe ventaja en usar una regla sobre otra. Rechazar la hipótesis nula, por el contrario, significaría que existe diferencia significativa entre las medias.

Utilizando el paquete estadístico SPSS Statistics 17.0, por medio de la licencia de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se realizó la prueba Kruskal-Wallis, con un nivel de significancia de 0.05, para las variables: 'Días de Retraso/Adelanto', 'Penalización total' y a 'Makespan', obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 17.

Figura 17. Resultados de la Prueba Kruskal-Wallis para 3 variables

Días de Retraso/Adelanto:
Estadísticos de contraste[a,b]

	Días Ret/Ade
Chi-cuadrado	246,551
gl	3
Sig. asintót.	,000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: regla

Penalización Total:
Estadísticos de contraste[a,b]

	PenaliTotal
Chi-cuadrado	188,285
gl	3
Sig. asintót.	,000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: regla

Makespan:
Estadísticos de contraste[a,b]

	tiempo
Chi-cuadrado	4,701
gl	3
Sig. asintót.	,195

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: regla

Fuente: Resultados de SPSS

Las pruebas dejan en evidencia que los resultados en las variables 'Días de retraso/adelanto' y 'Penalización' son diferentes para las reglas de secuenciación evaluadas, mostrando una significancia de 0,000, insuficiente para aceptar la hipótesis nula pero suficiente para decir que tienen medias distintas. Por el contrario, la variable 'Makespan' muestra una significancia de 0.195, superior al 0.05 requerido para aceptar la hipótesis nula, lo que quiere decir que en cuanto a 'Makespan', las 4 reglas muestran resultados que se pueden considerar estadísticamente iguales. En la Tabla 17 se muestran los datos de 'Makespan' por cada regla.

Tabla 17. Makespan por cada regla

	Horas entre Inicio de Proceso y Fin de Proceso			
	AHP	**FEP**	**TCP**	**TRUP**
Makespan Total	28,113	33,985	24,369	32,559
Makespan pedidos MTS	6,753	13,978	6,041	8,306
Makespan pedidos MTO	21,361	20,007	18,327	24,253

Fuente: Elaboración propia del autor

9.3.1.1 % de Entregas a Tiempo

La Tabla 18 muestra el resumen de los datos de la variable 'Días de Retraso/Adelanto', con el número total de pedidos, pedidos entregados a tiempo (en un rango de una semana de la fecha de entrega), pedidos retrasados y pedidos adelantados, con sus porcentajes respectivos.

Tabla 18. Resumen de pedidos a tiempo, retrasados y adelantados.

	# de pedidos | % de pedidos							
	AHP		**FEP**		**TCP**		**TRUP**	
Pedidos totales	635	100%	635	100%	635	100%	635	100%
Pedidos a tiempo	399	62.8%	400	63.0%	238	37.5%	250	39.4%
Pedidos retrasados	67	10.6%	55	8.7%	55	8.7%	215	33.9%
Pedidos adelantados	169	26.6%	180	28.3%	342	53.9%	170	26.8%

Fuente: Elaboración propia del autor

Las reglas TCP y TRUP tienen porcentajes muy bajos de pedidos a tiempo, aunque TCP tiene un porcentaje muy bajo de pedidos retrasados. Por el contrario las reglas AHP y FEP muestran porcentajes muy similares de alrededor de 63% de pedidos a

tiempo. La diferencia entre estas dos reglas se observa en el número de pedidos retrasados y adelantados, en los que la FEP supera a la AHP al tener un menor porcentaje de pedidos retrasados. Estos resultados son muy consecuentes con los criterios de priorización que cada regla considera, pues FEP sólo considera la fecha de entrega para priorización y AHP la considera como el criterio más importante. Por el contrario, TCP y TRUP no consideran la fecha de entrega como criterio de priorización y esto se ve reflejado en los resultados. El alto porcentaje de pedidos adelantados TCP se explica al tener en cuenta que esta regla procesa primero los pedidos de fabricación más rápida, lo que hace que todos los pedidos pequeños se produzcan rápidamente y resulten entregado mucho antes de la fecha de entrega.

9.3.1.2 Variabilidad de retrasos/adelantos

Otra medida de desempeño a evaluar es la variabilidad del retraso/adelanto. La Tabla 19 muestra el número de días de retraso y el número de días de adelanto, junto con la variabilidad (desviación estándar) de los días de retraso/adelanto. Los datos muestran como tanto los días de retraso como los de adelanto de la regla AHP son menores que los de la regla FEP, lo que se ve reflejado en la variabilidad del retraso/adelanto. Esto indica que los resultados de la regla AHP se encuentran más cercanos al cero (pedido a tiempo), objetivo máximo del ejercicio.

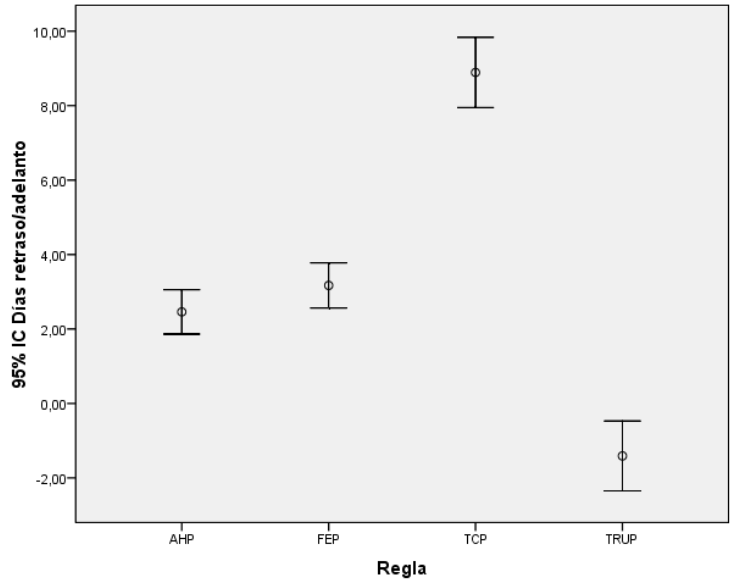
Tabla 19. Resumen de días totales de retraso y adelanto.

	AHP	FEP	TCP	TRUP
Días totales de retraso	101	189	41	1234
Días totales de adelanto	540	601	3094	616
Variación retraso/adelanto	7.66	7.76	12.12	12.04

Fuente: Elaboración propia del autor

Estos datos se pueden observar mejor por medio de la gráfica de barras de error (Figura 18)

Figura 18. Barras de Error - Días retraso/adelanto por cada Regla



Fuente: Resultados de SPSS

9.3.1.3 Entregas a tiempo MTS vs MTO

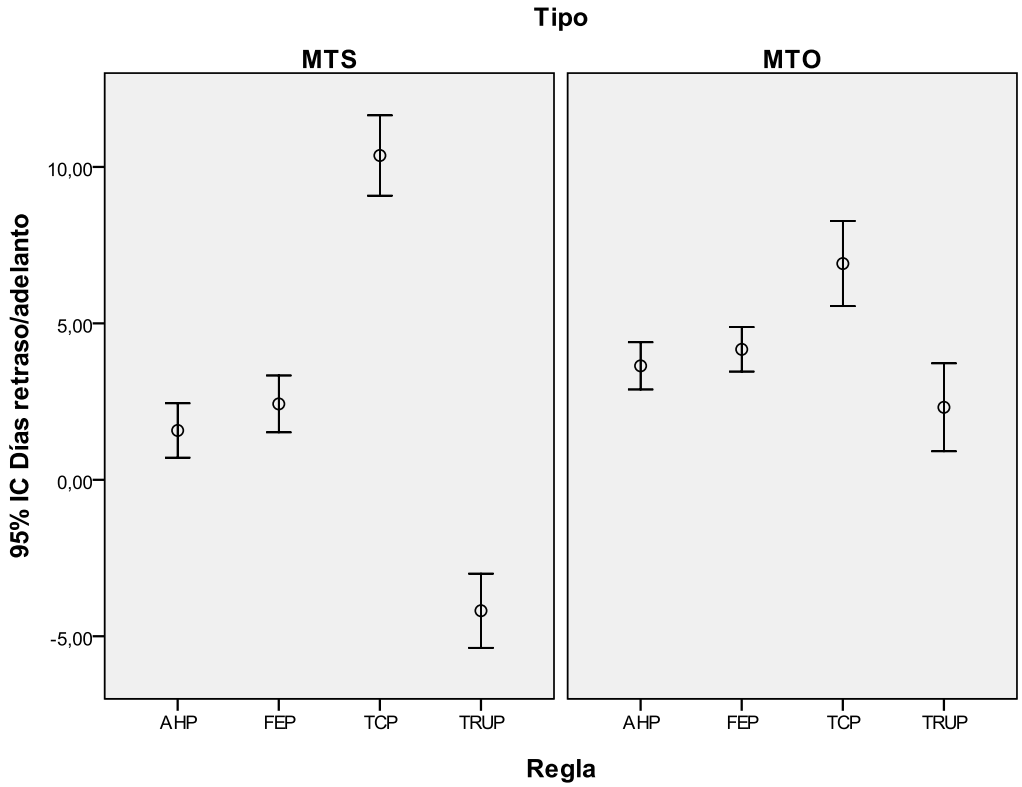
Los datos también pueden ser analizados separando los productos MTS y los MTO, para entender el fenómeno con mayor claridad. La Tabla 20 muestra los porcentajes de pedidos a tiempo, retrasados y adelantados por MTS y MTO y la Figura 19 muestra los datos gráficamente:

Tabla 20. Porcentaje de pedidos a tiempo por MTS y MTO

	MTS / MTO			
	AHP	**FEP**	**TCP**	**TRUP**
% pedidos a tiempo	60.7% / 65.7%	58.2% / 69.4%	37.1% / 38.0%	39.0% / 39.9%
% pedidos retrasados	14.0% / 5.9%	12.1% / 4.1%	6.9% / 11.1%	42.3% / 22.5%
% pedidos adelantados	25.3% / 28.4%	29.7% / 26.6%	56.0% / 50.9%	18.7% / 37.6%

Fuente: - Elaboración propia del autor

Figura 19. Barras de Error. Días de retraso/adelanto por cada regla en MTS y MTO



Fuente: Resultados de SPSS

Se observa que las reglas AHP y FEP tienen un comportamiento similar en ambos mercados, mostrando levemente mejores resultas en el mercado MTO, siendo más fuerte la diferencia en la regla FEP. La regla TRUP es la que mayor diferencia presenta, presentando mayores retrasos en las órdenes MTS que en las MTO. Esto es explicable al considerar que las órdenes MTS generalmente son más pequeñas y aportan menos trúput, por lo que la regla hace que éstas se procesen de últimas y presenten más retrasos. En la regla TCP ocurre lo contrario, pues como las órdenes MTS son de procesamiento más rápido debido a su tamaño, éstas se procesan primero y presentan menos retrasos.

9.3.1.4 Penalización

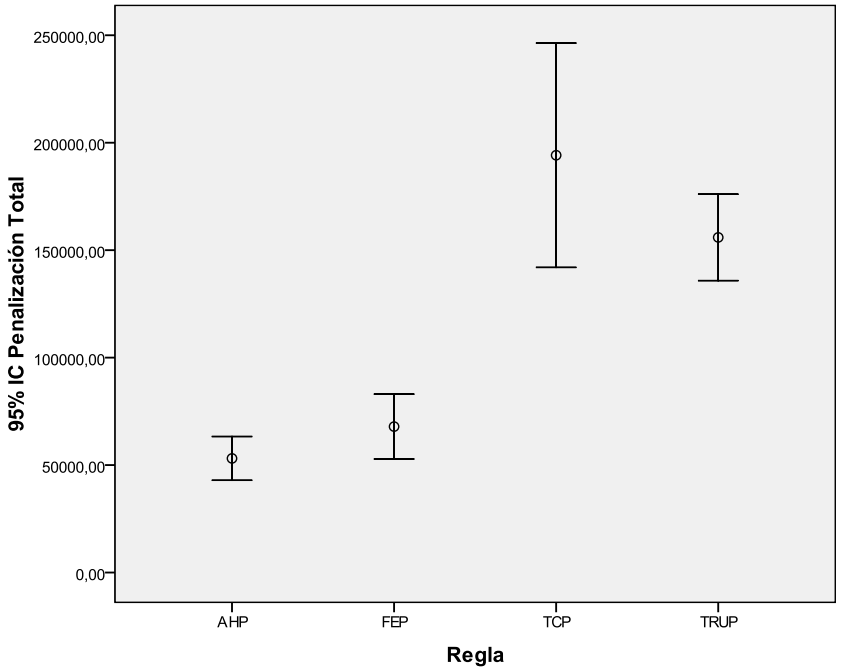
Con todo, lo datos de entregas a tiempo por sí solos no son suficientes pues no muestran la criticidad del retraso en función de la importancia del cliente o del pedido o de la contribución del trúput. Las medidas de desempeño que permiten observar esto se muestra en la Tabla 21 y gráficamente en la Figura 20:

Tabla 21. Resumen de Penalización

	AHP	FEP	TCP	TRUP
Penalización	$33,721,428	$43,123,067	$123,298,139	$99,020,673
Penalización por retraso	$10,625,628	$23,934,067	$62,949,939	$42,477,673
Penalización por adelanto	$23,095,800	$19,189,000	$60,348,200	$56,543,000

Fuente: - Elaboración propia del autor

Figura 20. Barras de Error- Penalización total por cada regla



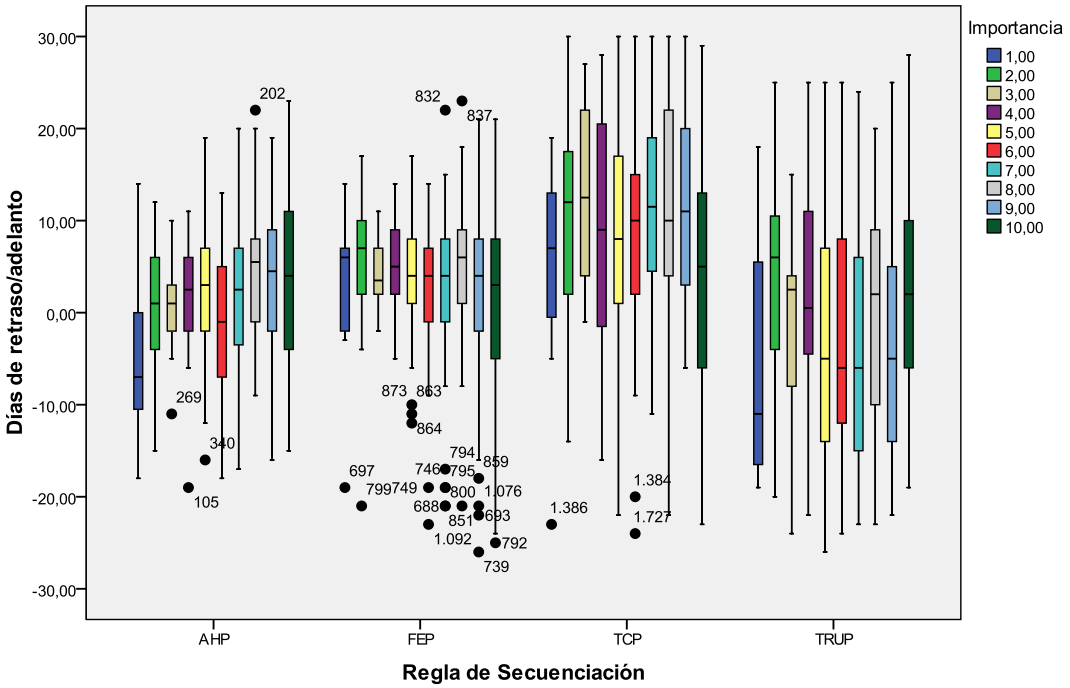
Fuente: Resultados de SPSS

Los datos de penalización son de análisis interesante. De nuevo, las reglas TCP y TRUP muestran valores muy altos, lo que ratifica que su desempeño es bajo.

Las otras dos reglas, por el contrario, continúan con comportamientos similares y satisfactorios. A pesar de que la penalización total es similar, la diferencia principal se encuentra en la penalización por retrasos, la cual representa el 32% de la penalización total en AHP y el 56% en FEP. Esto quiere decir que los pedidos con retraso en la regla FEP (8.7% del total) pertenecían a órdenes de mayor importancia o mayor trúput que los pedidos que presentaron retraso al utilizar la regla AHP (10.6% del total). Esta idea se puede ver más claramente en la Figura 21. El Diagrama de Cajas muestra los días de retraso/adelanto, agrupando por las reglas de secuenciación y categorizando en las cajas por la importancia de la orden. La gráfica muestra que la regla AHP presenta

resultados que van mejorando a medida que aumenta la importancia. La regla FEP muestra múltiples datos atípicos, la mayoría como días de retraso y en órdenes de importancia mayor a 5. Esas órdenes pueden ser muy críticas, pues si son clientes de categoría 10, estos retrasos podrían debilitar la relación con un cliente tan importante.

Figura 21. Diagrama de Cajas- Días de retraso por Regla, agrupado por Importancia del pedido



Fuente: Resultados de SPSS

9.3.1.5 Penalización MTS vs MTO

Al analizar la penalización separando los datos MTS de los MTO (Tabla 22), se observa que la penalización total es la misma, pero desagregada presenta diferencias considerables. Tanto en la orden AHP como en la FEP, la penalización por adelanto de las órdenes MTO es la que mayor diferencia presenta.

Tabla 22. Penalización en MTS y MTO

		AHP	FEP	TCP	TRUP
Penalización Total		$33,721,428	$43,123,067	$123,298,139	$99,020,673
Penalización MTS	Total	$16,983,605	$26,002,079	$67,804,261	$40,575,400
	Retraso	$9,177,805	$20,912,079	$52,054,461	$31,669,600
	Adelanto	$7,805,800	$5,090,000	$15,749,800	$8,905,800
Penalización MTO	Total	$16,737,823	$17,120,988	$55,493,878	$58,445,273
	Retraso	$1,447,823	$3,021,988	$10,895,478	$10,808,073
	Adelanto	$15,290,000	$14,099,000	$44,598,400	$47,637,200

Fuente: - Elaboración propia del autor

9.4 CONCLUSIONES PARCIALES

Herramientas estadísticas permiten evaluar la significancia de los resultados. La prueba de Kruskal-Wallis reemplaza el ANOVA cuando no existe normalidad en las variables.

Las variables de 'Días de Retraso/Adelanto' y 'Penalización' presentaron diferencias significativas entre las 4 reglas de secuenciación evaluadas, lo que permite considerar las medias de las medidas de desempeño '% Entrega a tiempo', 'Variabilidad de la entrega', 'Penalización por tardanza', 'Penalización por adelanto' y 'Penalización por no entrega a tiempo' como factores de decisión.

Debido a que los datos del tiempo de producción 'Makespan' no presentaron diferencias estadísticamente diferentes entre las diferentes reglas, esta medida de desempeño no puede considerarse al evaluar los resultados.

Le medida de desempeño 'Entregas a tiempo' arroja un resultado muy similar para las reglas AHP y FEP (alrededor de 63%) y las reglas TCP y TRUP presentan resultados menores al 40%. Estos resultados reflejan claramente los criterios utilizados para la priorización de las órdenes, ya que TCP y TRUP no consideran la fecha de entrega como criterio de priorización.

Aunque las reglas AHP y FEP muestren resultados similares en 'Entregas a Tiempo', AHP supera al considerar la otra medida de desempeño 'Variabilidad de la entrega', en la cual tiene un mejor resultado, significando que los resultados de la regla AHP se encuentran más cercanos al cero (pedido a tiempo), objetivo máximo del ejercicio.

Al analizar las medidas de desempeño relacionadas con la penalización, se hace evidente que los resultados de la regla AHP son superiores a los de la FEP, pues los valores de penalización son superiores con la regla FEP, aunque el porcentaje de pedidos a tiempo sea ligeramente superior al de AHP.

La regla FEP presenta altos riesgos de obtener malos resultados en órdenes de la máxima importancia, lo cual es algo crítico para los objetivos de la empresa. La regla AHP, al considerar esta importancia como un criterio de priorización, disminuye este riesgo.

Los resultados presentados correspondientes a la corrida de producción de un año completo de la planta en estudio, evaluando 4 reglas de secuenciación diferentes, muestran una superioridad de la regla AHP, creada por medio de un método de decisión multicriterial que considera los criterios que van en la misma dirección de los objetivos de la compañía y permite priorizar conjuntamente órdenes MTS y MTO.

10 CONCLUSIONES FINALES

Sobre el estado del arte

Un gran aporte de este trabajo está constituido por la revisión bibliográfica, a partir de la cual se obtuvieron dos resultados importantes: en primer lugar una mejor comprensión de las características específicas de los ambientes combinados MTS/MTO, y en segundo lugar, la identificación de un grupo de metodologías ya probadas para su gestión a partir de las cuales pudo construirse una propuesta aplicable a la empresa objetivo. Es de anotar que la bibliografía citada incluye casi la totalidad de lo que aparentemente existe sobre el tema.

Las características del mercado actual, cada vez más competitivo y con consumidores más exigentes, hacen que se requiera mayor flexibilidad en las herramientas de producción.

Los enfoques simples en ocasiones ya no son suficientes para los requerimientos del mercado por lo que los sistema híbridos MTS/MTO se están convirtiendo en una alternativa cada vez más utilizada por las empresas para lograr esta flexibilidad.

Los libros académicos y las herramientas de programación se han enfocado en uno u otro enfoque, pero las aplicaciones puras de éstos son cada vez menos. El constante y acelerado cambio en el mercado requiere el diseño rápido y acertado de nuevas herramientas y técnicas de programación para sistemas adaptados a las características actuales del mercado.

Sobre los objetivos múltiples

Cada día es más importante mantener bajos inventarios para minimizar costos, ofrecer productos más personalizados y de mayor variedad y con ágil respuesta, lo que lleva a tener objetivos múltiples. Las reglas de secuenciación simples responden a objetivos únicos y las combinadas son creadas para casos específicos. Con múltiples medidas de desempeño, la programación debe considerar varios criterios.

Debido a que la secuenciación de la producción es el resultado de una priorización, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una herramienta útil para este fin y el Proceso Analítico Jerárquico de Ordenación Grupal (GAHPO) resulta un método muy apropiado en situaciones en las que el tomador de la decisión es un grupo compuesto por varias personas.

La inclusión de diferentes expertos de la organización en la calificación de los criterios permite que la solución tenga un alcance más global y sobrepase los requerimientos o visiones de un área en específico.

Sobre el caso de estudio

Debido a que la combinación de enfoques de producción en el caso de estudio se dio como respuesta desorganizada a los requerimientos del mercado, se generaron vacíos en el método de programación, ya que las soluciones a las dificultades se daban empíricamente sin darle la trascendencia a las implicaciones de tener un enfoque híbrido de producción.

En el caso específico estudiado, se observó que aunque la fecha de entrega es el único criterio utilizado para la priorización de órdenes, falta claridad en la política utilizada para su establecimiento. Para aplicar la regla AHP propuesta correctamente, es necesario que este procedimiento se estandarice e institucionalice.

Las modificaciones propuestas del método de programación actual aportan una fórmula clara y única para la calificación de cada orden, lo cual facilita el proceso de programación y estandariza los factores subjetivos que en ocasiones se incluyen en la toma de decisiones.

La Simulación de Eventos Discretos es un buen método de validación pues permite experimentar con el sistema de forma económica y rápida y pronosticar los resultados. Para el presente trabajo, además de permitir obtener resultados antes de la aplicación en el sistema real, la simulación hizo parte de la solución pues facilitaba los procesos de ensayo y error.

Sobre los resultados

Con la validación realizada en el capítulo tres puede concluirse que el objetivo propuesto se alcanza en forma sobresaliente, pues la regla de prioridad propuesta demuestra tener un resultado superior en las medidas de respuesta seleccionadas. Esto significa para la empresa la posibilidad de una metodología de programación y control de su producción más eficiente desde el punto de vista de la utilización de la capacidad, los costos y los niveles de satisfacción de sus clientes.

La regla de prioridad propuesta en el presente trabajo se constituye en el principal resultado, pues además de realizar una contribución a lo ya existente en la literatura, considera características específicas de las empresas del entorno local y medidas de desempeño aceptadas en el entorno para su construcción y validación.

Aunque la regla FEP presenta menores retrasos, la regla AHP mostró mejores resultados generales ya que considera la importancia y el trúput para la priorización. La regla FEP presenta altos riesgos de obtener malos resultados en órdenes de la máxima importancia, lo cual es algo crítico para los objetivos definidos. La regla AHP, al considerar esta importancia como un criterio de priorización, disminuye este riesgo.

Las reglas TCP y TRUP tienen objetivos “internos” y no con énfasis en el mercado, pues no consideran la fecha de entrega ni la importancia de los clientes o pedidos, por lo que la penalización obtenida es muy alta.

La validación de la regla de secuenciación propuesta permite demostrar la superioridad de su desempeño a partir de la medición de variables respuesta de validez universal como el tiempo de retraso y el trúput, además de una medida de desempeño construida para este propósito específico. Este resultado permite concluir que siempre es posible obtener desarrollos propios, adaptados a cada ambiente específico, que permitan acercar las empresas regionales a objetivos de desempeño competitivo superiores.

Los criterios utilizados para la priorización son los específicos para los requerimientos del caso de estudio, pero si estos se modifican para la realidad de otra empresa, el método es aplicable en otros casos con características similares.

11 RECOMENDACIONES

La validación presentada se cumplió sobre datos históricos correspondientes a un año de producción; no obstante, es muy importante realizar una implementación en tiempo real que permita evaluar esta nueva técnica y enriquecer su construcción con las dinámicas de la realidad de la empresa.

En el desarrollo del estudio se observó que el procedimiento para el establecimiento de fechas de entrega no está muy estandarizado y es necesario fortalecer este proceso para que la aplicación de una regla de secuenciación logre los mejores resultados.

Aunque el estudio se limitó a la planta de mayor peso, es conveniente extenderlo a las demás plantas para obtener un beneficio global y establecer políticas estándares para toda la empresa.

Este estudio deja un camino marcado para que los procedimientos descritos sean aplicados en otras empresas con características similares. Además, incita a la creación de técnicas de programación propias que respondan a requerimientos específicos.

Aunque se utilizaron tres reglas simples para contrastar el desempeño de la regla propuesta, queda abierta la posibilidad de continuar enfrentando las reglas clásicas de secuenciación con las nuevas propuestas. Los resultados positivos de la regla Fecha de Entrega más Próxima inducen que sería enriquecedor profundizar en la comparación del desempeño de esta regla con otras reglas simples y compuestas.

Las medidas de desempeño utilizadas en este trabajo son específicas para el caso de estudio, pero sería valioso analizar el impacto de diferentes reglas de secuenciación en otras medidas de desempeño.

Como una segunda etapa de investigación, se puede desarrollar un modelo de combinación lineal de pesos relativos que por medio de la experimentación se obtengan los pesos óptimos. También resulta de gran interés el utilizar otras técnicas para la programación como lo es la programación genética, heurísticas, el Proceso Analítico en Red (ANP) para la resolución de problemas de objetivos múltiples.

La Simulación de Eventos Discretos es una poderosa herramienta que no sólo sirve para experimentar propuestas sino que puede hacer parte del día a día de la programación de una planta de producción. Sería de gran utilidad desarrollar una herramienta que permita programar al instante con ayuda de la simulación.

12 BIBLIOGRAFÍA

Aullhyde, R., Erdogan, S., & Duke, J. (2006). An experiment on the consistency of aggregated comparison matrices in AHP. European Journal of Operational Research, 171(1), 290-295. doi:10.1016/j.ejor.2004.06.037

Banks, J., Carson, J., Barry, L. N., & Nicol, D. (2009). Discrete-Event System Simulation. (Prentice Hall, Ed.) (Fifth.). N.Y.

Bemelmans, R. (1986). The capacity aspect of inventories. (Springer-Verlag, Ed.) (Ilustrated., p. 165).

Camare, H. M. (2011). Multicriteria decision evaluation of adaptation strategies for vulnerable coastal communities, (April 2010), 1-65. Retrieved from http://www.ruor.uottawa.ca/fr/handle/10393/20112

Cattani, K., Dahan, E., & Schmidt, G. M. (2003).Texturing: Using Make-to-Order Production Layered on Make-to-Stock Production to Hedge Against Uncertainty.

Chang, S. (2003).Heuristic PAC model for hybrid MTO and MTS production environment.International Journal of Production Economics, 85(3), 347-358. doi:10.1016/S0925-5273(03)00121-X

Chen, C.-S., Mestry, S., Damodaran, P., & Wang, C. (2009).The capacity planning problem in make-to-order enterprises.Mathematical and Computer Modelling, 50(9-10), 1461-1473. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.mcm.2009.07.010

Christopher, M. (2005). Logistics and Supply Chain Management - Creating Value-Adding Networks (Third Edit.). Harlow: Pearson Education.

Condon, E., Golden, B., & Wasil, E. (2003). Visualizing group decisions in the analytic hierarchy process. Computers & Operations Research, 30, 1435 - 1445.

Corti, D., Pozzetti, a, &Zorzini, M. (2006). A capacity-driven approach to establish reliable due dates in a MTO environment. International Journal of Production Economics, 104(2), 536-554. doi:10.1016/j.ijpe.2005.03.003

Dabbas, R. (2001). A combined dispatching criteria approach to scheduling semiconductor manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering, 39(3-4), 307-324. doi:10.1016/S0360-8352(01)00008-0

Dong, Y., Zhang, G., Hong, W.-C., & Xu, Y. (2010). Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. Decision Support Systems, 49(3), 281-289. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.dss.2010.03.003

Escobar, M. (2004). A note on AHP group consistency for the row geometric mean priorization procedure. European Journal of Operational Research, 153(2), 318-322. doi:10.1016/S0377-2217(03)00154-1

Federgruen, A., &Katalan, Z. (1999).The impact of adding a make-to-order item to a make-to-stock production system.Management Science, 45(7), 980–994. JSTOR. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/2661696

Gharehgozli, A. H., &Rabbani, M. (2006). A Proposed Hierarchical Production Planning Structure for Combined MTS / MTO Environments Based on Order Penetration Point. Engineering, 2006, 146-151.

Giraldo, J. A. (2011). Simulación de Sistemas de Producción y de Servicios. (U. N. de Colombia, Ed.) (p. 205).

Hadj Youssef, K., Van Delft, C., &Dallery, Y. (2004).Efficient scheduling rules in a combined make-to-stock and make-to-order manufacturing system.Annals of Operations Research, 126(1), 103–134. Springer. doi:10.1023/B:ANOR.0000012277.97069.a6

Heizer, J., & Render, B. (2004).Principios de administración de operaciones (Quinta., p. 638). Pearson Educación. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=jVIwSsVHUfAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Principios+de+administraci&#65533;n+de+operaciones&ots=Fnz4dP0k7H&sig=LTIK9nQOMTFYcopekPXoAEbKraA

Holthaus, Oliver, &Rajendran, C. (1997). New dispatching rules for scheduling in a job shop—An experimental study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 13(2), 148–153. Springer. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/GP610816627KU7TK.pdf

Huizingh, E. K. R. E., & Vrolijk, H. C. J. (1997). Extending the applicability of the analytic hierarchy process. Socio-Economic Planning Sciences, 31(1), 29–39. Elsevier. Retrieved from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012196000250

Ishizaka, A., & Labib, A. (2011a). Selection of new production facilities with the Group Analytic Hierarchy Process Ordering method. Expert Systems with Applications, 38(11), 14336-14345. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.eswa.2010.12.004

Ishizaka, A., & Labib, A. (2011b). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. Expert Systems with Applications, 38(11), 14336-14345. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.eswa.2011.04.143

Jiang, L., &Geunes, J. (2006).Impact of introducing make-to-order options in a make-to-stock environment.European Journal of Operational Research, 174(2), 724-743. doi:10.1016/j.ejor.2004.11.026

Kalantari, M., Rabbani, M., &Ebadian, M. (2011).A decision support system for order acceptance/rejection in hybrid MTS/MTO production systems.Applied Mathematical Modelling, 35(3), 1363-1377. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.apm.2010.09.015

Kaminsky, P. M., & Kaya, O. (2006).MTO-MTS Production Systems in Supply Chains.Citeseer.Citeseer. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.139.3256&rep=rep1&type=pdf

Kerkkanen, a. (2007).Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill.International Journal of Production Economics, 108(1-2), 111-118. doi:10.1016/j.ijpe.2006.12.006

Kingsman, B., Hendry, L., Mercer, A., & Souza, A. D. (1996).production economics Responding to customer enquiries in make-to-order companies Problems and solutions. Production, 47, 219-231.

Kumar, S., Nottestad, D. a, & Macklin, J. F. (2007). A Profit And Loss Analysis For Make-To-Order Versus Make-To-Stock Policy - a Supply Chain Case Study. The Engineering Economist, 52(2), 141-156. doi:10.1080/00137910701328953

Lin, J., Wang, F., & Chang, Y. (2006).A hybrid push/pull-dispatching rule for a photobay in a 300mm wafer fab.Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22(1), 47-55. doi:10.1016/j.rcim.2005.02.003

Meredith, J., &Akinc, U. (2007). Characterizing and structuring a new make-to-forecast production strategy. Journal of Operations Management, 25(3), 623-642. doi:10.1016/j.jom.2006.04.006

Miltenburg, J. (2005). Manufacturing Strategy: How to formulate and Implement a Winning Plan (2nd ed.). New York: Productivity Press.

Moreno, J. M., Altuzarra, A., & Escobar, M. T. (2003). EL ÍNDICE DE CONSISTENCIA GEOMÉTRICO PARA MATRICES INCOMPLETAS EN AHP. Anales de economía aplicada. Retrieved from http://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2003 - Almeria/asepeltPDF/192.PDF

Olafsson, S., & Li, X. (2010). Learning effective new single machine dispatching rules from optimal scheduling data. International Journal of Production Economics, 128(1), 118-126. Elsevier. doi:10.1016/j.ijpe.2010.06.004

Olhager, J. (2001). Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. International Journal of Production Economics, 69(2), 215-225. doi:10.1016/S0925-5273(99)00098-5

Pomerol, J.-C., & Barba-Romero, S. (2000). Multicriterion decision in management: principles and practice. (Springer, Ed.) (p. 395).

Rafiei, H., &Rabbani, M. (2009a). Order Partitioning in Hybrid MTS / MTO Contexts using Fuzzy ANP.Engineering and Technology, 4563, 467-472.

Rafiei, H., &Rabbani, M. (2009b). An MADM Framework toward Hierarchical Production Planning in Hybrid MTS / MTO Environments.Engineering and Technology, 462-467.

Rajagopalan, S. (2002). Make to Order or Make to Stock: Model and Application. Management Science, 48(2), 241-256. doi:10.1287/mnsc.48.2.241.255

Rajendran, C., &Holthaus, O. (1999).A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops.European Journal of Operational Research, 116(1), 156–170. Elsevier.doi:10.1016/S0377-2217(98)00023-X

Schwing, A. G., Zach, C., Zheng, Y., & Pollefeys, M. (2011). Adaptive Random Forest - How many " experts " to ask before making a decision ? Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on (pp. 1377–1384). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5995684

Soman, C. (2004).Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system.International Journal of Production Economics, 90(2), 223-235. doi:10.1016/S0925-5273(02)00376-6

Soman, C., Pietervandonk, D., &Gaalman, G. (2006).Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand.International Journal of Production Economics, 104(2), 441-453. doi:10.1016/j.ijpe.2004.08.002

Soman, C., Vandonk, D., &Gaalman, G. (2007).Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study.International Journal of Production Economics, 108(1-2), 191-199. doi:10.1016/j.ijpe.2006.12.042

Tay, J., & Ho, N. (2008). Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems. Computers & Industrial Engineering, 54(3), 453-473. doi:10.1016/j.cie.2007.08.008

Tsubone, H., Ishikawa, Y., & Yamamoto, H. (2002).Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products.International Journal of Production Research, 40(18), 4835-4851. doi:10.1080/00207540210158834

Utkin, L. V. (2004). Probabilities of judgments provided by unknown experts by using the imprecise Dirichlet model. Risk Decision and Policy, 9(4), 371–389. Taylor & Francis. Retrieved from http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14664530490896672

Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. (Pearson Education, Ed.) (6th ed., p. 752).

Wu, M., Jiang, J., & Chang, W. (2008).Scheduling a hybrid MTO/MTS semiconductor fab with machine-dedication features.International Journal of Production Economics, 112(1), 416-426. doi:10.1016/j.ijpe.2007.04.008

Yao, S., Jiang, Z., Li, N., Zhang, H., &Geng, N. (2011). A multi-objective dynamic scheduling approach using multiple attribute decision making in semiconductor manufacturing. International Journal of Production Economics, 130(1), 125-133. doi:10.1016/j.ijpe.2010.12.014

Yue, Z. (2011). Approach to group decision making based on determining the weights of experts by using projection method. Applied Mathematical Modelling, (September). Elsevier Inc. doi:10.1016/j.apm.2011.09.068

Zaerpour, N., Rabbani, M., Gharehgozli, A. H., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2008). Make-to-order or make-to-stock decision by a novel hybrid approach. Advanced Engineering Informatics, 22(2), 186-201. doi:10.1016/j.aei.2007.10.002

13 ANEXOS

13.1 ANEXO 1: ENCUESTA COMPARACIÓN POR PARES AHP

Calificación criterios de programación

EXPERTO	

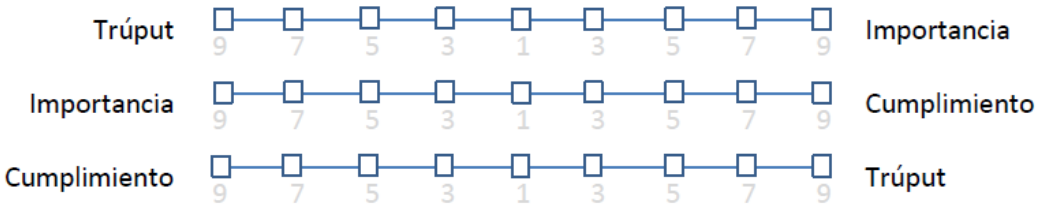
Piense en la programación de producción de un mes de la planta de machetes. Las órdenes a producir ya están definidas con los métodos regulares, pero aún falta por definir en qué orden producirlas. Si considera la posibilidad de ordenarlas de acuerdo a los **siguientes criterios**, ¿cuál cree que es más relevante?

CRITERIOS

Trúput:	Fabricar primero las órdenes que más trúput aporten.	
Importancia:	**EXPO**	Fabricar primero los pedidos de exportación relativamente más importantes (según la importancia del cliente o del pedido).
	NAL	Fabricar las órdenes en orden de su categoría ABC.
Cumplimiento:	**EXPO**	Fabricar primero los pedidos con fecha de entrega más próxima.
	NAL	Fabricar primero las órdenes con menos días de inventario.

Compare cada pareja y ubique el punto en los segmentos considerando:

1 Igual de relevantes
3 Ligeramente más relevante
5 Más relevante
7 Fuertemente más relevante
9 Muy fuertemente más relevante



¿Qué otro criterio cree usted que podría ser relevante?

13.2 ANEXO 2: LISTADO DE ÓRDENES CON SU PRIORIDAD

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
1	1	12/12/2010	0.225	0.100	0.633	0.349
2	5	12/12/2010	0.402	0.500	0.633	0.532
3	8	15/12/2010	0.181	0.800	0.533	0.547
4	10	16/12/2010	0.430	1.000	0.500	0.662
5	9	17/12/2010	0.201	0.900	0.467	0.559
6	10	17/12/2010	0.160	1.000	0.467	0.586
7	10	18/12/2010	0.431	1.000	0.433	0.635
8	4	18/12/2010	0.304	0.400	0.433	0.392
9	6	18/12/2010	0.684	0.600	0.433	0.551
10	6	18/12/2010	0.009	0.600	0.433	0.394
11	10	19/12/2010	0.430	1.000	0.400	0.621
12	4	20/12/2010	0.513	0.400	0.367	0.413
13	10	20/12/2010	0.456	1.000	0.367	0.613
14	6	20/12/2010	0.670	0.600	0.367	0.520
15	9	20/12/2010	0.379	0.900	0.367	0.559
16	5	20/12/2010	0.451	0.500	0.367	0.434
17	2	20/12/2010	0.523	0.200	0.367	0.343
18	9	21/12/2010	0.210	0.900	0.333	0.507
19	8	21/12/2010	0.507	0.800	0.333	0.540
20	10	22/12/2010	0.502	1.000	0.300	0.596
21	5	22/12/2010	0.072	0.500	0.300	0.318
22	5	25/12/2010	0.114	0.500	0.200	0.287
23	8	27/12/2010	0.036	0.800	0.133	0.348
24	10	29/12/2010	0.169	1.000	0.067	0.423
25	9	30/12/2010	0.083	0.900	0.033	0.354
26	8	30/12/2010	0.071	0.800	0.033	0.315
27	10	30/12/2010	0.148	1.000	0.033	0.404
28	7	30/12/2010	0.060	0.700	0.033	0.277
29	10	30/12/2010	0.192	1.000	0.033	0.414
30	10	30/12/2010	0.143	1.000	0.033	0.403
31	10	30/12/2010	1.000	1.000	0.033	0.602
32	10	31/12/2010	0.239	1.000	0.000	0.412
33	9	07/01/2011	0.133	0.900	1.000	0.763
34	10	10/01/2011	0.152	1.000	0.875	0.752
35	8	10/01/2011	0.076	0.800	0.875	0.663
36	7	11/01/2011	0.049	0.700	0.833	0.604
37	7	12/01/2011	0.055	0.700	0.792	0.588
38	10	12/01/2011	0.226	1.000	0.792	0.735
39	8	12/01/2011	0.027	0.800	0.792	0.617
40	10	13/01/2011	0.291	1.000	0.750	0.733
41	8	14/01/2011	0.137	0.800	0.708	0.608
42	10	16/01/2011	1.000	1.000	0.625	0.846
43	6	16/01/2011	0.032	0.600	0.625	0.479
44	9	17/01/2011	0.115	0.900	0.583	0.587
45	6	18/01/2011	0.021	0.600	0.542	0.442
46	7	19/01/2011	0.124	0.700	0.500	0.484
47	4	19/01/2011	0.094	0.400	0.500	0.370
48	4	20/01/2011	0.012	0.400	0.458	0.334
49	5	20/01/2011	0.035	0.500	0.458	0.375
50	5	20/01/2011	0.033	0.500	0.458	0.374
51	5	22/01/2011	0.115	0.500	0.375	0.359
52	6	22/01/2011	0.150	0.600	0.375	0.403
53	10	23/01/2011	0.233	1.000	0.333	0.547
54	9	24/01/2011	0.062	0.900	0.292	0.455
55	9	24/01/2011	0.043	0.900	0.292	0.451
56	8	25/01/2011	0.058	0.800	0.250	0.402
57	2	25/01/2011	0.050	0.200	0.250	0.186
58	2	25/01/2011	0.105	0.200	0.250	0.198
59	10	26/01/2011	0.138	1.000	0.208	0.474
60	5	26/01/2011	0.055	0.500	0.208	0.277
61	7	28/01/2011	0.034	0.700	0.125	0.309
62	9	28/01/2011	0.063	0.900	0.125	0.387
63	9	28/01/2011	0.128	0.900	0.125	0.402
64	10	29/01/2011	0.202	1.000	0.083	0.437
65	8	29/01/2011	0.036	0.800	0.083	0.328

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
319	8	14/06/2011	0.035	0.800	0.552	0.521
320	10	15/06/2011	0.075	1.000	0.517	0.587
321	8	15/06/2011	0.001	0.800	0.517	0.498
322	7	16/06/2011	0.042	0.700	0.483	0.458
323	7	16/06/2011	0.180	0.700	0.483	0.490
324	6	17/06/2011	0.022	0.600	0.448	0.403
325	6	17/06/2011	0.032	0.600	0.448	0.406
326	3	17/06/2011	0.051	0.300	0.448	0.303
327	7	17/06/2011	0.020	0.700	0.448	0.439
328	4	17/06/2011	0.023	0.400	0.448	0.332
329	3	17/06/2011	0.025	0.300	0.448	0.297
330	8	18/06/2011	0.128	0.800	0.414	0.485
331	10	19/06/2011	0.119	1.000	0.379	0.540
332	8	20/06/2011	0.021	0.800	0.345	0.432
333	6	21/06/2011	0.159	0.600	0.310	0.379
334	10	22/06/2011	0.152	1.000	0.276	0.505
335	4	22/06/2011	0.011	0.400	0.276	0.259
336	4	23/06/2011	0.013	0.400	0.241	0.245
337	6	23/06/2011	0.112	0.600	0.241	0.339
338	9	23/06/2011	0.138	0.900	0.241	0.452
339	10	24/06/2011	0.166	1.000	0.207	0.480
340	9	24/06/2011	0.024	0.900	0.207	0.411
341	5	25/06/2011	0.113	0.500	0.172	0.275
342	9	25/06/2011	0.041	0.900	0.172	0.401
343	3	25/06/2011	0.155	0.300	0.172	0.214
344	8	27/06/2011	0.056	0.800	0.103	0.341
345	8	27/06/2011	0.125	0.800	0.103	0.357
346	10	28/06/2011	0.200	1.000	0.069	0.431
347	9	28/06/2011	0.038	0.900	0.069	0.358
348	3	28/06/2011	0.023	0.300	0.069	0.141
349	9	29/06/2011	0.083	0.900	0.034	0.354
350	7	29/06/2011	0.094	0.700	0.034	0.285
351	8	30/06/2011	0.022	0.800	0.000	0.290
352	9	30/06/2011	0.035	0.900	0.000	0.329
353	10	30/06/2011	0.177	1.000	0.000	0.397
354	7	30/06/2011	0.016	0.700	0.000	0.253
355	10	30/06/2011	0.083	1.000	0.000	0.375
356	7	30/06/2011	0.033	0.700	0.000	0.257
357	9	30/06/2011	0.048	0.900	0.000	0.332
358	7	30/06/2011	0.049	0.700	0.000	0.261
359	7	30/06/2011	0.017	0.700	0.000	0.253
360	5	30/06/2011	0.018	0.500	0.000	0.182
361	9	30/06/2011	0.076	0.900	0.000	0.338
362	10	30/06/2011	0.133	1.000	0.000	0.387
363	8	30/06/2011	0.022	0.800	0.000	0.290
364	4	30/06/2011	0.192	0.400	0.000	0.187
365	8	30/06/2011	0.124	0.800	0.000	0.314
366	10	01/07/2011	1.000	1.000	1.000	1.000
367	5	02/07/2011	0.072	0.500	0.967	0.593
368	10	04/07/2011	0.124	1.000	0.900	0.756
369	5	04/07/2011	0.034	0.500	0.900	0.557
370	7	04/07/2011	0.141	0.700	0.900	0.653
371	10	05/07/2011	0.164	1.000	0.867	0.751
372	5	05/07/2011	0.056	0.500	0.867	0.548
373	7	07/07/2011	0.038	0.700	0.800	0.588
374	8	07/07/2011	0.021	0.800	0.800	0.619
375	8	08/07/2011	0.063	0.800	0.767	0.615
376	10	09/07/2011	0.220	1.000	0.733	0.709
377	7	09/07/2011	0.037	0.700	0.733	0.560
378	10	09/07/2011	0.168	1.000	0.733	0.697
379	10	09/07/2011	0.149	1.000	0.733	0.693
380	8	09/07/2011	0.029	0.800	0.733	0.594
381	5	10/07/2011	0.165	0.500	0.700	0.505
382	9	10/07/2011	0.172	0.900	0.700	0.649
383	8	10/07/2011	0.035	0.800	0.700	0.581

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
66	8	29/01/2011	0.125	0.800	0.083	0.348
67	2	29/01/2011	0.075	0.200	0.083	0.123
68	8	29/01/2011	0.140	0.800	0.083	0.352
69	10	30/01/2011	0.130	1.000	0.042	0.404
70	4	30/01/2011	0.017	0.400	0.042	0.164
71	8	31/01/2011	0.029	0.800	0.000	0.292
72	10	31/01/2011	0.068	1.000	0.000	0.372
73	9	31/01/2011	0.023	0.900	0.000	0.326
74	10	31/01/2011	0.107	1.000	0.000	0.381
75	7	31/01/2011	0.032	0.700	0.000	0.257
76	5	31/01/2011	0.013	0.500	0.000	0.181
77	10	31/01/2011	0.119	1.000	0.000	0.384
78	2	31/01/2011	0.159	0.200	0.000	0.108
79	5	31/01/2011	0.130	0.500	0.000	0.208
80	5	31/01/2011	0.109	0.500	0.000	0.203
81	7	31/01/2011	0.022	0.700	0.000	0.254
82	8	31/01/2011	0.071	0.800	0.000	0.301
83	5	31/01/2011	0.167	0.500	0.000	0.217
84	9	01/02/2011	0.119	0.900	1.000	0.760
85	7	01/02/2011	0.048	0.700	1.000	0.672
86	10	01/02/2011	0.161	1.000	1.000	0.806
87	10	01/02/2011	0.189	1.000	1.000	0.812
88	9	01/02/2011	0.112	0.900	1.000	0.758
89	10	02/02/2011	1.000	1.000	0.963	0.985
90	9	03/02/2011	0.052	0.900	0.926	0.714
91	2	03/02/2011	0.078	0.200	0.926	0.471
92	8	03/02/2011	0.114	0.800	0.926	0.693
93	10	04/02/2011	0.130	1.000	0.889	0.753
94	1	05/02/2011	0.014	0.100	0.852	0.390
95	10	06/02/2011	0.259	1.000	0.815	0.752
96	10	07/02/2011	0.162	1.000	0.778	0.714
97	8	08/02/2011	0.118	0.800	0.741	0.617
98	1	09/02/2011	0.089	0.100	0.704	0.346
99	10	10/02/2011	0.178	1.000	0.667	0.672
100	9	11/02/2011	0.073	0.900	0.630	0.597
101	6	12/02/2011	0.028	0.600	0.593	0.464
102	6	12/02/2011	0.017	0.600	0.593	0.462
103	10	12/02/2011	0.083	1.000	0.593	0.620
104	9	13/02/2011	0.061	0.900	0.556	0.564
105	7	13/02/2011	0.027	0.700	0.556	0.484
106	5	13/02/2011	0.029	0.500	0.556	0.414
107	7	14/02/2011	0.075	0.700	0.519	0.480
108	10	15/02/2011	0.206	1.000	0.481	0.602
109	10	15/02/2011	0.155	1.000	0.481	0.590
110	10	15/02/2011	0.086	1.000	0.481	0.575
111	4	16/02/2011	0.127	0.400	0.444	0.355
112	5	17/02/2011	0.028	0.500	0.407	0.352
113	5	17/02/2011	0.015	0.500	0.407	0.349
114	4	18/02/2011	0.116	0.400	0.370	0.322
115	10	19/02/2011	0.200	1.000	0.333	0.540
116	5	20/02/2011	0.020	0.500	0.296	0.305
117	2	21/02/2011	0.124	0.200	0.259	0.207
118	8	23/02/2011	0.040	0.800	0.185	0.371
119	7	24/02/2011	0.025	0.700	0.148	0.316
120	9	24/02/2011	0.047	0.900	0.148	0.393
121	5	24/02/2011	0.042	0.500	0.148	0.249
122	6	24/02/2011	0.090	0.600	0.148	0.296
123	8	24/02/2011	0.124	0.800	0.148	0.375
124	2	25/02/2011	0.020	0.200	0.111	0.122
125	2	26/02/2011	0.038	0.200	0.074	0.110
126	8	27/02/2011	0.023	0.800	0.037	0.306
127	8	27/02/2011	0.036	0.800	0.037	0.309
128	6	27/02/2011	0.011	0.600	0.037	0.231
129	6	27/02/2011	0.087	0.600	0.037	0.249
130	10	28/02/2011	0.108	1.000	0.000	0.381
131	9	28/02/2011	0.112	0.900	0.000	0.346
384	8	11/07/2011	0.132	0.800	0.667	0.590
385	10	12/07/2011	0.209	1.000	0.633	0.666
386	10	13/07/2011	0.145	1.000	0.600	0.637
387	8	14/07/2011	0.042	0.800	0.567	0.528
388	6	14/07/2011	0.023	0.600	0.567	0.453
389	10	15/07/2011	0.180	1.000	0.533	0.618
390	8	15/07/2011	0.165	0.800	0.533	0.543
391	9	16/07/2011	0.072	0.900	0.500	0.543
392	6	16/07/2011	0.020	0.600	0.500	0.424
393	7	16/07/2011	0.165	0.700	0.500	0.494
394	7	16/07/2011	0.228	0.700	0.500	0.508
395	9	19/07/2011	0.029	0.900	0.400	0.492
396	9	20/07/2011	0.046	0.900	0.367	0.482
397	5	20/07/2011	0.153	0.500	0.367	0.365
398	10	20/07/2011	0.130	1.000	0.367	0.537
399	5	21/07/2011	0.190	0.500	0.333	0.360
400	2	25/07/2011	0.188	0.200	0.200	0.197
401	10	26/07/2011	0.058	1.000	0.167	0.438
402	6	27/07/2011	0.202	0.600	0.133	0.316
403	4	28/07/2011	0.012	0.400	0.100	0.186
404	3	29/07/2011	0.123	0.300	0.067	0.163
405	2	29/07/2011	0.192	0.200	0.067	0.143
406	9	30/07/2011	0.022	0.900	0.033	0.339
407	7	30/07/2011	0.164	0.700	0.033	0.301
408	10	30/07/2011	0.134	1.000	0.033	0.401
409	2	30/07/2011	0.188	0.200	0.033	0.129
410	7	30/07/2011	0.199	0.700	0.033	0.309
411	9	31/07/2011	0.026	0.900	0.000	0.327
412	5	31/07/2011	0.026	0.500	0.000	0.184
413	10	31/07/2011	0.107	1.000	0.000	0.381
414	10	01/08/2011	0.325	1.000	1.000	0.843
415	10	02/08/2011	0.209	1.000	0.967	0.803
416	7	02/08/2011	0.034	0.700	0.967	0.655
417	5	03/08/2011	0.041	0.500	0.933	0.572
418	5	03/08/2011	0.133	0.500	0.933	0.594
419	7	03/08/2011	0.025	0.700	0.933	0.640
420	6	05/08/2011	0.014	0.600	0.867	0.574
421	5	05/08/2011	0.034	0.500	0.867	0.543
422	6	06/08/2011	0.034	0.600	0.833	0.565
423	10	06/08/2011	0.220	1.000	0.833	0.751
424	9	06/08/2011	0.095	0.900	0.833	0.686
425	7	07/08/2011	0.046	0.700	0.800	0.590
426	9	07/08/2011	0.115	0.900	0.800	0.677
427	9	08/08/2011	0.016	0.900	0.767	0.640
428	10	09/08/2011	1.000	1.000	0.733	0.890
429	2	09/08/2011	0.024	0.200	0.733	0.379
430	10	10/08/2011	0.156	1.000	0.700	0.681
431	9	10/08/2011	0.078	0.900	0.700	0.627
432	5	10/08/2011	0.071	0.500	0.700	0.483
433	9	10/08/2011	0.050	0.900	0.700	0.621
434	8	11/08/2011	0.073	0.800	0.667	0.577
435	8	12/08/2011	0.118	0.800	0.633	0.573
436	1	12/08/2011	0.002	0.100	0.633	0.297
437	7	14/08/2011	0.030	0.700	0.567	0.490
438	10	15/08/2011	0.119	1.000	0.533	0.604
439	10	15/08/2011	0.165	1.000	0.533	0.614
440	5	15/08/2011	0.124	0.500	0.533	0.426
441	6	15/08/2011	0.177	0.600	0.533	0.474
442	10	16/08/2011	0.179	1.000	0.500	0.604
443	9	17/08/2011	0.099	0.900	0.467	0.536
444	8	18/08/2011	0.043	0.800	0.433	0.474
445	9	19/08/2011	0.072	0.900	0.400	0.502
446	7	20/08/2011	0.058	0.700	0.367	0.414
447	7	20/08/2011	0.019	0.700	0.367	0.405
448	8	20/08/2011	0.113	0.800	0.367	0.462
449	5	20/08/2011	0.012	0.500	0.367	0.332

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
132	7	28/02/2011	0.120	0.700	0.000	0.277
133	6	28/02/2011	0.118	0.600	0.000	0.241
134	8	01/03/2011	0.113	0.800	1.000	0.723
135	10	01/03/2011	0.270	1.000	1.000	0.831
136	9	01/03/2011	0.119	0.900	1.000	0.760
137	4	01/03/2011	0.020	0.400	1.000	0.559
138	9	01/03/2011	0.132	0.900	1.000	0.763
139	8	02/03/2011	0.095	0.800	0.967	0.705
140	10	02/03/2011	0.307	1.000	0.967	0.826
141	5	02/03/2011	0.053	0.500	0.967	0.589
142	6	03/03/2011	0.033	0.600	0.933	0.606
143	7	03/03/2011	0.061	0.700	0.933	0.648
144	10	03/03/2011	0.418	1.000	0.933	0.838
145	10	03/03/2011	0.267	1.000	0.933	0.803
146	6	03/03/2011	0.269	0.600	0.933	0.661
147	6	04/03/2011	0.047	0.600	0.900	0.595
148	1	05/03/2011	0.199	0.100	0.867	0.439
149	8	05/03/2011	0.198	0.800	0.867	0.688
150	10	06/03/2011	0.172	1.000	0.833	0.739
151	7	06/03/2011	0.043	0.700	0.833	0.603
152	10	06/03/2011	0.269	1.000	0.833	0.762
153	8	07/03/2011	0.242	0.800	0.800	0.671
154	10	09/03/2011	0.330	1.000	0.733	0.735
155	9	09/03/2011	0.149	0.900	0.733	0.657
156	7	10/03/2011	0.049	0.700	0.700	0.549
157	5	10/03/2011	0.259	0.500	0.700	0.527
158	9	12/03/2011	0.126	0.900	0.633	0.611
159	10	12/03/2011	0.168	1.000	0.633	0.656
160	10	12/03/2011	0.168	1.000	0.633	0.656
161	10	13/03/2011	0.276	1.000	0.600	0.667
162	10	13/03/2011	1.000	1.000	0.600	0.835
163	8	14/03/2011	0.210	0.800	0.567	0.567
164	6	15/03/2011	0.030	0.600	0.533	0.440
165	9	15/03/2011	0.104	0.900	0.533	0.564
166	7	15/03/2011	0.176	0.700	0.533	0.510
167	10	17/03/2011	0.234	1.000	0.467	0.603
168	8	18/03/2011	0.170	0.800	0.433	0.503
169	7	18/03/2011	0.193	0.700	0.433	0.473
170	4	19/03/2011	0.066	0.400	0.400	0.323
171	7	20/03/2011	0.037	0.700	0.367	0.409
172	2	20/03/2011	0.108	0.200	0.367	0.247
173	4	21/03/2011	0.032	0.400	0.333	0.287
174	8	23/03/2011	0.032	0.800	0.267	0.402
175	8	23/03/2011	0.220	0.800	0.267	0.446
176	2	24/03/2011	0.332	0.200	0.233	0.244
177	7	25/03/2011	0.024	0.700	0.200	0.337
178	8	25/03/2011	0.233	0.800	0.200	0.421
179	4	25/03/2011	0.265	0.400	0.200	0.286
180	8	26/03/2011	0.254	0.800	0.167	0.412
181	9	27/03/2011	0.035	0.900	0.133	0.384
182	9	29/03/2011	0.296	0.900	0.067	0.417
183	10	30/03/2011	0.193	1.000	0.033	0.415
184	5	30/03/2011	0.240	0.500	0.033	0.248
185	8	30/03/2011	0.101	0.800	0.033	0.322
186	7	30/03/2011	0.279	0.700	0.033	0.328
187	6	31/03/2011	0.010	0.600	0.000	0.216
188	8	31/03/2011	0.248	0.800	0.000	0.343
189	10	01/04/2011	0.211	1.000	1.000	0.817
190	4	01/04/2011	0.018	0.400	1.000	0.559
191	7	02/04/2011	0.056	0.700	0.966	0.660
192	7	03/04/2011	0.061	0.700	0.931	0.647
193	9	03/04/2011	0.070	0.900	0.931	0.720
194	10	03/04/2011	0.113	1.000	0.931	0.766
195	10	05/04/2011	0.349	1.000	0.862	0.792
196	2	05/04/2011	0.146	0.200	0.862	0.460
197	7	05/04/2011	0.135	0.700	0.862	0.636

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
450	5	21/08/2011	0.121	0.500	0.333	0.344
451	10	23/08/2011	0.193	1.000	0.267	0.511
452	6	23/08/2011	0.017	0.600	0.267	0.327
453	9	24/08/2011	0.037	0.900	0.233	0.425
454	4	24/08/2011	0.155	0.400	0.233	0.275
455	7	25/08/2011	0.031	0.700	0.200	0.339
456	2	25/08/2011	0.178	0.200	0.200	0.195
457	10	25/08/2011	0.105	1.000	0.200	0.463
458	9	26/08/2011	0.050	0.900	0.167	0.401
459	8	27/08/2011	0.041	0.800	0.133	0.349
460	5	27/08/2011	0.203	0.500	0.133	0.280
461	8	28/08/2011	0.037	0.800	0.100	0.335
462	6	28/08/2011	0.108	0.600	0.100	0.280
463	7	29/08/2011	0.118	0.700	0.067	0.304
464	10	29/08/2011	0.123	1.000	0.067	0.412
465	2	30/08/2011	0.122	0.200	0.033	0.113
466	10	30/08/2011	0.115	1.000	0.033	0.397
467	7	31/08/2011	0.016	0.700	0.000	0.253
468	10	31/08/2011	0.089	1.000	0.000	0.377
469	5	31/08/2011	0.019	0.500	0.000	0.183
470	9	31/08/2011	0.127	0.900	0.000	0.350
471	10	01/09/2011	0.133	1.000	1.000	0.799
472	7	01/09/2011	0.047	0.700	1.000	0.672
473	8	01/09/2011	0.075	0.800	1.000	0.714
474	10	01/09/2011	0.159	1.000	1.000	0.805
475	10	01/09/2011	1.000	1.000	1.000	1.000
476	9	01/09/2011	0.090	0.900	1.000	0.753
477	5	01/09/2011	0.036	0.500	1.000	0.598
478	9	02/09/2011	0.115	0.900	0.966	0.745
479	8	02/09/2011	0.065	0.800	0.966	0.698
480	10	02/09/2011	0.268	1.000	0.966	0.816
481	10	02/09/2011	0.206	1.000	0.966	0.802
482	10	02/09/2011	0.288	1.000	0.966	0.821
483	10	02/09/2011	0.182	1.000	0.966	0.796
484	7	02/09/2011	0.033	0.700	0.966	0.655
485	5	02/09/2011	0.018	0.500	0.966	0.580
486	6	02/09/2011	0.021	0.600	0.966	0.616
487	7	02/09/2011	0.024	0.700	0.966	0.653
488	8	02/09/2011	0.053	0.800	0.966	0.695
489	6	02/09/2011	0.190	0.600	0.966	0.656
490	10	03/09/2011	0.172	1.000	0.931	0.780
491	7	03/09/2011	0.072	0.700	0.931	0.650
492	8	04/09/2011	0.057	0.800	0.897	0.668
493	9	04/09/2011	0.071	0.900	0.897	0.706
494	10	04/09/2011	0.258	1.000	0.897	0.785
495	10	05/09/2011	0.186	1.000	0.862	0.754
496	8	05/09/2011	0.140	0.800	0.862	0.673
497	8	07/09/2011	0.021	0.800	0.793	0.617
498	6	07/09/2011	0.029	0.600	0.793	0.547
499	8	07/09/2011	0.091	0.800	0.793	0.633
500	4	07/09/2011	0.060	0.400	0.793	0.483
501	7	08/09/2011	0.041	0.700	0.759	0.571
502	5	08/09/2011	0.059	0.500	0.759	0.504
503	10	10/09/2011	0.151	1.000	0.690	0.675
504	9	11/09/2011	0.059	0.900	0.655	0.604
505	5	12/09/2011	0.172	0.500	0.621	0.474
506	9	14/09/2011	0.035	0.900	0.552	0.556
507	9	14/09/2011	0.173	0.900	0.552	0.588
508	7	14/09/2011	0.164	0.700	0.552	0.515
509	2	15/09/2011	0.144	0.200	0.517	0.318
510	6	15/09/2011	0.165	0.600	0.517	0.465
511	6	15/09/2011	0.141	0.600	0.517	0.459
512	3	15/09/2011	0.028	0.300	0.517	0.326
513	6	16/09/2011	0.210	0.600	0.483	0.461
514	7	19/09/2011	0.023	0.700	0.379	0.411
515	9	19/09/2011	0.057	0.900	0.379	0.490

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
198	5	06/04/2011	0.100	0.500	0.828	0.542
199	10	07/04/2011	0.349	1.000	0.793	0.764
200	9	07/04/2011	0.107	0.900	0.793	0.672
201	10	08/04/2011	0.246	1.000	0.759	0.726
202	10	08/04/2011	0.033	1.000	0.759	0.676
203	5	09/04/2011	0.018	0.500	0.724	0.481
204	7	09/04/2011	0.051	0.700	0.724	0.559
205	5	09/04/2011	0.042	0.500	0.724	0.486
206	7	10/04/2011	0.086	0.700	0.690	0.553
207	4	10/04/2011	0.148	0.400	0.690	0.461
208	10	11/04/2011	0.149	1.000	0.655	0.661
209	8	12/04/2011	0.083	0.800	0.621	0.560
210	7	12/04/2011	0.055	0.700	0.621	0.518
211	9	12/04/2011	0.087	0.900	0.621	0.596
212	6	12/04/2011	0.024	0.600	0.621	0.475
213	10	12/04/2011	0.226	1.000	0.621	0.664
214	6	13/04/2011	0.026	0.600	0.586	0.461
215	10	15/04/2011	0.280	1.000	0.517	0.634
216	10	15/04/2011	0.186	1.000	0.517	0.613
217	10	16/04/2011	0.187	1.000	0.483	0.598
218	10	16/04/2011	1.000	1.000	0.483	0.787
219	2	16/04/2011	0.119	0.200	0.483	0.298
220	9	19/04/2011	0.073	0.900	0.379	0.494
221	8	20/04/2011	0.057	0.800	0.345	0.440
222	2	20/04/2011	0.094	0.200	0.345	0.235
223	9	22/04/2011	0.104	0.900	0.276	0.458
224	4	23/04/2011	0.013	0.400	0.241	0.245
225	9	23/04/2011	0.095	0.900	0.241	0.442
226	7	23/04/2011	0.142	0.700	0.241	0.382
227	6	24/04/2011	0.017	0.600	0.207	0.303
228	8	25/04/2011	0.145	0.800	0.172	0.390
229	7	26/04/2011	0.026	0.700	0.138	0.312
230	9	26/04/2011	0.245	0.900	0.138	0.434
231	8	27/04/2011	0.125	0.800	0.103	0.357
232	5	28/04/2011	0.053	0.500	0.069	0.219
233	2	28/04/2011	0.051	0.200	0.069	0.112
234	8	29/04/2011	0.039	0.800	0.034	0.308
235	10	29/04/2011	0.135	1.000	0.034	0.402
236	1	29/04/2011	0.083	0.100	0.034	0.069
237	8	30/04/2011	0.043	0.800	0.000	0.295
238	5	30/04/2011	0.016	0.500	0.000	0.182
239	6	30/04/2011	0.019	0.600	0.000	0.218
240	7	30/04/2011	0.012	0.700	0.000	0.252
241	10	30/04/2011	0.083	1.000	0.000	0.376
242	8	30/04/2011	0.106	0.800	0.000	0.310
243	4	30/04/2011	0.114	0.400	0.000	0.169
244	10	01/05/2011	0.150	1.000	1.000	0.803
245	10	01/05/2011	0.310	1.000	1.000	0.840
246	10	01/05/2011	0.236	1.000	1.000	0.823
247	10	01/05/2011	0.211	1.000	1.000	0.817
248	9	01/05/2011	0.124	0.900	1.000	0.761
249	6	02/05/2011	0.038	0.600	0.967	0.621
250	9	02/05/2011	0.087	0.900	0.967	0.739
251	10	02/05/2011	0.327	1.000	0.967	0.830
252	6	02/05/2011	0.024	0.600	0.967	0.617
253	8	02/05/2011	0.243	0.800	0.967	0.740
254	6	03/05/2011	0.025	0.600	0.933	0.604
255	8	04/05/2011	0.056	0.800	0.900	0.669
256	9	04/05/2011	0.056	0.900	0.900	0.704
257	8	04/05/2011	0.239	0.800	0.900	0.711
258	10	05/05/2011	0.208	1.000	0.867	0.762
259	10	05/05/2011	0.156	1.000	0.867	0.749
260	5	05/05/2011	0.159	0.500	0.867	0.572
261	5	05/05/2011	0.313	0.500	0.867	0.608
262	10	06/05/2011	0.158	1.000	0.833	0.736
263	10	06/05/2011	1.000	1.000	0.833	0.931

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
516	5	20/09/2011	0.159	0.500	0.345	0.357
517	10	23/09/2011	0.142	1.000	0.241	0.489
518	3	25/09/2011	0.067	0.300	0.172	0.194
519	3	25/09/2011	0.104	0.300	0.172	0.202
520	3	26/09/2011	0.024	0.300	0.138	0.169
521	7	26/09/2011	0.165	0.700	0.138	0.344
522	8	27/09/2011	0.169	0.800	0.103	0.367
523	8	29/09/2011	0.164	0.800	0.034	0.337
524	10	30/09/2011	0.142	1.000	0.000	0.389
525	6	30/09/2011	0.223	0.600	0.000	0.266
526	5	30/09/2011	0.029	0.500	0.000	0.185
527	9	02/10/2011	0.137	0.900	1.000	0.764
528	9	03/10/2011	0.090	0.900	0.966	0.739
529	8	03/10/2011	0.300	0.800	0.966	0.752
530	7	04/10/2011	0.078	0.700	0.931	0.651
531	8	04/10/2011	0.087	0.800	0.931	0.689
532	4	05/10/2011	0.257	0.400	0.897	0.571
533	9	05/10/2011	0.144	0.900	0.897	0.723
534	10	07/10/2011	0.207	1.000	0.828	0.745
535	6	08/10/2011	0.051	0.600	0.793	0.552
536	5	08/10/2011	0.054	0.500	0.793	0.517
537	10	10/10/2011	0.298	1.000	0.724	0.724
538	7	10/10/2011	0.107	0.700	0.724	0.572
539	9	10/10/2011	0.035	0.900	0.724	0.627
540	10	11/10/2011	0.391	1.000	0.690	0.731
541	4	11/10/2011	0.027	0.400	0.690	0.433
542	9	12/10/2011	0.120	0.900	0.655	0.618
543	10	14/10/2011	0.204	1.000	0.586	0.645
544	7	14/10/2011	0.043	0.700	0.586	0.501
545	6	14/10/2011	0.042	0.600	0.586	0.465
546	9	14/10/2011	0.143	0.900	0.586	0.595
547	10	15/10/2011	0.234	1.000	0.552	0.638
548	5	15/10/2011	0.039	0.500	0.552	0.414
549	9	15/10/2011	0.076	0.900	0.552	0.566
550	10	15/10/2011	0.165	1.000	0.552	0.622
551	10	18/10/2011	0.234	1.000	0.448	0.595
552	8	18/10/2011	0.028	0.800	0.448	0.476
553	5	19/10/2011	0.080	0.500	0.414	0.367
554	10	20/10/2011	0.312	1.000	0.379	0.585
555	6	20/10/2011	0.300	0.600	0.379	0.439
556	5	20/10/2011	0.212	0.500	0.379	0.384
557	10	20/10/2011	0.192	1.000	0.379	0.557
558	8	20/10/2011	0.219	0.800	0.379	0.492
559	2	21/10/2011	0.082	0.200	0.345	0.232
560	10	22/10/2011	1.000	1.000	0.310	0.716
561	6	22/10/2011	0.159	0.600	0.310	0.378
562	8	22/10/2011	0.220	0.800	0.310	0.464
563	9	23/10/2011	0.114	0.900	0.276	0.461
564	7	24/10/2011	0.042	0.700	0.241	0.359
565	9	26/10/2011	0.454	0.900	0.172	0.497
566	7	27/10/2011	0.021	0.700	0.138	0.311
567	5	27/10/2011	0.230	0.500	0.138	0.288
568	8	28/10/2011	0.059	0.800	0.103	0.341
569	6	28/10/2011	0.117	0.600	0.103	0.283
570	8	29/10/2011	0.122	0.800	0.069	0.342
571	8	29/10/2011	0.126	0.800	0.069	0.343
572	9	30/10/2011	0.055	0.900	0.034	0.348
573	4	30/10/2011	0.203	0.400	0.034	0.204
574	5	30/10/2011	0.209	0.500	0.034	0.241
575	3	30/10/2011	0.194	0.300	0.034	0.166
576	8	31/10/2011	0.031	0.800	0.000	0.292
577	10	31/10/2011	0.137	1.000	0.000	0.388
578	10	31/10/2011	0.104	1.000	0.000	0.380
579	2	31/10/2011	0.013	0.200	0.000	0.074
580	8	31/10/2011	0.202	0.800	0.000	0.332
581	6	31/10/2011	0.283	0.600	0.000	0.279

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
264	10	07/05/2011	0.266	1.000	0.800	0.747
265	10	07/05/2011	0.134	1.000	0.800	0.717
266	6	08/05/2011	0.031	0.600	0.767	0.537
267	7	09/05/2011	0.046	0.700	0.733	0.562
268	9	09/05/2011	0.033	0.900	0.733	0.630
269	5	10/05/2011	0.032	0.500	0.700	0.474
270	5	10/05/2011	0.178	0.500	0.700	0.508
271	6	10/05/2011	0.167	0.600	0.700	0.541
272	9	11/05/2011	0.066	0.900	0.667	0.611
273	7	11/05/2011	0.041	0.700	0.667	0.533
274	7	11/05/2011	0.036	0.700	0.667	0.532
275	7	11/05/2011	0.038	0.700	0.667	0.533
276	9	11/05/2011	0.100	0.900	0.667	0.618
277	7	12/05/2011	0.011	0.700	0.633	0.513
278	8	13/05/2011	0.050	0.800	0.600	0.544
279	9	14/05/2011	0.089	0.900	0.567	0.575
280	9	14/05/2011	0.096	0.900	0.567	0.576
281	8	15/05/2011	0.049	0.800	0.533	0.516
282	5	15/05/2011	0.013	0.500	0.533	0.401
283	9	15/05/2011	0.067	0.900	0.533	0.556
284	8	15/05/2011	0.179	0.800	0.533	0.546
285	6	15/05/2011	0.195	0.600	0.533	0.479
286	7	16/05/2011	0.018	0.700	0.500	0.460
287	10	18/05/2011	0.120	1.000	0.433	0.562
288	7	21/05/2011	0.045	0.700	0.333	0.397
289	8	21/05/2011	0.181	0.800	0.333	0.464
290	5	23/05/2011	0.016	0.500	0.267	0.292
291	7	23/05/2011	0.160	0.700	0.267	0.396
292	8	25/05/2011	0.132	0.800	0.200	0.398
293	6	26/05/2011	0.231	0.600	0.167	0.336
294	6	29/05/2011	0.218	0.600	0.067	0.292
295	3	30/05/2011	0.039	0.300	0.033	0.130
296	8	30/05/2011	0.093	0.800	0.033	0.320
297	10	30/05/2011	0.133	1.000	0.033	0.401
298	8	31/05/2011	0.020	0.800	0.000	0.290
299	8	31/05/2011	0.165	0.800	0.000	0.323
300	9	01/06/2011	0.110	0.900	1.000	0.758
301	3	02/06/2011	0.011	0.300	0.966	0.507
302	7	02/06/2011	0.058	0.700	0.966	0.660
303	6	02/06/2011	0.040	0.600	0.966	0.621
304	6	02/06/2011	0.026	0.600	0.966	0.618
305	5	04/06/2011	0.046	0.500	0.897	0.558
306	5	07/06/2011	0.081	0.500	0.793	0.524
307	5	07/06/2011	0.125	0.500	0.793	0.534
308	7	08/06/2011	0.124	0.700	0.759	0.591
309	8	08/06/2011	0.027	0.800	0.759	0.604
310	5	09/06/2011	0.040	0.500	0.724	0.486
311	2	09/06/2011	0.013	0.200	0.724	0.373
312	8	09/06/2011	0.035	0.800	0.724	0.591
313	10	10/06/2011	0.314	1.000	0.690	0.713
314	3	10/06/2011	0.044	0.300	0.690	0.401
315	10	13/06/2011	1.000	1.000	0.586	0.830
316	10	14/06/2011	0.186	1.000	0.552	0.627
317	7	14/06/2011	0.025	0.700	0.552	0.482
318	5	14/06/2011	0.111	0.500	0.552	0.431

PEDIDO	IMPOR-TANCIA	FECHA DE ENTREGA	CALIF. TRÚPUT	CALIF. IMPOR-TANCIA	CALIF. CUMPLI-MIENTO	CALIF. AHP
582	10	02/11/2010	0.349	1.000	1.000	0.849
583	8	03/11/2010	0.128	0.800	0.964	0.712
584	7	03/11/2010	0.075	0.700	0.964	0.664
585	6	05/11/2010	0.035	0.600	0.893	0.590
586	6	06/11/2010	0.140	0.600	0.857	0.599
587	10	07/11/2010	0.171	1.000	0.821	0.734
588	5	08/11/2010	0.056	0.500	0.786	0.515
589	9	10/11/2010	0.165	0.900	0.714	0.653
590	8	10/11/2010	0.181	0.800	0.714	0.621
591	9	10/11/2010	0.129	0.900	0.714	0.645
592	6	11/11/2010	0.047	0.600	0.679	0.504
593	8	12/11/2010	0.078	0.800	0.643	0.568
594	5	12/11/2010	0.156	0.500	0.643	0.479
595	5	15/11/2010	0.021	0.500	0.536	0.404
596	10	16/11/2010	0.159	1.000	0.500	0.599
597	6	17/11/2010	0.031	0.600	0.464	0.412
598	10	18/11/2010	0.269	1.000	0.429	0.595
599	9	18/11/2010	0.114	0.900	0.429	0.524
600	2	18/11/2010	0.098	0.200	0.429	0.271
601	2	20/11/2010	0.204	0.200	0.357	0.266
602	3	20/11/2010	0.213	0.300	0.357	0.303
603	7	21/11/2010	0.060	0.700	0.321	0.396
604	4	24/11/2010	0.224	0.400	0.214	0.283
605	8	24/11/2010	0.122	0.800	0.214	0.401
606	7	25/11/2010	0.119	0.700	0.179	0.350
607	7	26/11/2010	0.050	0.700	0.143	0.320
608	4	27/11/2010	0.127	0.400	0.107	0.216
609	7	27/11/2010	0.166	0.700	0.107	0.332
610	10	28/11/2010	1.000	1.000	0.071	0.617
611	6	28/11/2010	0.215	0.600	0.071	0.293
612	6	29/11/2010	0.177	0.600	0.036	0.269
613	9	30/11/2010	0.034	0.900	0.000	0.328
614	9	30/11/2010	0.074	0.900	0.000	0.338
615	10	30/11/2010	0.060	1.000	0.000	0.370
616	8	30/11/2010	0.034	0.800	0.000	0.293
617	10	30/11/2010	0.166	1.000	0.000	0.395
618	10	30/11/2010	0.095	1.000	0.000	0.378
619	6	30/11/2010	0.030	0.600	0.000	0.221
620	9	30/11/2010	0.068	0.900	0.000	0.336
621	10	30/11/2010	0.198	1.000	0.000	0.402
622	10	30/11/2010	0.108	1.000	0.000	0.381
623	7	30/11/2010	0.014	0.700	0.000	0.253
624	5	30/11/2010	0.026	0.500	0.000	0.184
625	5	30/11/2010	0.060	0.500	0.000	0.192
626	7	30/11/2010	0.178	0.700	0.000	0.291
627	6	30/11/2010	0.232	0.600	0.000	0.268
628	5	30/11/2010	0.147	0.500	0.000	0.212
629	1	30/11/2010	0.204	0.100	0.000	0.083
630	5	01/12/2010	0.127	0.500	1.000	0.619
631	10	09/12/2010	0.565	1.000	0.733	0.789
632	8	10/12/2010	0.522	0.800	0.700	0.694
633	9	10/12/2010	0.546	0.900	0.700	0.736
634	4	10/12/2010	0.484	0.400	0.700	0.543
635	6	12/12/2010	0.062	0.600	0.633	0.489

13.3 ANEXO 3: CÓDIGO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

```
********************************************************************************
*                    Formatted Listing of Model:                    *
* D:\Documentos\Dropbox\Universidad\Maestría\Tesis\Modelo\Versiones modelo\mts-mtos
nov 21 dts.MOD *
********************************************************************************
 Time Units:                    Minutes
 Distance Units:                Meters
********************************************************************************
*                         Locations                          *
********************************************************************************
 Name           Cap Units Stats      Rules                 Cost
 -------------- --- ----- ---------- ----------------------- ------------
 Corte          1   3     Time Series Min(AtPriorFEP), , First
 Corte.1        1   1     Time Series Min(AtPriorFEP), ,
 Corte.2        1   1     Time Series Min(AtPriorFEP), ,
 Corte.3        1   1     Time Series Min(AtPriorFEP), ,
 AlmCorte       inf 3     Time Series Oldest, , First
 AlmCorte.1     inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmCorte.2     inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmCorte.3     inf 1     Time Series Oldest, ,
 Estampado      1   3     Time Series Oldest, , First
 Estampado.1    1   1     Time Series Oldest, ,
 Estampado.2    1   1     Time Series Oldest, ,
 Estampado.3    1   1     Time Series Oldest, ,
 AlmEstampado   inf 3     Time Series Oldest, , First
 AlmEstampado.1 inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmEstampado.2 inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmEstampado.3 inf 1     Time Series Oldest, ,
 Laminacion     1   5     Time Series Oldest, , First
 Laminacion.1   1   1     Time Series Oldest, ,
 Laminacion.2   1   1     Time Series Oldest, ,
 Laminacion.3   1   1     Time Series Oldest, ,
 Laminacion.4   1   1     Time Series Oldest, ,
 Laminacion.5   1   1     Time Series Oldest, ,
 AlmLaminacion  inf 5     Time Series Oldest, , First
 AlmLaminacion.1 inf 1    Time Series Oldest, ,
 AlmLaminacion.2 inf 1    Time Series Oldest, ,
 AlmLaminacion.3 inf 1    Time Series Oldest, ,
 AlmLaminacion.4 inf 1    Time Series Oldest, ,
 AlmLaminacion.5 inf 1    Time Series Oldest, ,
 Perimetro      1   3     Time Series Oldest, , First
 Perimetro.1    1   1     Time Series Oldest, ,
 Perimetro.2    1   1     Time Series Oldest, ,
 Perimetro.3    1   1     Time Series Oldest, ,
 AlmPerimetro   inf 3     Time Series Oldest, , First
 AlmPerimetro.1 inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmPerimetro.2 inf 1     Time Series Oldest, ,
 AlmPerimetro.3 inf 1     Time Series Oldest, ,
 Punzonado      1   2     Time Series Oldest, , First
```

Punzonado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Punzonado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmPunzonado inf 2 Time Series Oldest, , First
AlmPunzonado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmPunzonado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
Temple 1 5 Time Series Oldest, , First
Temple.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Temple.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Temple.3 1 1 Time Series Oldest, ,
Temple.4 1 1 Time Series Oldest, ,
Temple.5 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmTemple inf 5 Time Series Oldest, , First
AlmTemple.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmTemple.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmTemple.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmTemple.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmTemple.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
Revenido 1 3 Time Series Oldest, FIFO, First
Revenido.1 1 1 Time Series Oldest, FIFO,
Revenido.2 1 1 Time Series Oldest, FIFO,
Revenido.3 1 1 Time Series Oldest, FIFO,
AlmRevenido inf 3 Time Series Oldest, , First
AlmRevenido.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmRevenido.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmRevenido.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
Lijado 1 13 Time Series Oldest, , First
Lijado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.3 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.4 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.5 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.6 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.7 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.8 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.9 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.10 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.11 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.12 1 1 Time Series Oldest, ,
Lijado.13 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado inf 13 Time Series Oldest, , First
AlmLijado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.6 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.7 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.8 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.9 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.10 inf 1 Time Series Oldest, ,

AlmLijado.11 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.12 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmLijado.13 inf 1 Time Series Oldest, ,
Autopull 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmAutopull inf 1 Time Series Oldest, ,
PulidoFino 1 3 Time Series Oldest, , First
PulidoFino.1 1 1 Time Series Oldest, ,
PulidoFino.2 1 1 Time Series Oldest, ,
PulidoFino.3 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmPulidoFino inf 3 Time Series Oldest, , First
AlmPulidoFino.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmPulidoFino.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmPulidoFino.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
Brillo 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmBrillo inf 1 Time Series Oldest, ,
Niquelacion 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmNiquelacion inf 1 Time Series Oldest, ,
Biselado 1 13 Time Series Oldest, , First
Biselado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.3 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.4 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.5 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.6 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.7 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.8 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.9 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.10 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.11 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.12 1 1 Time Series Oldest, ,
Biselado.13 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado inf 13 Time Series Oldest, , First
AlmBiselado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.6 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.7 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.8 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.9 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.10 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.11 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.12 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmBiselado.13 inf 1 Time Series Oldest, ,
Enderezado 1 6 Time Series Oldest, , First
Enderezado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Enderezado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Enderezado.3 1 1 Time Series Oldest, ,
Enderezado.4 1 1 Time Series Oldest, ,

Enderezado.5 1 1 Time Series Oldest, ,
Enderezado.6 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado inf 6 Time Series Oldest, , First
AlmEnderezado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEnderezado.6 inf 1 Time Series Oldest, ,
Lacado 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmLacado inf 1 Time Series Oldest, ,
Etiquetado 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmEtiquetado inf 1 Time Series Oldest, ,
InyDirecta 1 5 Time Series Oldest, , First
InyDirecta.1 1 1 Time Series Oldest, ,
InyDirecta.2 1 1 Time Series Oldest, ,
InyDirecta.3 1 1 Time Series Oldest, ,
InyDirecta.4 1 1 Time Series Oldest, ,
InyDirecta.5 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmInyDirecta inf 5 Time Series Oldest, , First
AlmInyDirecta.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmInyDirecta.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmInyDirecta.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmInyDirecta.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmInyDirecta.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
Sellado 1 3 Time Series Oldest, , First
Sellado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Sellado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Sellado.3 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmSellado inf 3 Time Series Oldest, , First
AlmSellado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmSellado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmSellado.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
Encachado 1 9 Time Series Oldest, , First
Encachado.1 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.2 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.3 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.4 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.5 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.6 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.7 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.8 1 1 Time Series Oldest, ,
Encachado.9 1 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado inf 9 Time Series Oldest, , First
AlmEncachado.1 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.2 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.3 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.4 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.5 inf 1 Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.6 inf 1 Time Series Oldest, ,

```
AlmEncachado.7  inf 1    Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.8  inf 1    Time Series Oldest, ,
AlmEncachado.9  inf 1    Time Series Oldest, ,
EncMadera       1  3     Time Series Oldest, , First
EncMadera.1     1  1     Time Series Oldest, ,
EncMadera.2     1  1     Time Series Oldest, ,
EncMadera.3     1  1     Time Series Oldest, ,
AlmEncMadera    inf 3    Time Series Oldest, , First
AlmEncMadera.1  inf 1    Time Series Oldest, ,
AlmEncMadera.2  inf 1    Time Series Oldest, ,
AlmEncMadera.3  inf 1    Time Series Oldest, ,
ControlFinal    1  1     Time Series Oldest, ,
AlmControlFinal inf 1    Time Series Oldest, ,
Empaque         1  1     Time Series Oldest, ,
AlmEmpaque      inf 1    Time Series Oldest, ,
Ordenes         inf 1    Time Series Oldest, ,
*********************************************************************
*                  Clock downtimes for Locations                    *
*********************************************************************
Loc         Frequency            First Time  Priority  Scheduled Disable Logic
----------- -------------------- ----------- ----------- --------- ------- -----------------
Corte.1     L(0., 1.59, 1.22) day          99         No       No     wait l(0., 0.532, 0.697) h
Corte.2     l(0., 1.59, 1.22) day          99         No       No     wait L(0., 0.532, 0.697) h
Corte.3     L(0., 1.59, 1.22) day          99         No       No     wait L(0., 0.532, 0.697)
Laminacion.1 L(0., 1.62, 1.41) day         99         No       No     wait L(0., 0.539, 0.58
Laminacion.2 L(0., 1.62, 1.41) day         99         No       No     wait L(0., 0.539, 0.58
Laminacion.3 L(0., 1.62, 1.41) day         99         No       No     wait L(0., 0.539, 0.58
Laminacion.4 L(0., 1.62, 1.41) day         99         No       No     wait L(0., 0.539, 0.58
Laminacion.5 L(0., 1.62, 1.41) day         99         No       No     wait L(0., 0.539, 0.58
Perimetro.1  L(1., 2.77, 1.59) day         99         No       No     wait U(1., 6.) hr
Perimetro.2  L(1., 2.77, 1.59) day         99         No       No     wait U(1., 6.) hr
Perimetro.3  L(1., 2.77, 1.59) day         99         No       No     wait U(1., 6.) hr
Punzonado.1  E(0., 15.1) day               99         No       No     wait L(0., 0.368, 0.593
Punzonado.2  L(0., 1.68, 1.44) day         99         No       No     wait L(0., 0.421, 0.47
Temple.1     L(1., 2.74, 1.21) day         99         No       No     wait L(0., 0.336, 0.584
Temple.2     L(1., 2.74, 1.21) day         99         No       No     L(0., 0.336, 0.584) hr
Temple.3     L(1., 2.74, 1.21) day         99         No       No     wait L(0., 0.336, 0.584
Temple.4     L(0., 1.91, 1.21) day         99         No       No     wait L(0., 0.31, 0.391)
Temple.5     L(0., 1.91, 1.21) day         99         No       No     wait L(0., 0.31, 0.391)
Lijado       l(0., 2.34, 1.16) day         99         No       No     wait L(0., 0.784, 0.521) h
Lijado.1     L(0., 2.34, 1.16) day         99         No       No     wait L(0., 0.784, 0.521) l
Lijado.2     l(0., 2.34, 1.16) day         99         No       No     wait l(0., 0.784, 0.521) h
Lijado.3     E(0., 25.8) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.4     e(0., 25.8) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.5     E(0., 25.8) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.6     E(1., 21.5) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.7     E(1., 21.5) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.8     E(1., 21.5) day               99         No       No     wait U(1., 2.5) hr
Lijado.9     L(2., 2.35, 1.32)day          99         No       No     wait L(0., 0.56, 0.563) h          86
Lijado.10    L(2., 2.35, 1.32) day         99         No       No     wait L(0., 0.56, 0.563) h
```

```
 Lijado.11    E(0., 24.6) day              99        No      No     wait L(1., 0.103, 0.858) hı
 Lijado.12    E(0., 24.6) day              99        No      No     wait L(1., 0.103, 0.858) hı
 Lijado.13    E(0., 24.6) day              99        No      No     wait L(1., 0.103, 0.858) hı
 Autopull     L(0., 2.08, 1.41) day          99        No      No     wait E(1., 1.23) hr
 PulidoFino.1 L(0., 1.86, 0.961) day          99        No      No     wait L(0., 0.797, 0.54
 PulidoFino.2 L(0., 1.94, 0.871) day          99        No      No     wait E(1., 1.9) hr
 PulidoFino.3 E(0., 8.13) day                99        No      No     wait L(0., 0.804, 0.53) h
 InyDirecta.1 E(0., 11.) day                 99        No      No     wait L(0., 0.507, 0.466) h
 InyDirecta.2 E(0., 11.) day                 99        No      No     wait L(0., 0.507, 0.466) h
 InyDirecta.3 E(0., 11.) day                 99        No      No     wait L(0., 0.507, 0.466) h
 InyDirecta.4 E(0., 11.) day                 99        No      No     wait L(0., 0.507, 0.466) h
 InyDirecta.5 E(0., 11.) day                 99        No      No     wait L(0., 0.507, 0.466) h
 Encachado                                    No      No
*******************************************************************
*                    Entities                    *
*******************************************************************
 Name      Speed (mpm)  Stats      Cost
 ---------- ------------ ----------- ------------
 Producto   50         Time Series
*******************************************************************
*                    Processing                    *
*******************************************************************
                    Process                  Routing
 Entity   Location      Operation         Blk  Output   Destination    Rule    Move Logic
 -------- --------------- ------------------   ---- -------- --------------- -------  ------------
 Producto Ordenes        reset seguimiento
                              1    Producto AlmCorte       FIRST 1
 Producto AlmCorte                    1    Producto Corte         FIRST 1
 Producto Corte          wait EntLoc()
                 if AtTerminado=1 then route 1
                 if AtTerminado=2 then route 2
                 if AtTerminado=3 then route 1

                 write seguimiento,clock()
                 write seguimiento,location()
                 write seguimiento,AtOrden
                 write seguimiento,AtTerminado
                 writeline seguimiento,AtEnsamble
                              1    Producto AlmEstampado    FIRST 1
                              2    Producto AlmLaminacion   FIRST 1
 Producto AlmEstampado                  1    Producto Estampado      FIRST 1
 Producto Estampado      wait EntLoc()
                 if AtTerminado=1 then route 1
                 if AtTerminado=2 then route 2
                 if AtTerminado=3 then route 1

                 vTerminadoEstampado=AtTerminado

                 vOrdenEstampado=AtOrden
```

```
            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmLaminacion   FIRST 1
                        2   Producto AlmBiselado    FIRST 1
Producto AlmLaminacion              1   Producto Laminacion     FIRST 1
Producto Laminacion     wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmPerimetro   FIRST 1
Producto AlmPerimetro               1   Producto Perimetro      FIRST 1
Producto Perimetro      wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmPunzonado   FIRST 1
Producto AlmPunzonado               1   Producto Punzonado      FIRST 1
Producto Punzonado      wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmTemple      FIRST 1
Producto AlmTemple                  1   Producto Temple         FIRST 1
Producto Temple         wait EntLoc()
            vTerminadoTemple=AtTerminado

            vOrdenTemple=AtOrden

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmRevenido    FIRST 1
Producto AlmRevenido                1   Producto Revenido       FIRST 1
Producto Revenido       if AtTerminado=1 then route 1
            if AtTerminado=2 then route 1                                   88
            if AtTerminado=3 then route 2
```

```
            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmLijado      FIRST 1
                        2   Producto AlmBiselado    FIRST 1
Producto AlmLijado              1   Producto Lijado       FIRST 1
Producto Lijado       wait EntLoc()
            if AtTerminado=1 then route 1
            if AtTerminado=2 then route 2
            if AtTerminado=3 then route 1
            vTerminadoLijado=AtTerminado

            vOrdenLijado=AtOrden

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmBiselado    FIRST 1
                        2   Producto AlmAutopull    FIRST 1
Producto AlmAutopull            1   Producto Autopull      FIRST 1
Producto Autopull      wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmPulidoFino   FIRST 1
Producto AlmPulidoFino          1   Producto PulidoFino     FIRST 1
Producto PulidoFino     wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                        1   Producto AlmBrillo      FIRST 1
Producto AlmBrillo              1   Producto Brillo       FIRST 1
Producto Brillo       wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
```

```
                    1   Producto AlmEstampado   FIRST 1
Producto AlmBiselado            1   Producto Biselado     FIRST 1
Producto Biselado     wait EntLoc()
            if AtTerminado=1 then route 1
            if AtTerminado=2 then route 2
            if AtTerminado=3 then route 1

            vTerminadoBiselado=AtTerminado
            vOrdenBiselado=AtOrden

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                    1   Producto AlmEnderezado   FIRST 1
                    2   Producto AlmNiquelacion  FIRST 1
Producto AlmNiquelacion             1   Producto Niquelacion    FIRST 1
Producto Niquelacion    wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                    1   Producto AlmEnderezado   FIRST 1
Producto AlmEnderezado              1   Producto Enderezado     FIRST 1
Producto Enderezado     wait EntLoc()

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                    1   Producto AlmLacado      FIRST 1
Producto AlmLacado              1   Producto AlmEtiquetado   FIRST 1
Producto AlmEtiquetado              1   Producto Etiquetado     FIRST 1
Producto Etiquetado     wait EntLoc()
            if AtEnsamble=1 then route 1
            if AtEnsamble=2 then route 2
            if AtEnsamble=3 then route 3

            #write seguimiento,clock()
            #write seguimiento,location()
            #write seguimiento,AtOrden
            #write seguimiento,AtTerminado
            #writeline seguimiento,AtEnsamble
                    1   Producto AlmSellado     FIRST 1
                    2   Producto AlmInyDirecta   FIRST 1
                    3   Producto AlmEncMadera    FIRST 1
```

```
Producto AlmSellado                1   Producto Sellado       FIRST 1
Producto Sellado       wait EntLoc()

                #write seguimiento,clock()
                #write seguimiento,location()
                #write seguimiento,AtOrden
                #write seguimiento,AtTerminado
                #writeline seguimiento,AtEnsamble
                                1   Producto AlmEncachado   FIRST 1
Producto AlmEncachado              1   Producto Encachado      FIRST 1
Producto AlmInyDirecta             1   Producto InyDirecta     FIRST 1
Producto AlmEncMadera              1   Producto EncMadera      FIRST 1
Producto Encachado      wait EntLoc()

                #write seguimiento,clock()
                #write seguimiento,location()
                #write seguimiento,AtOrden
                #write seguimiento,AtTerminado
                #writeline seguimiento,AtEnsamble
                                1   Producto AlmControlFinal FIRST 1
Producto InyDirecta     wait EntLoc()

                #write seguimiento,clock()
                #write seguimiento,location()
                #write seguimiento,AtOrden
                #write seguimiento,AtTerminado
                #writeline seguimiento,AtEnsamble
                                1   Producto AlmControlFinal FIRST 1
Producto EncMadera      wait EntLoc()

                #write seguimiento,clock()
                #write seguimiento,location()
                #write seguimiento,AtOrden
                #write seguimiento,AtTerminado
                #writeline seguimiento,AtEnsamble
                                1   Producto AlmControlFinal FIRST 1
Producto AlmControlFinal           1   Producto ControlFinal   FIRST 1
Producto ControlFinal   wait EntLoc()

                #write seguimiento,clock()
                #write seguimiento,location()
                #write seguimiento,AtOrden
                #write seguimiento,AtTerminado
                #writeline seguimiento,AtEnsamble
                                1   Producto AlmEmpaque     FIRST 1
Producto AlmEmpaque                1   Producto Empaque        FIRST 1
Producto Empaque       wait EntLoc()

                write resultados, "FEP"                                                 91
                write resultados,clock()
```

```
                write resultados,location()
                write resultados,AtOrden
                writeline resultados,AtMes
                        1    Producto EXIT          FIRST 1
*******************************************************************
*                    Attributes                    *
*******************************************************************
 ID        Type        Classification
 ----------- ------------ --------------
 AtOrden     Integer      Entity
 AtTerminado Integer      Entity
 AtEnsamble  Integer      Entity
 AtPriorAHP  Integer      Entity
 AtPedido    Integer      Entity
 AtPriorTRUP Integer      Entity
 AtPriorFEP  Integer      Entity
 AtPriorTCP  Integer      Entity
 AtMes       Integer      Entity
*******************************************************************
*                  Variables (global)                  *
*******************************************************************
 ID              Type        Initial value Stats
 ------------------ ------------ ------------- -----------
 vTerminadoEstampado Integer      0           Time Series
 vTerminadoTemple    Integer      0           Time Series
 vTerminadoLijado    Integer      0           Time Series
 vTerminadoBiselado  Integer      0           Time Series
 vOrdenEstampado     Integer      0           Time Series
 vOrdenTemple        Integer      0           Time Series
 vOrdenLijado        Integer      0           Time Series
 vOrdenBiselado      Integer      0           Time Series
*******************************************************************
*                    External Files                    *
*******************************************************************
 ID        Type            File Name                                    Prompt
 ----------- ---------------- ---------------------------------------------------------------------------
 Arribos     Arrival          D:\Dropbox\Universidad\Maestría\Tesis\Modelo\Versiones
modelo\arribo octubre.xlsx
 EntLoc      Entity Location   D:\Dropbox\Universidad\Maestría\Tesis\Modelo\Versiones
modelo\tiempos locaciones.xls
 Seguimiento General Write     D:\Dropbox\Universidad\Maestría\Tesis\Modelo\Versiones
modelo\SEGUIMIENTO.txt
 Resultados  General Write     D:\Dropbox\Universidad\Maestría\Tesis\Modelo\Versiones
modelo\resultados.xls
```

13.4 ANEXO 4: PARTICIPACIÓN EN CONFERENCIA

Conferencia: IIE Annual Conference & Expo 2012.
www.iienet.org/annualconference.
Organizador: Institute of Industrial Engineers
Lugar: Orlando, Florida, EU
Fecha: Mayo 19-23 de 2012
Track: Investigación de Operaciones

TITLE:
Multi-Criteria Dispatching Rule For A Combined Make-To-Stock/Make-To-Order Environment

DESCRIPTION:

This presentation shows a case of the scheduling of a production facility which produces both make-to-stock (MTS) and make-to-order (MTO) products. In a literature review, scheduling methods used on combined MTS/MTO environments are explored. Using the Group Analytic Hierarchy Process Ordering (GAHPO), a multi-criteria dispatching rule is proposed and applied on a metal-mechanic industry located in Colombia. Through Discrete Event Simulation (DES), the performance of the proposed rule and other single-criteria dispatching rules is compared.

ABSTRACT:

This study, as part of a Master of Industrial Engineering Thesis, deals with the scheduling of a production facility which produces both make-to-stock (MTS) and make-to-order (MTO) products. Hybrid MTS/MTO environment has recently attracted industrial and academic interest in order to meet requirements of today's competitive market. On the particular case study, this environment offers the advantage of allowing capacity leveling when demand varies, but generates difficulties because it targets several objectives. With multiple responses of interest, the scheduling process of a hybrid MTS/MTO environment needs to consider multiple criteria.

The study is divided on three stages:

- A deep literature review is done, exploring combined MTS/MTO cases and multiple criteria scheduling methods.
- Using the Group Analytic Hierarchy Process Ordering (GAHPO), a multi-criteria dispatching rule is proposed and applied on a metal-mechanic industry located in Manizales, Colombia.
- Through a Discrete Event Simulation (DES) model, the performance of the responses of interest selected of the proposed rule and other single-criteria dispatching rules is compared.

OBJECTIVES:

1. Present a literature overview of combined MTS/MTO environments and scheduling methods for multiple responses of interest.
2. Show a real case application of a custom made multi-criteria dispatching rule which targets multiple objectives.
3. Present the use of the Group Analytic Hierarchy Process Ordering (GAHPO) for a multi-criteria group decision.
4. Illustrate the application of Discrete Event Simulation (DES) for validating different scheduling methods.

BIOGRAPHY

Currently and for the past 4 years, PAMELA ESCOBAR has been working at INCOLMA, an agricultural tools producer and distributor, known in the market as the world's biggest machete manufacturer, located in Manizales, in the heart of the coffee region of Colombia. Pamela has been heading the continuous improvement unit, which includes lean initiatives, process improvement and operations flow management. Previously, she has had process improvement involvement in several industries of the region, such as Hada, Super de Alimentos, Luker and Madeco.

Pamela holds a Bachelor Honors Degree in Industrial Engineering, postgraduate degree in Production and Operations Management and a Master degree in Industrial Engineering from Universidad Nacional de Colombia. She is a certified Six Sigma Green Belt and Lean Six Sigma Green Belt through the Institute of Industrial Engineering (IIE) Training Center.