01190

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Planeación de la Producción Jerárquica empleando Técnicas de Descomposición

TESIS DOCTORAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERIA

Presenta.
Federico González Santoyo

Director de Tesis.
Dr. José Jesús Acosta Flores

Ciudad Universitaria
1995

A la memoria de dos de mis seres más queridos quienes fueron un gran apoyo fraternal en todo momento de mi vida y los cuales me motivaron siempre para el término de estos estudios.

Prof. José Fortino González Santoyo (qepd).

Sr. Mucio Santoyo Santillan (qepd).

AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer patente mi agradecimiento al Dr. José Jesús Acosta Flores, por el apoyo en mi formación académica y direcciones de tesis, apoyo invaluable durante más de una década.

Al Dr. Sergio Fuentes Maya, por inducirme a estar siempre en el primer cuadrante y por el gran a poyo recibido en el desarrollo de mis estudios.

Al Dr. Miguel Angel Gutiérrez Andrade por las grandes enseñanzas recicibidas en los temas centrales de este trabajo, así como por el estimulo personal dado que en mucho aprecio.

A los Doctores. Felipe Lara Rosano, Felipe Ochoa Rosso, Aron Jazcilevich Diamant, Alejandro Mendoza Fernández, por sus valiosos consejos y sugerenci en el desarrollo del presente trabajo.

Al Mtro. Luis Matías Pérez, del IIE por su apoyo en el área de cómputo.

Deseo agradecer a mis compañeros la amistad brindada durante el desarrollo de mis estudios.

A mis amados padres quienes con su ejemplo me han alentado siempre para seguir adelante por el camino de la superación

A mi familia la Cand a Dr Dolores del C. Huacuz Elias, Jessica Berenice y Erika del Carmen por el apoyo brindado y por el saber disculpar el tiempo no compartido que les pertenecía.

El presente trabajo se desarrollo con el apoyo.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT.
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM.
Programa PADEP-UNAM

RESUMEN

En las últimas décadas, se han presentado una gran cantidad de problemas de optimización combinatoria de gran escala, que requieren ser abordados con técnicas generales que consideren explícitamente el gran número de variables de decisión involucradas. Las aplicaciones van desde la planeación de sistemas eléctricos de potencia, localización de nuevas industrias, determinación de recorridos óptimos en la distribución de productos en el mercado, análisis de sistemas económicos, entre otros. Dichos problemas presentan una gran complejidad en la obtención de soluciones óptimas o cercanas a la solución óptima.

Hoy día el reto para varias disciplinas es proponer técnicas eficientes de solución que garanticen buenas soluciones, además de que sean rápidas y fáciles de implantar.

El propósito del presente trabajo es presentar un algoritmo eficiente para solucionar el problema de Planeación de la Producción Jerárquica. Se hace una extensión a la teoría existente al respecto obteniéndose un algoritmo heurístico para la determinación de soluciones factibles en un problema dinámico de planeación de la producción para el caso multiproducto. El mismo, es modelado como un problema de Programación Lineal Entera Mixta, usando como referencia la estructura general de las Técnicas de Descomposición de Benders.

Es aplicado por primera vez en el sector industrial forestal (aserrío), proporcionando una marcada superioridad con respecto a los resultados publicados en la literatura especializada referente a la eficiencia computacional, así como una mayor información en los planes de producción-costo obtenidos.

El algoritmo permite un ahorro aproximado del 70 % respecto a la operación clásica de esta industria. Le permite al empresario tener un alto nivel de eficiencia de respuesta con un costo de operación inferior, lo cual le garantiza permanencia a la industria en el mercado.

ABSTRACT

A lot of problems about combinatorial optimization of big scale have appeared in last decades. These problems need to be studied using general techniques which consider the great amount of variables of desicion involved. The aplications may vary from planning of electrical power systems, localizations of new industries, setting better journeis of products distribution in the market and analysis of economical systems, among others. such problems have a big difficulty in looking for the best solution.

Nowadays, the challenge for several doctrines is to propose efficient techniques that guarantee right solutions. Morever these techniques must be quick and easy to set.

The purpose of this work is to show an efficient algorithm to solve the problem of planning the Hierarchical Production. This way a heuristic algorithm is obtained through the extension of the existent theory. This heuristic algorithm determines the feasible solutions in a dynamic problem in setting the production in case of multiproduct. The heuristic algorithm also is moulded as a problem of lineal, whole or mixed programation, using as reference the general structure of Benders Descomposition Techniques.

At first, the heuristic algorithm was applied in forestry. This gave a great superiority in regarding the results published by specialized literature about computable efficiency, as well as bigger informaton about cost-production plans obtained.

The algorithm allows saving aproximately 70 % according with the classical operation of this industry. It allows employer to have a higher level of efficiency and a lower cost of operation, which guarantees the permanence of the industry in the market.

CONTENIDO

INTRODUCCION

El uso de la optimizacion en la solución de problemas combinatorios es cada dia más aceptado, debido a la alta eficiencia que proporciona en el caso de problemas de mediana y gran escala, en los que se pueden obtener una gran cantidad de arreglos ordenados diferentes, permitiendo con esto una gran cantidad de posibilidades, como se tiene en los problemas de Ingenieria Financiera, Sistemas de Manufactura, manejo de inventarios, localización de nuevas industrias, optimizacion de carteras de inversion, definicion de rutas óptimas en la distribucion de productos y planeación de sistemas eléctricos de potencia.

Gutierrez Andrade M.A. (1991) cita, que uno de los problemas de optimización combinatoria es el hecho que son muy fáciles de entender y enunciar, pero generalmente son difíciles de resolver. Podría pensarse que la solución de un problema de optimización combinatoria se restringe únicamente a buscar de manera exhaustiva el valor máximo o minimo en un conjunto finito de posibilidades y que usando una computadora veloz, el problema carecería de interes matemático, sin pensar por un momento, en el tamaño del conjunto.

El proposito de este trabajo es presentar un algoritmo general para la solución del problema de optimizacion combinatoria denominado *Planeación de la Producción Jerárquica*. En este trabajo se presenta el estado del arte alrededor de la planeacion de la produccion jerarquica, se proporcionan aplicaciones relacionadas con la industria en general y se presenta la aplicación en el sector industrial forestal (aserrio). Las aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Revision del estado del arte sobre las técnicas más eficientes usadas en la planeacion de la producción jerárquica, que reportan los mejores resultados, en la solución de este problema.

- Se desarrolla un algoritmo heuristico para la realización de planeación de la produccion jerárquica de problemas medianos y de gran escala.

- Se da solución a un problema real de gran escala en la planeacion de la produccion jerárquica, en el sector industrial forestal primario (aserrio), por medio del algoritmo propuesto. Casos como el presente no se encuentran publicados en la literatura actual especializada.

- Se presenta eficiencia computacional para 10 diferentes planes de producción de problemas de planeación de la produccion en el campo industrial forestal (aserrio), haciendo un análisis comparativo con problemas equivalentes citados en la literatura. Mostrando mas eficiencia en la solución que los citados.

- Presentación de metodología usada en la solución de problemas de planeación de la producción jerárquica en el sector forestal.

En este trabajo se presenta la teoría de la planeación de la producción jerárquica. Es propuesta originalmente por Bitran y Hax (1977), en la que se hace una desagregación del problema original en dos subproblemas: uno lineal y el otro entero, con manejo de información a nivel de artículos. Estos a su vez agregados en familias y éstas en tipos.

Para el logro de lo anterior el presente trabajo fue dividido en cinco apartados, los cuales en síntesis cumplen con el objetivo general del mismo.

El trabajo se desarrolla de la siguiente manera: En el capitulo 1. Antecedentes Teóricos, se define el sistema de producción, concepto de producción, el enfoque usado para el modelado de este trabajo, los enfoques de planeación agregada, regla de decisión lineal, programacion de metas, regla de búsqueda de decisiones, producción intermitente heuristica, aproximacion por simulación, los sistemas de manufactura celulares y los sistemas flexibles de manufactura.

Finalmente en este capítulo se describe el antecedente de la planeación de la producción jerárquica. Lo anterior es tomado como antecedente teórico para abordar el problema de interes. En el capitulo 2.- Técnicas de Solución, se presentan las generalidades referentes a las técnicas de descomposición, se describen las técnicas de descomposicion de Benders usadas en la solución de problemas de programación lineal entera mixta, tecnicas de Dantzig-Wolfe.
Finalmente se describe la técnica de descomposicion cruzada; las técnicas anteriores son elementos clave para abordar el problema de interés.

Para el caso particular de la presente tesis, se usaron las técnicas de descomposición de Benders como elemento base en el modelado. En el capitulo 3.-El Problema de Planeación Jerárquica, se presenta la estructura de agregacion de artículos en familias y tipos, así como el modelado general del problema de interes como uno de Programación Lineal Entera Mixta **PLEM**. Se trata tambén el modelado del problema de la planeación de la producción. Y el desarrollo teorico de la solución presentando la descripción del algoritmo referente al problema tratado

En el capitulo 4.- El Problema de la Planeación de la Producción de la Industria Forestal maderable (aserrío), se describe la problemática del sector forestal en México, la distribución de la industria forestal, una atención especial a la industria del aserrío, una panóramica de la producción - consumo de la madera aserrada, se analiza el sector industrial forestal michoacano, se describe el proceso de aserrío, se modela el problema de planeación de la producción en este sector industrial, se muestran los planes de producción obtenidos, así como los resultados y se presenta la eficiencia computacional en la solución del problema en el que se destacan los resultados del algoritmo propuesto, los cuales son más eficientes que los publicados en la literatura actual. En el capitulo 5.- Conclusiones, se presentan los alcances, limitaciones y resultados relevantes del trabajo, así como posibles líneas de investigacion. En la Bibliografía, se proporciona un listado de la literatura usada en el presente trabajo. En los Anexos, se presentan una tabla donde se tiene la estructura usada en el modelado, los diagramas de flujo de la tecnica clasica de descomposición de Benders, así como de la propuesta, los diagramas de flujo del proceso de aserrío, una vista en planta del proceso analizado, y los programas de cómputo.

CAPITULO 1

1. ANTECEDENTES TEORICOS

1.1. INTRODUCCION

La empresa mexicana se encuentra inmersa en una competencia de alcance mundial ante el Tratado de Libre Comercio (E.U., Canada, México), y le será muy difícil permanecer en el mercado con la distribución de sus productos si no se moderniza y presenta una infraestructura competente, tanto en recursos materiales y humanos, como en sistemas de control que le permitan una operación más eficiente y acorde a la realidad. Ante las circunstancias, la *Planeación y Calendarización de la Producción* de bienes es un concepto fundamental para todas las empresas, ya que son recursos que le permiten alcanzar niveles mas altos que los estandarizados desde el punto de vista técnico y económico; además que podra satisfacer las necesidades del mercado en el que desarrolla sus transacciones comerciales de venta de producto.

Es importante resaltar que Gutierrez Andrade M. A. (1991) establece que el enfoque clásico para estudiar un problema de optimización, es proceder a identificar aquellas propiedades, cualitativas o cuantitativas, que conduzcan a uno o varios procedimientos eficientes para instrumentarlos computacionalmente y obtener una buena solución.
En el presente Capítulo se tratan genéricamente las diferentes formas clasicas, que se tienen para hacer planeación de la producción en la empresa productiva. El propósito del capítulo se centra en la clasificación de los enfoques usados, así como de los mecanismos de solución, además de definir los conceptos que serán usados frecuentemente a lo largo del presente trabajo.

El Capítulo se desarrolla como sigue: en la sección 1.1., se define de forma precisa el sistema de producción, el concepto producción así como el enfoque usado para modelar el problema del presente trabajo; en la seccion 1.2., se trata lo referente a la producción agregada; en la sección 1.3., se tratan los enfoques de la planeación agregada, en el 1.3.1. la regla de decision lineal; en la sección 1.3.2., se presentan las generalidades del enfoque de programación de metas; en la sección 1.3.3., se presenta la regla de búsqueda de decision; en la sección 1.3.4., lo referente a la produccion intermitente heurística; en la sección 1.3.5. el manejo de coeficientes, en 1.3.6., la aproximacion por simulación, en la sección 1.3.7., los sistemas de manufactura celulares; en la seccion 1.3.8., los sistemas flexibles de manufactura y en la seccion 1.4., la planeacion de la producción jerárquica; en la sección 1.5. conclusiones. Lo cual es antecedente basico para poder abordar el problema de interés.

En términos generales se define el concepto de **Producción,** como el proceso de adición de valor a un bien o servicio por el efecto de la transformación del mismo. En el contexto del presente trabajo se definirá como.

Extraer o modificar los bienes con el objeto de volverlos aptos para satisfacer ciertas necesidades de los mercados de consumo para los que son destinados. Como ejemplos de producción pueden ser tomados, la extracción de mineral de hierro, el montaje de un automóvil, el cultivo y cosecha de productos del campo, el asierre de trozas de madera y obtención de tablas en medidas comerciales y la fabricación de muebles entre otros.

Los bienes se clasifican como de consumo final, de consumo intermedio y de capital. Los ***bienes de consumo final*** son aquellos que no requieren de un procesamiento secundario para ser consumidos directamente por los demandantes; los ***bienes de consumo intermedio*** son los que requieren de un procesamiento secundario para ser convertidos en bienes de consumo final; y los ***bienes de capital*** son los que no se consumen en el proceso y que sirven de apoyo a la producción. En el contexto del trabajo se abordara la problemática de los bienes de consumo intermedio.

La función de producción es ubicada y fácilmente identificable dentro de los sectores ***primario*** y ***secundario*** de la economía, dentro de tales actividades es necesario en principio identificar eficientemente el insumo y el producto, así como las operaciones de transformación como se muestran en la figura 1.1.

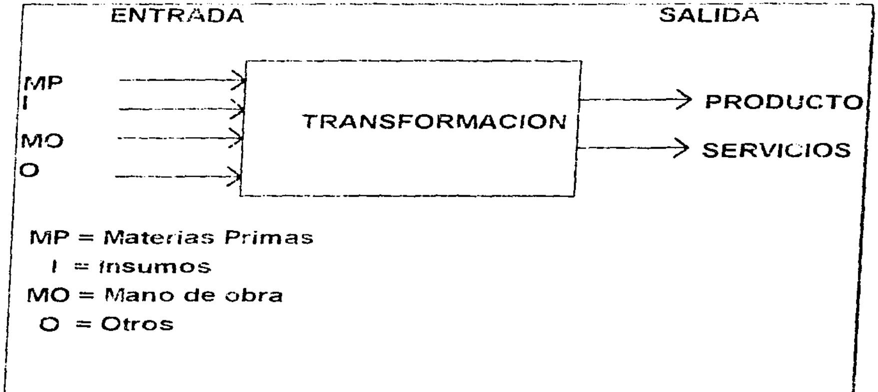


Fig. 1.1 : Representación general del Proceso

El tipo de problemas más común que se presenta en la planeación de la producción tiene estructuras de programación lineal entera mixta; entre los problemas clásicos que pueden ser resueltos con esta estructura se tienen: ***el problema de planeación de la producción, el problema de la planeación de la operación de sistemas eléctricos, el problema de calendarización, el problema de localización de servicios y el problema de la mochila.***

El problema en estudio *planeación de la producción* es tratado dentro de la programación entera mixta, como un *problema de gran escala*, los cuales son aquellos problemas matemáticos que contienen un número muy grande de variables y restricciones. El problema general presenta la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & c\,x + d\,y, \\ \text{s.a.} \quad & A\,x + D\,y \geq b, \qquad\qquad (1) \\ & x, y \geq 0 \\ & x \ \text{entera.} \end{aligned}$$

El problema de planeación de la producción es considerado como un problema complejo y clasificado como un **NP-completo** Gutierrez Andrade M.A. (1991), en el mismo se tiene como objetivo principal obtener la planeación y calendarización de la producción de la planta productiva en unidad de tiempo para el caso(s) de estudio, en el modelado **x** incluye las restricciones de integrabilidad, si **x** es fijada, el problema se convierte en uno lineal de variables continuas. La solución del mismo puede obtenerse empleando diversos enfoques y técnicas matemáticas; una de las aplicaciones prácticas de este tipo de modelado es planteado en la solución del problema de planeacion de la produccion en el que se usan técnicas de descomposicion.

Existe una gran variedad de métodos para resolver este tipo de estructuras, entre los que se pueden manejar los métodos exactos y heurísticos. Las características básicas de dichos métodos consisten en calcular el indicador buscado a través de sucesiones de movimientos, mediante los cuales se evalúen los puntos extremos de la región factible o los puntos más cercanos a estos, hasta encontrar el punto óptimo de la funcion o uno muy próximo a él.

Se sabe que en la *Planeación de la Producción* se incluye la determinación de los niveles de producción, inventario y los niveles de empleo sobre un horizonte de tiempo finito.

La planeación de la producción mantiene objetivos fundamentales: *la función de planeación* determina las fuentes de requerimientos, el punto en el tiempo que estas ocurren, el orden de satisfacción de la demanda en el horizonte de planeación; *la función de calendarización* determina para el periodo de calendarización inmediato cómo actúan las fuentes de producción disponibles localizando los productos individuales que se proveen a los consumidores a un mínimo costo de producción. El problema está referido a lograr un volumen de producción para el periodo de análisis, que implique altos niveles de eficiencia en utilidad y abaratamiento de costos de producción y operación, así como que sea garantizada la permanencia de la industria en forma eficiente en el mercado.

En la estructura de planeacion y calendarización de la producción, se asume que la demanda de los productos manejados es conocida en el horizonte de planeación que se esté tomando para la realizacion del análisis
En lo general **La Elaboración de un Plan de Producción** cubre familias o grupos de productos que son procesados por instalaciones comunes de fabricación. Este debe expresarse en los términos más simples que tengan significado para el personal de operación de la planta; esto es las medidas de produccion deben ser unidades tales como piezas, horas, etc.

Entre las etapas clásicas que se tienen en su estructuración son las siguientes:

A).- Determinar el período que va a cubrir el plan. En muchas empresas, se elabora un plan general global de producción mensual con un año de anticipación , mismo que se utiliza para establecer una política global de producción / inventario y como base para verificar los requerimientos para la capacidad del equipo. Luego se elaborará un plan detallado de producción con objeto de planear y estabilizar los requerimientos de los trabajadores.

B).- Establecimiento del nivel de inventario mínimo. Con que debe contarse para alcanzar el nivel de servicio al cliente establecido por las políticas de la administración.

C).- Distribución del Pronóstico de Ventas a lo largo del período de planeación. Este debe tomar en cuenta los ciclos o picos regulares producidos por promociones de venta que tienen efecto significativo sobre las tasas de ventas.

D).- Determinación del inventario total para el grupo de producto al inicio del período de planeación. Este es por lo general el inventario neto disponible para nuevos negocios, pero puede tambien incluir articulos fabricados pero aún no empacados o enviados a los almacenes.

E).- Establecimiento del nivel de inventario deseado al final del período. Este es el nivel de inventario base mencionado en (A) más cualquier inventario que tenga que añadirse para cubrir los cierres de planta, los picos estacionales u otros requerimientos al final del periodo.

F).- Calcular la producción total requerida para el periodo de planeación. En el calculo de la produccion total requerida, es importante tomar en cuenta los dias festivos u otros periodos de producción perdidos y el tiempo requerido para aumentar o disminuir las tasas de produccion a partir de los niveles actuales. Es importante considerar como elementos adicionales en la elaboracion de este tipo de planes *el periodo de análisis, conocimiento de días feriados durante el año, programación de vacaciones de los trabajadores, y disminuciones del costo de tiempo extra, entre otros.*

Las ideas basicas para resolver esta problematica, se derivan de los diferentes criterios clasicos empleados, que se muestran a continuación.

1.2. TECNICAS DE SOLUCION OPTIMA (PRODUCCION AGREGADA)

La Produccion Agregada tiene como objetivo la utilización productiva de los recursos humanos y del equipo. La palabra agregada significa que la planeación se mantiene en un nivel global con el fin de satisfacer la demanda total que se obtuvo de todos los productos usando los recursos humanos, de equipo y las instalaciones como un conjunto. Por lo que la planeacion agregada permite definir los programas maestros de producción bajo los que operará la planta productiva Bedwotrth David D. James L. Bailey (1987)

En general la Programación Lineal (PL) ha sido prospera dentro de la planeación de la produccion ya que se ha adoptado en muchas plantas para describir los problemas de planeación de la produccion agregada en el contexto de PL estándar. Se caracterizan a continuacion los modelos lineales.

La demanda es deterministica, el costo de producción en un periodo de planeación dado es estrictamente lineal o es piezolineal, los costos incurridos son el resultado de cambios de la tasa de producción de todo el periodo dado que también es lineal o piezolineal, los inventarios pueden ser limitados sobre todo el horizonte de planeacion, los costos de acarreo para el inventario puede ser variado para cada periodo de planeación, un servicio de producción, un mercado y generalmente muchas ordenes atrasadas no pueden ser permitidas.

Con estas aseveraciones, los modelos de planeación de la producción agregada encuentran una tasa de produccion acertada y más aún el nivel de mano de obra que minimiza los costos asociados con un nivel de demanda deterministica conocida. El nivel de inventario es tratado como un resultado que se basa en tomar otras dos variables de decision (nivel de fuerza de trabajo, tasa de producción).

Los modelos lineales de planeacion de la produccion agregada requieren del uso especifico de todas las variables relativas a la produccion, las cuales están basadas en cada periodo de planeacion.

Una metodologia atractiva ademas de las anteriores que son basadas en metodos exactos, es la aplicación de métodos heuristicos. En estos se aplican un conjunto de reglas que llevan a una buena solucion, solamente que no garantiza que la solucion sea optima. Las ventajas que presentan son la simplicidad y la reducción del calculo, aplicada al problema de la planeacion agregada, el conjunto de etapas son las siguientes:

Etapa 1: se desarrolla un plan agregado para producción, empleo, tiempo extra, subcontratación e inventario, que satisfaga la demanda y no viole las restricciones de capacidad.

Etapa 2: se determina el costo del plan

Etapa 3: se acepta el plan o se regresa a la etapa 1

Como elemento de aplicación se considera la compañia siguiente, que tiene que preparar un plan agregado para los siguientes 12 meses. Los datos básicos son presentados en las tablas 1.1 y 1.2 como sigue:

TABLA 1.1: DATOS DE COSTO Y CAPACIDAD

Número inicial de empleos	1250
Inventario inicial (unidades)	2000
Número de Hrs. hombre para producir una unidad	20
Costo variable de una unidad producida en tiempo regular	N$ 200
Costo variable por unidad producida en tiempo extra	N$ 240
Costo variable por una unidad subcontratada	N$ 270
Costo por hora de tiempo usado normal	N$ 8
Costo de pago de un empleado	N$ 1200
Costo de ubicación de un empleado	N$ 500
Costo/unidad mensual de llevado de inventario	N$ 5
Horas/trabajo diario disponibles regularmente	8
Unidades maximas salidas/dia en tiempo regular	500
Unidades Max. salidas/dia en tiempo extra	150
Unidades max. salidas/dia por subcontrato	400

TABLA 1.2: DEMANDA Y DATOS DEL STOCK DE PROTECCION

MESES (1)	DIAS DE TRABAJO (2)	PRONOSTICO DE DEMANDA (3)	STOCK DE PROTECCION REQUERIDO (4)
ENERO	21	5000	2000
FEBRERO	20	5000	2000
MARZO	23	5000	2000
ABRIL	21	7000	2000
MAYO	22	7000	2000
JUNIO	22	7000	2000
JULIO	20	10 000	2000
AGOSTO	23	10 000	3000
SEPTIEMBRE	22	12 000	3000
OCTUBRE	21	20 000	3000
NOVIEMBRE	22	20 000	3000
DICIEMBRE	21	20 000	3000
TOTAL	258	128 000	

En la primera aproximación para construir un plan agregado, se mantiene constante el empleo y se le llamara a este caso *estrategia 1*. El pronostico de demanda para los 12 meses es 128 000 unidades. En resumen, el inventario inicial puede ser incrementado en 1000 unidades, por que el inicial es de 2000 unidades, y el stock de protección requerido al final del horizonte de planeación es de 3000 unidades. Entonces deben producirse un total de 129 000 unidades.

Si se producen estas unidades fuera de subcontratar se requiere 129 000 (20 Hrs) = 2 580 000 hrs. hombre. El número de empleos requeridos, asumiendo que el trabajo es en tiempo regular, se tienen 2 580 000 (258 dias x 8 hrs) = 1250 empleos. Un plan basado en mantener este nivel de empleos es presentado en la tabla 1.3.

La producción en tiempo regular es determinada por enero, por ejemplo es 1250 empleos * 21 dias de trabajo * 8 hrs. por dia. 20 hrs hombre por unidad = 10 500 unidades.

El inventario final para enero es 2000 de inventario inicial + 10 500 unidades de producción - 5000 unidades de demanda pronosticada = 7 500 unidades.

Con este plan, la producción excede la demanda durante el primer mes del año y es permitido acumular inventario, alcanzado en piso en agosto. Durante la ultima parte del año, la demanda es pronosticada y excede la tasa constante de producción diaria, por el final de diciembre, el inventario es reducido a 3000 unidades, que es el stock de protección requerido.

Ademas se tiene que este plan no solamente incluye el precio de colocacion final, tiempo extra, tiempo inferior, o subcontratación. Los costos relevantes incluidos son solamente costos variables de produccion o tiempo regular de llevado de inventario. El costo total puede ser calculado como se muestra.

Costo de produccion en tiempo regular, 129 000 Unidades * N$ 200 / unidad = N$ 25 800 000; costo de llevar el inventario, 249 000 unidades por los meses * N$ 5 unidad por mes = 1 245 000; haciendo un costo total de N$ 27 045 000.00

TABLA 1. 3 : PLAN DE PRODUCCION AGREGADO, ESTRATEGIA 1.

MESES	No DE EMPLEOS	PRODUCCION EN TIEMPO REGULAR	DEMANDA PRONOSTICADA	INVENTARIO FINAL
ENERO	1 250	10 500	5 000	7 500
FEBRERO	1 250	10 000	5 000	12 500
MARZO	1 250	11 500	5 000	19 000
ABRIL	1 250	10 500	7 000	22 500
MAYO	1 250	11 000	7 000	26 500
JUNIO	1 250	11 000	7 000	30 000
JULIO	1 250	10 000	10 000	30 500
AGOSTO	1 250	11 500	10 000	32 000
SEPT	1 250	11 000	12 000	31 000
OCTUBRE	1 250	10 500	20 000	21 500
NOV	1 250	11 000	20 000	12 500
DIC	1 250	10 500	20 000	3 000
TOTAL		129 000	128 000	249 000

En una segunda aproximacion en la construccion de un plan agregado, se producen exactamente no más unidades en cada mes que las que satisfagan el pronóstico de demanda y los requerimientos del stock de protección., empleos que pueden ser pagados y almacenados cerrando toda la produccion en el tiempo regular y extra. Los requerimientos remanentes pueden ser reunidos por subcontratación. A esta alternativa le llamaremos *estrategia 2*, los resultados son presentados en la tabla 1.4.

El plan incluye un gran numero de empleos que hay que dejar de trabajar, gradualmente construyendo la fuerza de trabajo posterior bajo la máxima intensidad, usando tiempo extra en los meses atrasados, y subcontratación en los ultimos 4 meses. El inventario es mantenido en los requerimientos del nivel del stock de protección.
El número de empleos es expresado en una fraccion decimal. Esto puede ser llevado a cabo dejando de trabajar una parte de los empleos a través de los meses. Más aún que implique un grado de precisión que probablemente no se justifica. En la práctica, el número de empleos y el número de pagos y empleados se cierran en el próximo entero.

TABLA 1.4: ESTRATEGIA 2, PLAN DE PRODUCCION AGREGADA

MES	NUMERO DE EMPLEOS	PRODN EN TIEMPO REGULAR	PRODUC EN TIEMPO EXTRA	UNIDADES SUBCON-TRATADAS	EMPLEOS PAGADOS	EMPLEOS CERRADOS	INVENTARIO FINAL
ENERO	595.2	5000	0	0	0	654.8	2000
FEBRERO	625	5000	0	0	29.8	0	2000
MARZO	543.5	5000	0	0	0	81.5	2000
ABRIL	833.3	7000	0	0	289.8	0	2000
MAYO	795.5	7000	0	0	0	37.8	2000
JUNIO	795.5	7000	0	0	0	0	2000
JULIO	1250	10 000	0	0	454.5	0	2000
AGOSTO	1195.7	11 000	0	0	0	54.3	3000
SEPTIEMBRE	1250	11 000	1000	0	54.3	0	3000
OCTUBRE	1250	10 000	3150	6350	0	0	3000
NOVIEMBRE	1250	11 000	3300	5700	0	0	3000
DICIEMBRE	1250	10 500	3150	6350	0	0	3000
TOTAL		100 000	10 600	18 400	828.4	828.4	29 000

TABLA 1.5

CONCEPTO	MONTO (N$)
Costo de producción regular 100 000 unid. * N$ 200	20 000 000
Costo de Producción con tiempo extra 10 600 unid. * N$ 240	2 544 000
Costo de subcontratación 18 400 * N$ 270	4 968 000
Costo de pago 824.4 empleos * N$ 1200	994 080
Costo de cierre de empleos 828.4 empleos * N$ 500	414 200
Costo de llevar el inventario 29 000 unidades mes * N$ 5	145 000
Costo Total	29 065 280

La estrategia 2, tiene más alto costo que la estrategia 1, se escoge la estrategia 1 o se ensaya con otras estrategias. En la figura 1.2. todas las líneas no decrecen en el punto de union de las 2000 unidades en el inicio de enero y el punto de las 131 000 unidades en el final de diciembre.

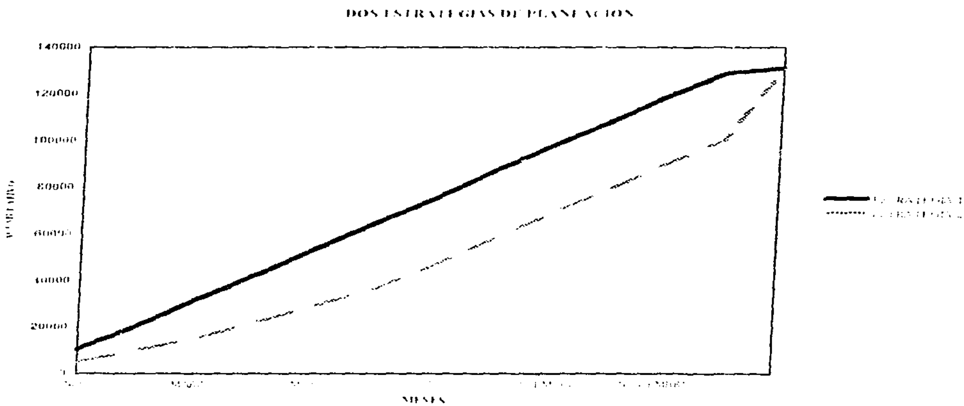


FIG. 1.2.

1.3. ENFOQUES DE PLANEACION AGREGADA

1.3.1. REGLA DE DECISION LINEAL

En la mitad de los 50s, la regla de decisión lineal fue desarrollada por Holt, Modigliani y Simon (1955) y Holt, Modigliani y Muth (1956). Esta técnica posteriormente es referida como **HMMS** (Holt, Modigliani, Muth y Simon, 1960), y en ella, en contraste con los modelos generales de Programación Lineal, se asume una demanda no determinística. También requiere que todos los productos sean agregados en algun grupo común. El modelo requiere de reglas lineales en que se tomen el nivel de fuerza de trabajo, tasa de producción y específicamente, cambios de los niveles de inventario. El nivel de fuerza de trabajo es usado en el establecimiento de la tasa de producción máxima. **HMMS** (regla de decisión lineal) representa el total de costos a través del horizonte de planeación en una función cuadrática opuesta a la lineal o función piezolineal. Estos costos son un costo esperado, entonces la demanda es estocástica y opuesta a la inicial que es determinística.

1.3.2. PROGRAMACION DE METAS

Entre otras de las formas empleadas para resolver el problema de planeación de la producción agregada se tiene la Programación de Metas. Los tipos de metas que se involucran en el modelado comúnmente son referentes a la produccion, minimización de costos de inventario, renovación de productos o maximización de ventas, y utilización de fuerzas de trabajo, estos son los objetivos más frecuentes e importantes en la gerencia Lee y Orr (1977). La aproximación para la construcción de modelos de Planeación de la Producción Agregada a traves de Programacion de Metas son descritos inicialmente por Lee y Moore (1974). En un primer momento son definidas todas las variables de decisión, así como todas las metas manejadas son especificadas y priorizadas. Las metas que se van a tomar en cuenta, principalmente, son las de *capacidad, calendarizaciones de entrega, fuerza de trabajo estable, producción, inventario y costo de tiempo extra.*

El concepto de programación de metas es una extención de la programación lineal y require incorporar todos los objetivos de la gerencia como restricciones en el modelo de producción agregada . Cooper y Ferguson 1955 crean ésta técnica. la misma permite resolver problemas con objetivos múltiples. incompatibles. jerárquicamente desiguales y no homogeneos en cuanto a su unidad de medida . estas pueden mezclar diferentes unidades en la función objetivo. La idea básica es establecer una meta numérica específica para cada uno de los objetivos. plantear una función objetivo para cada objetivo y. posteriormente. buscar una solución que minimice las sumas de las desviaciones de estas funciones objetivo respecto a sus metas respectivas.

1.3.3. REGLA DE BUSQUEDA DE DECISION

Es clasificada dentro de las técnicas de solución que proporcionan valores cercanos al óptimo. Las limitaciones de las formas Lineal y Cuadrática de la planeación de la producción agregada implican orientar las investigaciones en las que se usen otro tipo de modelados. Las matemáticas superiores incluyen muchas de las técnicas sofisticadas. El uso de métodos de búsqueda y heurísticos es un medio de solución de estos problemas. Se ha dado una atención considerable en los ultimos años a este tipo de metodologías. *La Regla de Búsqueda de Decisión*. requiere desarrollar un modelo de simulación en la computadora del sistema y búsqueda de respuesta de superficie. ya que mediante el uso de técnicas estándar de búsqueda se obtiene una solución (no necesariamente óptima) Goodman (1974). Taubert (1961) . Una de las aplicaciones de este tipo de técnicas de búsqueda en planeacion de la producción es desarrollada por Taubert (1968) . Este autor sugiere la posibilidad de combinar búsqueda con un procedimiento branch and bound para la solucion de este tipo de problemas.

1.3.4. PRODUCCION INTERMITENTE HEURISTICA

La Produccion Intermitente Heuristica (PIH) ha sido aplicada en este campo y presenta gran interés en la práctica. El objetivo de esta heuristica, a diferencia de otras técnicas consiste en evitar la recalendarizacion frecuente de la producción y tamaños de fuerzas de trabajo sobre el horizonte de planeacion. Mellichamp y Love (1978) , usan una modificacion simple del modelo de caminata aleatoria Orr (1962) ; este metodo fue adoptado por Elmaleh y Eilon (1974) , quienes restringen la producción y tamaños de fuerzas de trabajo a tres niveles discretos (alto, normal y bajo) para todos los periodos en el horizonte de planeacion, entonces tres tasas de producción pueden ser utilizadas en PIH.

La PIH es basada en la observación que los gerentes ven a favor de un gran cambio, en la fuerza de trabajo con respecto de una serie de cambios frecuentes y pequeños. Acordes con tres niveles de producción (alto, normal y bajo). La producción es intermitente de un nivel a otro dependiendo del nivel de inventario y del pronóstico de ventas.
Los puntos de producción intermitentes se basan en la minimización de alguna función de costo dada a través del uso de algún procedimiento de búsqueda.

1.3.5. MANEJO DE COEFICIENTES

Una aproximacion única a la planeación de la producción es formulada por Browman (1963). Se establece que en el pasado el manejo de conducta usada determina los coeficientes apropiados para el nivel de producción y las reglas de decisión de fuerza de trabajo.

El empleo del modelo de coeficientes (MMC) está basado en el uso de decisiones adecuadas, pero puede tomar más consistencia si se aplican reglas de decision matematicas. Browman reporta resultados alentadores estableciendo la comparación entre cuatro industrias empleando reglas de decisión lineales y costos históricos y actuales.

El manejo del modelo de coeficientes sugiere que la tasa de produccion para todo periodo es tomada por la regla de decision general siguiente.

$$P_t = a\,W_{t-1} + b\,I_{t-1} + c\,F_{t+1} + k$$

Donde:

P_t = Tasa de producción para el periodo **t**.

W_{t-1} = Fuerza de trabajo en el período previo.

I_{t-1} = Inventario final para el periodo previo.

F_{t+1} = Pronóstico de demanda para el siguiente período.

a, b, c, y **k** son constantes.

Las aproximaciones de Browman reunen datos históricos para **P, W, I,** y **F.** Después, a través de análisis de regresion, los valores de **a, b, c** y **k** son estimadas. El resultado es una regla de decisión basada en una conducta del pasado sin toda la explicación de la función de costo.
El analisis de regresión del manejo del modelo de coeficientes decide el promedio fuera de estos sesgos para decisiones futuras.

1.3.6. APROXIMACION DE SIMULACION

Vergin (1966) proporciona un caso de cómo se puede simular el uso de la selección de parámetros para proporcionar reglas de decisión de la planeación de la producción agregada. A través de simulación, toda estructura de costo deseado lleva a otros objetivos que pueden ser evaluados. Históricamente el uso de simulación representa una etapa lejana para las altas restricciones lineales y formulaciones previas de métodos de costo cuadráticos. Los metodos de simulación, pueden ser considerados cuando se requieren estructuras complejas de costos.

Por lo general, en los procesos de simulacion se inicia con una primera calendarización que es sugerida por la experiencia o que representa la practica corriente en la firma.
Una función objetivo que no tiene restricciones en terminos de esta estructura, es usada para evaluar la ejecucion de cada calendarizacion. Un cambio es introducido en el desarrollo de niveles de tiempo extra, inventarios, subcontratación y, asi hasta que el mínimo local es encontrado. Métodos de busqueda heuristica tambien pueden ser usados para proporcionar bases sistemáticas para la selección de alternativas en los procedimientos. Entre los problemas más comunes que presenta esta alternativa, es que cada condición sobre el problema requiere un procesamiento de simulación separado. Usualmente el modelo es cargado, desarrollado y procesado, y los procedimientos computacionales usados para resolverlo no garantizan una optimalidad similar a otros modelos que son clasificados en técnicas de solución cercanas al óptimo.

1.3.7. SISTEMAS DE MANUFACTURA CELULARES

Los sistemas de manufactura constituidos por células de producción son diseñados en áreas de producción dedicadas a partes de familias, referidas como células de manufactura. Los beneficios asociados con el uso de células de manufactura incluyen la reduccion de tiempo en el flujo, menor trabajo en el inventario en procesos, pequeños tiempos de preparacion, inferiores costos de almacenamiento de material, mejora la calidad y la productividad, mejora la satisfacción del trabajo y el estatus y simplifica la planeación y control de los procedimientos.

Wemmwrlov, U. (1987). Wemmerlov U., and A.J. Vakharia (1991), definen tres tipos de materiales que pueden ser procesados en células. *Partes de pieza, subensambles y ensambles.*

Las celulas tambien pueden ser de tipo hibrido, donde ambas máquinas y ensambles pueden tomar el mismo sitio en celulas pequeñas. Como resultado se pueden referir a células de maquinado, fabricación, ensamble, y células hibridas.
Una forma de la célula es formada por uno o más operadores que son responsables para el procesamiento y actividades de almacenamiento de material. Unos de estos son operadores de las máquinas, y operadores que trabajan alrededor de las células de procesos en las órdenes de alta prioridad. En muchos casos, la calendarización de estas células es complicada por la disponibilidad limitada de trabajos.

Otras celulas incluyen la aplicacion de tecnologia basada en computadora, el procesamiento y actividades de almacenamiento de material.
Ejemplos de tales células incluyen sistemas flexibles de manufactura, como lo es la tecnología para ensamble de circuitos integrados en la industria electrónica, y otras aplicaciones de computacion integrada a la manufactura. En estas células, los operadores proporcionan una herramienta de carga, monitoreo e inspección.

En las células de manufactura, la secuencia de trabajo establecida para la primera máquina es mantenida para todas las maquinas subsecuentes componentes de dicha célula.

Las formas de calendarizar los sistemas de manufactura celular son la *dinámica* y *estática*. Estas pueden ser aplicadas en la calendarización de los flujos de taller en las mismas. Muchos de estos trabajos usan métodos analíticos para la solución de problemas de calendarización estática desarrollados por Jhonson y Campbell, Dudeck y Smith. Estos métodos asumen que todos los trabajos pueden ser calendarizados y son disponibles en la primera máquina en la celula e inician el periodo de calendarización.

Wemmerlov y Vakharia, reportan calendarizaciones heuristicas dinámicas para una celula de flujo de taller de cinco estados, con una cola de ordenes en el frente de cada estado. Cada estado en una célula tiene una maquina y todas las ordenes tienen la misma ruta a través de la misma. Esta procesa a lo mucho seis partes de familias, con ordenes de partes individuales que arrivan en intervalos de tiempo acordes con un proceso de poisson.
Dependiendo del arribo a la célula, cada orden de partes es asignada cumpliendo un dato basado en el contenido de trabajo total (C T T) que puede ser ejecutado en la célula en el orden. El total de contenido de trabajo incluye valores combinados de tiempos de preparación de partes de familias y tiempos de proceso en cada estado de la célula.

Los trabajos de Mosier, Elvers y Kelly, reportan un segundo estudio de calendarización para celulas de manufactura. Examinan la ejecucion de secuencias para las células mostradas en la figura 1.3 mostrada más adelante del trabajo.

Estas contienen 4 maquinas. Cada una tiene tres colas de ordenes, con una cola separada para cada parte de familia. En orden, muchas requieren procesamiento en una o mas de las primeras 3 maquinas, y todas las ordenes son procesadas por una cuarta maquina. Por lo tanto las partes son muchas para todas las ordenes. El arribo de las ordenes de las celulas se da en intervalos de tiempo aleatorios, acordes con procesos poisson, y los trabajos vencidos para la celula son asignados en las bases del contenido total de trabajo, usando el procedimiento (C T T).

Entonces la celula es organizada como un trabajo de taller en ordenes alrededor de todas las máquinas en la misma secuencia, las decisiones de secuencia pueden ser hechas todas para las 4 maquinas en la celula. Para el caso se hacen tres decisiones en cada máquina dadas como:

a).- Cuando seleccionar ordenes para una cola diferente (parte de familia).

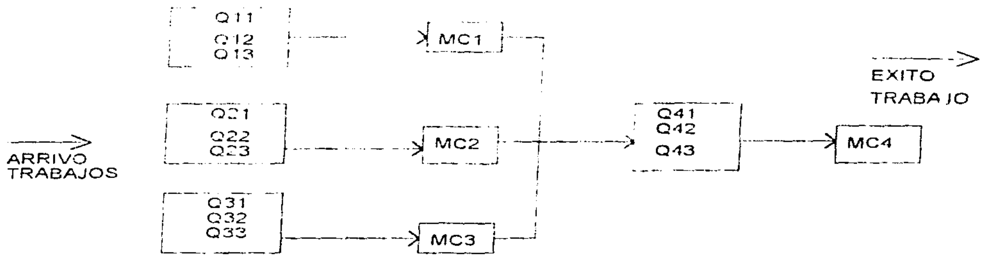
b).- Cuando son seleccionadas órdenes de las dos colas remanentes (partes de familia).

c).- Qué orden se selecciona para la cola preferida.

Se usan tres reglas al hacer las primeras dos decisiones, estas son definidas como:

AVE: Seleccione la cola de la parte de familia que tiene un alto promedio de orden prioritario y procesa todas las ordenes en el tiempo de selección de la cola.

WORK: Seleccione la cola de la parte de familia que tiene la suma de tiempo de procesamiento más grande para esta maquina (que es la cola que tiene el contenido de trabajo más grande) y procesa todas las órdenes que estén en la misma.



Donde:

Q_{ij} = Cola en la máquina (i) para la parte (j).

MCi = Maquina tipo (i).

Figura 1.3

ECON: Despues de que cada orden es procesada en una máquina, calcule la combinación esperada de tiempo de preparación para todas las órdenes en cada cola. Cierre la cola teniendo el tiempo total esperado de preparación. Si los valores exceden el total de tiempo de preparación esperado para la cola corriente, inicie el servicio.

Para el despacho prioritario de ordenes de la cola se toman como referencia las reglas de secueneiación de orden siguientes:

1.- Tiempo no usado.

2.- Modificación de la tasa crítica 1 (tasa remanente hasta que la fecha vencida es dividida por el total de tiempo remanente de procesamiento).

3.- Tiempo de procesamiento más corto.

4.- Modificacion de la tasa critica 2 (tiempo remanente hasta que la fecha vencida es dividida por el número de operaciones remanentes).

5.- El primero que llega al taller es el primero en servirse.

1.3.8. SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA

La tecnologia de procesos para volumenes de produccion bajo y medio de partes ha sido cambiada dramaticamente en los años recientes con el desarrollo de sistemas flexibles de manufactura (SFM). Tal que los sistemas tipicos estan compuestos de 2 a 10 máquinas y herramientas y usan un control computarizado en varias etapas en los procesos de maquinado , actividades de almacenamiento de material de movimiento de partes entre maquinas, y calendarización del flujo de ordenes a través del sistema. En efecto los SFM permiten muchas de las eficiencias y niveles de utilización de sistemas de manufactura repetitivos reteniendo la flexibilidad de equipo de proposito general. Este tipo de sistemas proporcionan importantes beneficios en reduccion de tiempos de preparación de máquina, recortando los sobreciclos de manufactura (tipicamente de semanas a dias)con sus correspondientes reducciones en trabajo en inventario en procesos y costos de herramientas (instrumentación).

Bajo esta optica del problema de calendarización, ocurren tres diferentes calendarizaciones y decisiones de control en un manejo de operaciones dia a dia, en el nivel del taller de un SFM.

Las decisiones son expresadas como:

1.- Parte de tiempo de cargado: ¿ cuándo se carga una parte dentro del SFM ?.

2.- Parte de cargado: ¿ qué tipo de parte es cargado dentro del SFM ?.

3.- Despachado: ¿ qué maquina o parte puede ser despachada despues de completar las operaciones corrientes ?.

La parte, tiempo de cargado, implica decisiones concernientes cuando entra una nueva parte dentro del sistema en la estación de cargado de un SFM, considerando tales factores en un sistema congestionado en la disponibilidad de partes fijas. La decisión de cargado de las partes concernientes en escoger el tipo de partes en la entrada del SFM en la estación de cargado, depende de los tiempos para una nueva parte que entre al sistema, considerando tales factores como partes caracteristicas , maquinas y condiciones de cargado de trabajo. Las decisiones de despacho, concernientes a las rutas de partes a través del SFM en el tiempo actual de producción, tal como la secuenciación de partes en las máquinas individuales en un SFM.

Estos procedimientos asumen decisiones en la planeación de la producción en un nivel de agregación concerniente a los tipos y mezclas de partes que pueden ser corridas, en el SFM pueden ser resueltos previamente en el desarrollo de rutinas de partes y en la preparación sobre el material y planes de capacidad para la empresa. Son identificadas 5 tal que interrelacionan los problemas de planeación de la produccion que se requiere resolver a priori en la producción actual *selección de tipos de partes en SFM, agrupamiento de máquinas, determinación de la tasa de producción, fuentes de localización, cargado de células.*

Una forma de hacer operaciones día a día de SFM son citadas por Jaikumar, como se muestra a continuación. Compara el uso de los SFM usados en sistemas manufactureros de Estados Unidos de Norteamerica y Japón. Las diferencias clave estan en el número de partes diferentes procesadas por los SFM, y la utilización del equipo, ofreciendo muchas lecciones, tambien la clave, para un punto de vista de calendarización, se observa incrementalmente necesaria su utilización de altas tasas de SFMs, y calendarizaciones pequeñas, lotes más frecuentes, y continuamente produce nuevas partes entre otras. Dichas comparaciones son:

TABLA 1.6
COMPARACION DE SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA
ESTADOS UNIDOS - JAPON

CONCEPTO	ESTADOS UNIDOS	JAPON
Tiempo de desarrollo de sistemas (años)	2.5 a 3	1.25 a 1.75
No de Maqs. por sistema	7	6
Tipos de partes producidas por sistemas	10	93
Volumen anual por parte	1 727	258
No. de partes producidas por dia	88	120
No. de nuevas partes introducidas por año	1	22
No. de sistemas con atencion de operaciones	0	18
Tasas de utilizacion, dos cambios	52 % (*)	84 % (*)
Tiempo promedio en cortes de metal por dia - hora	8.3	20.2

* Tasa de tiempo actual corte - metal, a tiempo disponible para corte de metal

En muchas compañias la planeación de la producción es una habilidad personal, cuando se conocen casi todos los detalles de la compañia, los productos y los procesos de manufactura aplicados.

A traves de este enfoque se hace frente a problemas relacionados con el incremento del tamaño de lote económico, variación de tipos de productos, tiempos empleados en el trabajo, flexibilidad en la producción, manufactura económica, etc.

Las adaptaciones prácticas hechas a sistemas de planeación en compañias individuales como en el proceso de aserrio, apoyan eficientemente al procesamiento de datos en estos procesos. El control de la producción en pequeña escala se convierte en una tasa de tiempo real.

Para el caso se puede mencionar a la industria Japonesa con el Just in Time como una aproximación, y al trabajo del Dr.Goldratt en la produccion sincronizada con alto nivel de eficiencia.

Sin embargo al mismo tiempo nuevos sistemas de producción son instrumentados en la industria, creando una nueva necesidad para diferentes y nuevos sistemas de planeación.

Una de las posibilidades de hacer la planeación de la producción eficiente es a través del uso de las operaciones fundamentales del enfoque sistémico, para el cual las fases básicas son: la definición e identificación de la situación problemática, el modelo conceptual, el modelo formal y la solución. A través de las cuales se resuelve eficientemente el problema, hasta llevarlo a su implantación y darle seguimiento y evaluación.

1.3.8.1. EL FUTURO DEL SISTEMA DE PRODUCCION

Ante las perspectivas económicas y comerciales que se presentan hoy dia en los mercados tanto nacionales como internacionales, se encuentra que la problemática básica que enfrenta la empresa moderna, es en el que los problemas de la industria diaria se reducen a optimizar los costos de manufactura, y a hacer un uso eficiente de la capacidad instalada, además de prestar una atención prioritaria a:

a).- Obtención de más variantes de productos que permitan reducir el tamaño de lotes medios (diversificacion de la producción).

b).- Reducción de los tiempos de proceso.

c).- Incremento en los niveles medios de la calidad en técnicas de manufactura e incremento de calidad en seguridad.

Las nuevas tecnologías de producción desarrolladas, en lo general se caracterizan por: su Lay out de producción, manejo de conceptos, automatización, procesos de manufactura, diseño para automatización y tecnología de información.

Tradicionalmente se han observado dos caminos en la planeación; Lay out de la fuente de trabajo, el tipo de producción en la industria y estos presentan variantes como: *el funcional y el flujo lineal.*

En un *Lay out funcional* las máquinas tienen un acomodo universal, por lo que se tiene una gran flexibilidad con respecto a la forma de varias operaciones en varios productos (presentación de proceso radial).
Este tipo de Lay out puede caracterizarse por una aplicación más cómoda de los materiales al proceso, por lo que se manejan pequeños tamaños de lote de material en proceso.

De lo anterior se tiene que las máquinas deben ubicarse en el proceso de tal manera que se tenga una organizacion simple del flujo del material, tal que implique un menor tiempo de proceso y se obtenga un incremento en la productividad.
Se tiene que hoy dia la producción flexible es reducida, sin embargo el lay out funcional y el en linea pueden ser caracterizados por una producción orientada a grupos.
Otra posibilidad es la de tener un producto orientado al lay out, esta aproximación se le conoce de varias formas, tal como: grupo de tecnologia, manufactura flexible, manufactura celular, etc.

El término de las celulas de manufactura puede ser aplicado, tomando una combinacion de lay out funcional y en línea, entonces la tecnología de células de manufactura está basada en los fundamentos siguientes:

1.- Se agrupan las partes en familias con requerimientos de manufactura similares.

2.- Se agrupan las máquinas en celdas de manufactura que realicen una o más familias de partes.

Cada célula es un flujo en línea, lo cual permite que se tengan consumos de tiempo cortos en operación, el acomodo de las máquinas y herramientas es universal lo que permite tener la flexibilidad en el desarrollo de trabajo en la planta, lo cual permite reorganizar el Lay out para diferentes productos implicando tiempos cortos en el manejo de materiales.

1.3.8.2. TENDENCIAS DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCION

Los sistemas de producción futuros pueden ser tipificados de acuerdo a su conformación, esta presenta tendencias de desarrollo para los casos:

a).- Manufactura celular.
b).- Manejo de nuevos conceptos (JIT. OPT.)
c).- Alto grado de automatización.

La manufactura celular causa un cambio en el desarrollo de planeación en dos aspectos.

a).- Un tipo contiene una familia de partes.
b).- Las células de servicio son una unidad de planeación.

Los servicios en células de producción en una unidad de planeación, muestran los efectos siguientes en una planeación.

a).- Las partes son cargadas en todas las máquinas en la célula al mismo tiempo.
b).- Toda célula es ocupada (cargada).
c).- Se tienen muchas máquinas ociosas en la célula.

1.3.8.3. ESTRUCTURA DE DATOS

En principio se tienen dos cadenas de datos básicos en un sistema de manufactura:

a).- El procesamiento de materiales.

b).- Las fuentes aplicadas a procesos de materiales.

El material se refiere a productos, entonces los datos básicos son productos - fuentes. Cada uno de los tipos presentan una estructura de datos. Cada estructura es un árbol que puede ser descrita por una gáfica esta será referida a la Fig. 1.4 la cual representa productos y la Fig. 1.5 representa las fuentes, respectivamente.

Los diferentes niveles en la Fig. 1.4 son los siguientes: producto final, ensamble, sub-ensamble, partes y operación.

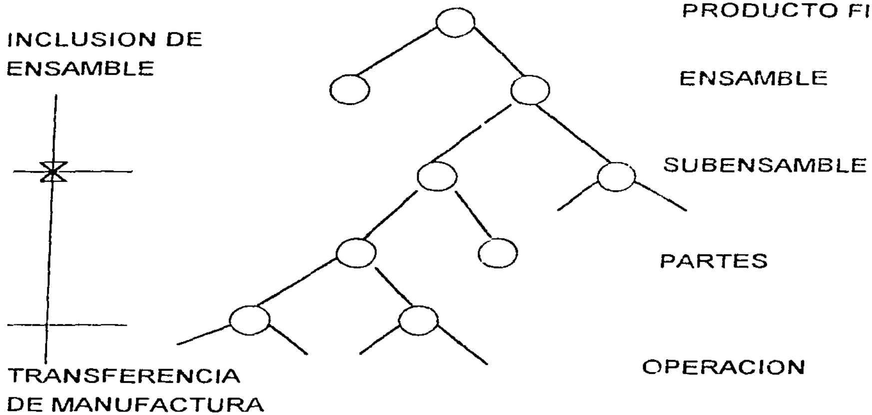


Fig. 1.4 NIVELES DE PRODUCTOS

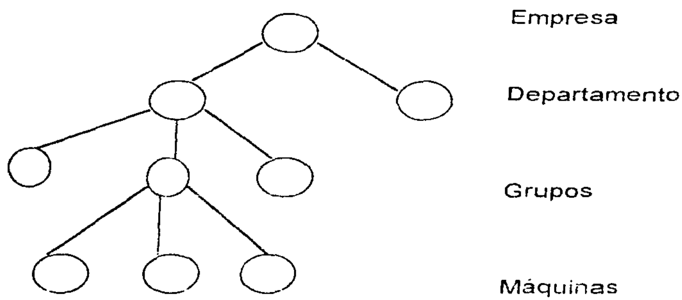


Fig. 1.5 FUENTES

Las interacciones que se tienen entre las Figuras 1.4 y 1.5, son incluidas en la figura 1.6, se tiene que la operación **P1122** es localizada en la máquina **R1122**, note que la parte **P1121** es localizada en la máquina del grupo **R113**. Esto indica las posibles alternativas de maquinas usadas para la manufactura de la parte (es decir todas las máquinas en el grupo).

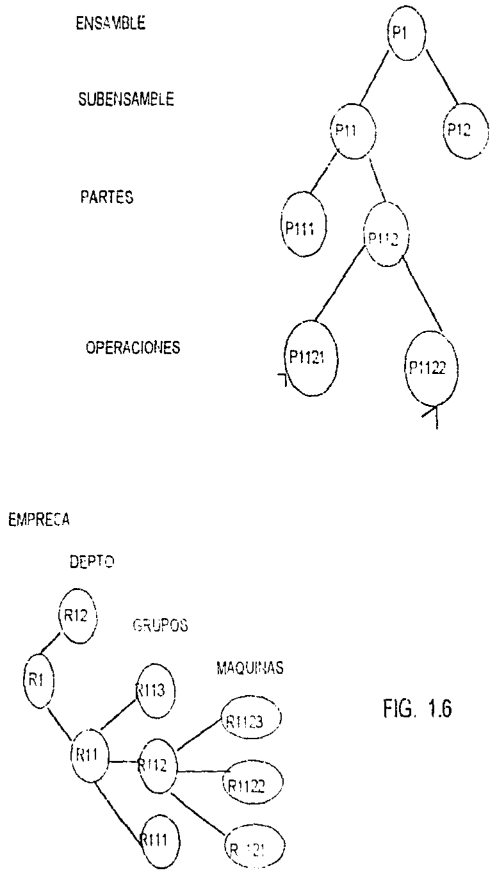

ENSAMBLE
SUBENSAMBLE
PARTES
OPERACIONES
P1
P11
P12
P111
P112
P1121
P1122
EMPRECA
DEPTO
GRUPOS
MAQUINAS
R12
R1
R113
R11
R112
R111
R1123
R1122

FIG. 1.6

1.4. PLANEACION DE LA PRODUCCION JERARQUICA

La evolución que ha presentado hoy dia la Planeación de la Producción Jerárquica es descrita como se muestra a continuación.

Bitran y Hax (1977) presentan una determinación importante en la ejecución de la planeación de la producción jerárquica. El procedimiento usado, en la desagregacion de decisiones anteriores en cada nivel jerárquico, es la aproximación al problema tipo mochila, el cual manifiesta eficiencia computacional en la solución del problema de la planeación.
Presenta una aproximación jerárquica a la planeación y calendarización en el proceso de manufactura, el cual puede ser modelado como un proceso de un simple estado. Los cambios basicos inherentes a las decisiones de planeación de la producción son explicados por medio de un modelo agregado, el cual es resuelto en el horizonte de planeación anual, subsecuentemente, la primera solución del plan agregado es desagregado, considerando objetivos de costos adicionales y restricciones de demanda.
Al mismo tiempo, en este trabajo dan una atención especial a los procesos de desagregación, procesos de infactibilidades, y tratamiento de altos costos iniciales.

Bitran , et al. (1980) muestran que bajo ciertas condiciones, un problema de desagregación, un problema como el de la primera etapa puede ser descompuesto en subproblemas continuos convexos tipo mochila, del mismo modo los de un modelo jarárquico de un simple estado, con la ventaja de que los problemas tipo mochila pueden ser resueltos eficientemente.

Bitran, Hass y Hax (1982) presentan una aproximación al problema de planeación y calendarización jerárquica en un sistema de manufactura, el cual puede ser modelado en procesos de dos estados. Describen una estructura conceptual para este caso particular, basados en Bitran y Hax (1977), el problema lo atienden inicialmente resolviendo un subproblema en el que obtienen los requerimientos de productos por familia, en la segunda etapa obtienen las cantidades de producto por tipo de articulo; en la solución de la primera etapa resuelven un problema en el que la función objetivo es convexa y las restricciones son lineales y es susceptible aplicarlos a problemas de gran escala encontrados en la práctica.

Stephen. C. Graves (1982) proponen y prueban un procedimiento para descomposición del problema de planeación de la producción empleando un problema lineal entero mixto (PLEM). Esta descomposicion se hace usando la estructura jerárquica de Bitran y Hax (1977), para planeación de la producción. El procedimiento descompone el problema en dos subproblemas. que corresponden al subproblema de planeacion agregada y al subproblema desagregacion.

En cada iteración, el procedimiento encuentra ambas cotas. una cota inferior en el valor óptimo del subproblema de planeación de la producción y una solución factible para una cota superior obtenida. Los autores antes citados particionan el problema de Planeación y Calendarizacion en una jerarquia de subproblemas. En todo periodo de planeación. los subproblemas son resueltos secuencialmente mediante la solución de subproblemas jerarquicos inferiores.
En el sistema solamente se obtienen las decisiones que se adoptan para el período inmediato.
Se formula el subproblema de planeación agregada y el subproblema de calendarización detallada para la estructura jerárquica de Bitran y Hax (1977). el subproblema tratado es uno PLEM. Se usa relajacion Lagrangeana para resolver el problema dual entero mixto.

En el contexto del planteamiento del problema original. inicialmente se resuelve el subproblema de planeación agregada por minimización de tiempo extra y costos de almacenamiento; esta solucion especifica los niveles de producción e inventario para cada tipo. El subproblema de desagragación de familias puede ser resuelto. esto es. el costo inicial de la familia es minimizado. Hax y Meal resuelven el subproblema de planeación agregada en un problema lineal. y resuelven el subproblema de desagregación de familias para el período de tiempo inmediato por un heurístico.

El procedimimiento de solución consiste en examinar una Relajación Lagrangeana. para la cual se obtiene inmediatamente una cota inferior y el valor óptimo del problema original en cada iteración. Se puede construir una solución factible para el problema original y se encuentra una cota superior en el valor de la solución óptima.
Para todo vector de multiplicadores. es obtenida una relajación lagrangeana del problema original.

Bedworth, David D., and James Bayley (1987) desarrollan un método para la preparación de familias estableciendo que en la mayoría de compañías la línea de productos consiste de un número de familias que son compuestas de artículos. Para el caso en que el costo de preparación incurrido en la producción de una familia es significativo, el costo de preparación asociado con la producción de un artículo individual de la familia es insignificante y puede ser ignorado. La obtención de la calendarización maestra involucra decisiones, primero, que las familias se procesen cada período, segundo, la definición de las cantidades a ordenar para los artículos en estas familias. El volumen total de producción debe ser acorde con el plan de producción, la secuencia del método es descrita como:

Etapa 1: Seleccionar las familias del producto si.

$$I_{ij,\,t-1} - r_{ijt} < S_{ij}$$

Para todo artículo **i** en la familia **j**, donde:

$\mathbf{I_{ij,\,t-1}}$ = *Inventario del artículo **i** en la familia **j** en el final del periodo* **t-1.**

$\mathbf{r_{ijt}}$ = Demanda constante pronosticada del artículo **i** en la *familia* **j** durante el periodo **t.**

$\mathbf{S_{ij}}$ = Stock de protección para el artículo **i** en la familia **j**.

Entonces se incluye la familias **j** en la calendarización maestra de producción (MPS) en el periodo **t**.

Se dice que si el inventario final esperado, $\mathbf{I_{ij,\,t-1} - r_{ijt}}$, de todo artículo en una familia cae abajo, del inventario (stock) de protección, $\mathbf{S_{ij}}$, para el final del siguiente período de producción, esto ocurre en todos los artículos en que la familia es candidata a ser producida.

Etapa 2: Calcular tentativamente la cantidad de artículos a ordenar. El costo total por periodo de preparacion y llevado del inventario para la familia **j** es dado por:

$$C_j = k_j / [T_j + \sum_i h_{ij} T_j / 2]$$

Donde:

k_j = costo de preparación para la familia **j**.

T_j = tiempo entre órdenes para la familia **j**.

h_{ij} = costo de almacenamiento por período para el artículo **i**, familia **j**.

Por cálculo diferencial, es obtenido el costo mínimo y la longitud de tiempo entre órdenes, el cual es dado por:

$$T_j^* = \sqrt{2k_j / \sum_i h_{ij} r_{ij}}$$

La cantidad esperada por que el inventario puede exceder el stock de protección en el final del periodo **t** es dado por:

$$d_{ijt} = I_{ij,\, t-1} - r_{ijt} - S_{ijt}$$

Entonces ***la cantidad tentativa a ordenar*** para el artículo **i**, familia **j**, es dada por.

$$q_{ii}^* = \max.\{ T_j r_{ij} - d_{ij} ,\ 0 \}$$

El término $T_j\ r_{ij}$ es la cantidad normal a ordenar. Deduciendo la d_{ijt} que resulta en todos los artículos el mismo suministro de stock de protección antes citado. El término medio simple **max** o **cero.**

Etapa 3: *ajuste de cantidades a ordenar tentativas que satisfagan el plan de producción.* Usando las cantidades tentativas a ordenar resulta una salida total expresada en las mismas unidades que el plan de producción de:

$$q^{*}_{total} = \sum_{i\,j} q^{*}_{ij}\, m_{ij}$$

Donde $\mathbf{m_{ij}}$ = es un factor que da el número de unidades del plan de producción para una unidad de artículo **i**, familia **j**.

El ajuste final a las cantidades a ordenar es dado por:

$$q^{*}_{ij}\,(\mathrm{adj}) = q^{*}_{ij} + r_{ij}(P - q^{*}_{total}) / (\sum_{ij} r_{ij}\, m_{j})$$

Donde

P = total de salidas en el plan de producción para el período **t**.

Además se tiene que el tiempo de suministro es proporcionado por cada uno de los artículos a ordenar. Si la demanda proyectada varía de período a período, la demanda puede ser adicionada o deducida por periodo hasta que el:

$$q^{*}_{total} = P$$

Como vehiculo de explicación del método, se tomará el caso de una empresa en la que la línea de productos consiste de tres familias, **A, B, C**. El plan de producción especifica que el nivel de producción para el periodo **t** es tomado como **P = 600**, en la tabla 1, se muestra el orden de selección de familias. Artículo 1, familia A, y artículo 1, familia B, en ambos el stock de protección permanece bajo cero a menos de que sea reaprovisionado y, entonces, **A** y **B** se tiene en el *sistema de producción maestro* para el período **t**, la familia **C** en este caso no se toma en consideración.

Los costos de llevado del inventario , preparación y factores de unidad de conversión, pueden ser usados en el cálculo de los ciclos de orden de la familia. En resumen tentativamente el ajuste final las cantidades ordenadas ajustadas son presentadas en la tabla 2.

Las cantidades tentativas a ordenar son expresadas en las mismas unidades. en resumen el plan de producción es de 864 unidades, que son 600 las unidades antes especificadas en el plan.

$$(P - q^{*}_{total}) / \sum_{ij} r_{ij}\, m_{ij}$$

Es igual a (- 0.8516). Se tiene que las cantidades de orden tentativas son ajustadas por subcontratación de 0.8516 tiempos, la tasa demandada para cada artículo obtienen las cantidades ordenadas ajustadas convertidas en las mismas unidades es en resumen el plan de producción 603, diferente solamente al plan de producción de 600 por error de redondeo.

TABLA 1.7: SELECCION DE FAMILIAS PARA EL (MPS)

FAMILIAS (1)	ARTICULO (2)	INV. INICIAL $I_{ij,t-1}$ (3)	DEMANDA r_{ijt} (4)	STOCK DE PROTECCION S_{ij} (5)	INV. FINAL ESPERADO I_{ijt} (6)	(6) - (5) d_{ijt} (7)	STOCK DE PROTECCION INFERIOR (8)
A	1	20	12	10	8	-2	*
A	2	46	16	15	30	15	
A	3	32	20	6	12	6	
B	1	28	18	12	10	-2	*
B	2	19	6	10	13	3	
C	1	35	20	10	15	5	
C	2	16	2	8	14	6	

TABLA 1.8: COSTOS, FACT. DE CONVERSION, ORDEN DE CICLOS Y CANTIDADES A ORDENAR

FAMILIA	k_j	ARTICULO	h_{ij}	T^*_j	q^*_{ij}	m_{ij}	$q^*_j\, m_{ij}$	q^*_{ij} (adj)
A	500	1	1	4	50	3	150	40
A		2	2		49	2	98	35
A		3	1		74	4	296	57
B	200	1	4	2	38	7	266	23
B		2	5		9	6	54	4
TOTAL							864 **	

** $q^*_{total} = 864$

Karen Aardal y Torbjon Larsson (1990) describen y evalúan el problema de planeación de la produccion, para ello emplean un procedimiento heurístico que les permite determinar buenas soluciones factibles.
El problema modelado es un PLEM, presenta una estructura jerárquica donde la producción de artículos son agregados en familias, y las familias en tipos de productos. La estructura empleada en la formulacion del problema es la definida por Bitran y Hax (1977), el criterio de solucion es el empleado por Graves.

1.5. CONCLUSION

En el presente capitulo, se partio de la definición del concepto de producción, se describe y se analizan los enfoques más importantes publicados en la literatura que son usados para hacer planeación de la produccion, destacandose los enfoques de planeación de la producción agregada, y la planeación de la produccion jerárquica. De la presentación anterior se tiene que el enfoque jerárquico es altamente eficiente para problemas medianos y de gran escala, ya que se puede manejar el caso multiproductos haciendo agrupaciones a nivel de productos, familias y tipos a diferencia de los otros enfoques que son restrictivos para el manejo eficiente de los problemas citados anteriormente.

CAPITULO 2

2. TECNICAS DE SOLUCION

2.1. INTRODUCCION

El modelo de planeación de la producción tratado en el presente trabajo es clasificado dentro del tipo de estructuras llamadas problemas de gran escala, estos son definidos *como aquel tipo de problemas matemáticos que contienen en su formación un número muy grande de variables y restricciones*. Como estrategia de solución se emplean técnicas de descomposición; son métodos que permiten la solución de problemas grandes a través de la solución de una secuencia de problemas de pequeñas dimensiones.

Las técnicas clásicas usadas para abordar este tipo de problemas son las siguientes:

- Técnicas de descomposición de Benders.
- Técnica de Dantzig - Wolfe.
- Técnica de Descomposición Cruzada

Estas son consideradas en la literatura actual como aptas para resolver problemas de pogramación lineal entera mixta eficientemente, incluyendo el caso de problemas de gran escala, que son los que más se encuentran en la práctica.

Se tiene además que la formulación del problema depende tambien del juicio humano: se formula el problema como un todo. y luego se desacopla analiticamente en subproblemas. Como una consecuencia, las siguientes diferencias se encuentran en los metodos aplicados practicamente en un gran número de empresas.

En este apartado se presentan las metodologías clásicas susceptibles de usar hoy día en la solucion de problemas de gran escala, que presentan estructuras como la de la Programación Lineal Entera Mixta (**PLEM**), las técnicas más usadas son las de descomposicion de Benders y la de Dantzig - Wolfe, aún no muy difundida la de Descomposición Cruzada, que bien podría en trabajos posteriores, usarse como extensión en la solución de problemas que presentan estructuras similares al tratado en este trabajo.

Las técnicas de descomposicion pueden presentar un balance adecuado entre la necesidad práctica de descomponer un problema complejo en subproblemas You, J. (1990) , que son más fáciles de entender y la necesidad de tener un modelo global agregado que hace posible tener soluciones óptimas y consistentes, aunque sin mucho detalle. El presente trabajo puede ser tomado como como un intento de aplicar eficientemente este tipo de metodología en el campo de la industrialización forestal maderable de México. Las técnicas antes citadas son establecidas teóricamente a continuación.

El Capitulo se desarrolla como sigue: en la sección 2.1., se presenta una introducción del capitulo; en la sección 2.2., se presenta la técnica de descomposición de Benders usada en la solución de problemas de PLEM y sus propiedades; en la sección 2.3., se describe la técnica de Dantzig - Wofe y se establece que es una técnica dual de la de Benders; en la seccion 2.4., se presenta la técnica de descomposición Cruzada.

2.2. TECNICA DE DESCOMPOSICION DE BENDERS

En Investigacion de Operaciones, los métodos de solucion asociados a problemas con variables continuas son muy populares debido a la aplicación de tecnicas de cálculo diferencial y propiedades de convexidad de las funciones involucradas. No ocurre lo mismo con problemas donde las variables de decisión adquieren valores discretos.
En este caso, la alternativa seria resolver el problema como si fuera continuo y posteriormente redondear la solución. Dicha técnica resulta inadecuada y se tienen diversos metodos para resolver directamente este tipo de problemas como lo son las técnicas de ramificación y acotamiento Gup (1985), o los metodos de descomposición.

Se tiene que en 1962 J.F. Benders, propone un método de descomposicion para resolver problemas de optimización donde se involucran diferentes tipos de variables continuas y discretas, como lo es el caso de la programación entera mixta.

Para la clase de problemas con estructura de un problema lineal entero mixto, la idea es fijar los valores de las variables discretas y reducir el problema dado a un problema de programación lineal simple, parametrizado por el valor de las variables discretas.

[Salkin, et al. (1989)] El algoritmo de partición trabaja resolviendo sucesivamente un problema lineal y un problema entero, el problema lineal produce un punto extremo o un rayo extremo y una restricción simple para el problema entero. Tambien el valor de *la solución óptima del problema de programación lineal* proporciona *una cota superior* para la solución óptima del problema entero mixto
Cuando se resuelve el problema entero, se tiene que son equivalentes a los problemas entero mixtos cuando se tienen todas las restricciones, producen una cota inferior no decreciente.

Cuando las dos cotas coinciden, la solución entera mixta óptima es encontrada y el proceso termina.

La metodología empleada en la solución de este tipo de problemas entero mixto, en los que se ubica eficientemente la solución del problema de producción, caso del presente estudio, es descrita a continuación.

Tomese el problema:

$$\begin{aligned} \text{Min.}\quad & c\,x + d\,y \\ \text{s.a.}\quad & Ax + Dy \geq b \\ & x \geq 0,\ y \geq 0 \\ & x \text{ entera.} \end{aligned} \qquad (1)$$

Donde **A** es una matriz (m x n), **D** es una matriz (m x n´), y los otros términos son vectores apropiados **m, n** ó **n´**. Si se permite que **X** denote la fijación de todos los vectores enteros no negativos factibles **x**, entonces (1) puede ser escrito como:

$$\underset{x \in X}{\text{Min.}}\ (\, c\,x + \text{Min.}\ (dy : Dy \geq b - Ax,\ y \geq 0)) \qquad (2)$$

Para un **x** fijo, el problema de minimización del paréntesis de (2) interno es un problema lineal, se presenta como:

$$\begin{aligned} \text{Min.}\quad & d\,y \\ \text{s.a.}\quad & Dy \geq b - Ax \\ & y \geq 0 \end{aligned} \qquad (3)$$

su dual es:

$$\begin{aligned} \text{Max.}\quad & u\,(b - Ax) \\ \text{s.a.}\quad & u\,D \leq d \\ & u \geq 0 \end{aligned} \qquad (4)$$

Si el conjunto $U = \{\, u : uD \leq d,\ u \geq 0\}$ es vacío, el problema dual (4) es infactible, entonces y por teoría de dualidad el problema primal (3) no tine solución factible o es no acotado. Para el caso de problemas reales se asume que (1) es acotado, entonces se tiene que **U** tiene un número finito de puntos y rayos extremos. Se denotarán los puntos extremos por $\mathbf{u}^p (p = 1, 2, \ldots, P)$ y las direcciones de los rayos extremos por $\mathbf{v}^s$ ($s = 1, 2, \ldots, S$).

Si (4) es no acotado, por la teoria de dualidad de la programación lineal se tiene que (3) tendrá solución no factible, de lo que se concluye que (1) no tiene solución para **x**, por lo tanto,

$$v^s (b - Ax) \leq 0 \; , \quad (s = 1, \ldots, S) \tag{5}$$

Proporciona condiciones necesarias y suficientes en **x** para que las soluciones factibles **y** existan para el problema entero mixto.

El conjunto **X** de vectores factibles **x** puede ser definido como,

$$v^s (b - Ax) \leq 0, \quad (s = 1, 2, \ldots, S), \text{ y } x \geq 0 \text{ y entera.}$$

Tambien, para todo **x** $\in$ **X**, la minimización interna en (2) es igual al máximo del problema dual (4). Entonces el problema entero mixto es,

$$\begin{aligned} &\underset{x}{\text{Min.}} \left(c\,x + \underset{p=1,\ldots,P}{\text{Max.}} \; u^p (b - A\,x) \right) \\ &\text{s.a.} \quad v^s (b - A\,x) \leq 0, \qquad (s = 1, \ldots, S), \\ &\qquad\quad x \geq 0 \text{ y entera.} \end{aligned}$$

Escribiendo,

$$z = c\,x + \underset{p=1,\ldots,P}{\text{Max.}} \; u^p (b - A\,x).$$

Se tiene que:

$$z \geq c\,x + u^p (b - A\,x) \text{ para } p = 1, \ldots, P$$

y el problema entero mixto es equivalente al problema entero.

$$\text{Min} \quad z$$

$$\begin{aligned} \text{s.a.} \quad & z \geq c\,x + u^p\,(b - Ax)\,; \ (p = 1,2,\ldots, P) \\ & 0 \geq v^s\,(b - A\,x)\,; \quad (s = 1,\ldots, S) \\ & x \geq 0 \ \text{y entera.} \end{aligned} \tag{6}$$

Para el caso se hace la transformación de un problema entero mixto a un problema entero.

2.2.1. DESCRIPCION DEL ALGORITMO DE PARTICION

Se tiene, que el poliedro U, tiene un gran número de puntos extremos, y por lo tanto es virtualmente imposible generar todas las restricciones del problema entero (6). Más aún esta derivación sugiere un procedimiento para resolver el problema entero mixto. Es importante hacer notar que para un vector entero fijo no negativo de **x** se puede resolver el problema lineal (4). Este problema es más restringido que el problema entero mixto, el valor es una solución máxima cuando se adiciona a **c x** la cual tine una cota superior en la solución óptima del problema entero mixto.
(Si el problema (4) es una solución no acotada, este valor puede ser también infinito). Además, el problema (4), cuando se resuelve, revela un punto extremo de U o la dirección de uno de estos rayos extremos, y entonces se tiene una desigualdad para el problema entero (6).
Supongase que el problema entero es resuelto con una de estas restricciones. Esta solución óptima es una cota inferior en la mejor solución en el problema entero mixto. También produce un vector entero no negativo **x** para el problema (4), que, cuando se resuelve, produce un nuevo punto extremo o rayo de dirección, entonces produce una segunda desigualdad para el problema entero.

El problema entero, ahora con dos restricciones, es resuelto y se tiene una buena cota inferior cercana al óptimo y un vector no negativo **x** es encontrado.

Con el nuevo valor para **x**, el problema lineal (4) puede ser resuelto, y más adelante, el proceso termina cuando la cota inferior es igual a la cota superior.

Si se encuentra el valor óptimo del vector y, el problema (3) es resuelto con **x** igual a su valor óptimo. z^u, (z^l) denotan la cota superior (inferior) para la solución óptima del problema entero mixto. La secuencia de solución del método es descrita como:

Etapa 1: (iniciación), seleccione un valor entero no negativo para el vector **x**, por decir $\bar{x}$, y fije z^u, (z^l) arbitrariamente grande (pequeño). Ir a la etapa 2.

Etapa 2: (fase de programación lineal), resuelva el problema lineal.

$$\begin{array}{ll} \text{Max.} & u(b - A\bar{x}) \\ \text{s.a.} & u \in U = \{u:\ uD \leq d,\ u \geq 0\} \end{array} \qquad (4)$$

Con **x** fija en $\bar{x}$, esto produce un punto extremo óptimo $\mathbf{u}^p$ o identifica un rayo de dirección extrema $\mathbf{v}^s$ por lo que (3) es no acotado.
Entonces en el caso de punto extremo, reemplazar el valor de z^u por $c\overline{x} + u^p(b - A\bar{x})$ siempre que. $z^u > c\bar{x} + u^p(b - A\bar{x})$. Ir a la etapa 3.

Etapa 3: (fase de programación entera), resolver el problema entero.

$$\begin{array}{lll} \text{Min. } z & & \\ \text{s.a.} & z \geq cx + u^p(b - Ax), & (p = 1, \dots, P^l) \\ & 0 \geq v^s(b - Ax), & (s = 1, \dots, S^l) \\ & x \geq 0 \text{ y entera.} & \end{array} \qquad (2.6.1.)$$

Donde $\mathbf{p}^l$ ($\mathbf{s}^l$) es el número de puntos extremos (rayos extremos) encontrados en la etapa 2., el problema (2.6.1) es una relajación del problema (6) y el valor de la solución en el problema (2.6.1) es una cota inferior en la solución óptima del problema lineal entero mixto.

Haga $\mathbf{z}^l$ es igual al valor minimal de **z** y $\bar{x}$ es igual al vector óptimo **x**. Ir a la etapa 4.

Etapa 4: (terminación de la prueba), si $z^l < z^u$, ir a la etapa 2. En otro caso ($z^l = z^u$) , x es óptima. En este caso resolver el problema (3).

$$\begin{array}{ll} \text{Min.} & d\,y \\ \text{s.a.} & D\,y \geq b - A\,x \\ & y \geq 0 \end{array} \tag{3}$$

Se obtiene el óptimo y del vector $\bar{y}$. Entonces $x = \bar{x}$, y
$y = \bar{y}$, y $z^l = z^u = c\,\bar{x} + d\,\bar{y}$

Resuelve el problema entero mixto entonces termina.

2.2.2. CONVERGENCIA DEL METODO

En la realización de la prueba de convergencia se asume que el poliedro convexo **U** es acotado. Entonces se tiene un número finito de puntos extremos, es suficiente para mostrar que en cada paso a través de la etapa 2 se produce un nuevo punto extremo $\mathbf{u^p}$ de **U** hasta que la solución óptima del problema entero mixto es encontrada.

Si **U** es no acotada esto puede ser posible inicialmente enumerando los rayos extremos y adicionando las desigualdades de rayos resultantes $v^s(b-A\,x) \leq 0$, que hacen suficientemente cerrado U, con las restricciones $A\,x + D\,y \leq b$. Otra posibilidad es introducir la desigualdad $\sum_t U_t \leq M$, donde **M** es un número positivo muy grande. En las restricciones $(u_i \leq d)$.

En este caso, **U** es acotada con un número incremental de puntos extremos, muchos de los componentes toman valores numéricos muy grandes.

Supongase que el primer **t** ($t \geq 1$) puntos extremos del poliedro U, dados por $\mathbf{u^1},\ldots,\mathbf{u^t}$ que son generados por el problema (4) en la etapa 2 son iguales. Entonces el problema entero en la etapa 3 es.

$$\begin{aligned} &\text{Min. } z \\ &\text{s.a. } \quad z \geq c\,x + u^i(b - A\,x)\ , \quad (i = 1,\dots,t) \\ &\qquad\quad x \geq 0 \text{ y entera.} \end{aligned}$$

Sea la solución óptima del problema $\mathbf{z^l}$, $\bar{x}$. Que es, para algún $\mathbf{k}$ ($1 \leq k \leq t$).

$$z^l = c\,\bar{x} + u^k(b - A\,\bar{x}) \geq c\,\bar{x} + u^i(\,b - A\,\bar{x}); \ (i = 1,\dots,t) \qquad (7)$$

z^les la cota inferior para la solución óptima $\mathbf{z^0}$ en el problema entero mixto, se tiene que $z^0 \geq z^L$, para (7).

$$u^k\,(b - A\,\bar{x}) \ \_\ z^0 - c\,\bar{x} \qquad (8)$$

Ahora sobre la revisita de la etapa 3, problema (4) maximice $u(b - A\,\bar{x})$, para $u \in U$ es resuelto.

Si $\mathbf{u^{t+1}}$ es un vértice de **U** que **maximiza** $\mathbf{(b - A\,\bar{x})}$, se tiene por teoría de dualidad de la programación lineal que:

$$u^{t+1}\,(b - A\,\bar{x}) = d\,\bar{y}. \qquad (9)$$

Donde $\bar{y}$ es la solución óptima del problema (3).

Como $(\bar{x}, \bar{y})$ es una solución para el problema entero mixto, $z^u = c\,\bar{x} + d\,\bar{y} \geq z^0$; equivalentemente $z^0 - c\,\bar{x} \leq d\,\bar{y}$.

Combinando la ultima desigualdad con (8) y (9) se tiene:

$$u^k\,(b - A\,\bar{x}) \leq z^0 - c\,\bar{x} \leq d\,\bar{y} = u^{t+1}(b - A\bar{x}) \qquad (10)$$

Ahora si la desigualdad tiene, $z^0 - c\,\bar{x} = d\,\bar{y}$, ó $(\bar{x}, \bar{y})$ resuelve el problema entero mixto, es importante hacer notar que $\mathbf{z^l = z^u}$, y los cálculos del algoritmo terminan, entonces $\mathbf{z^l - c\,\bar{x} = u^k\,(b - A\,\bar{x}) = z^0 - c\,\bar{x} = z^u - c\,\bar{x}}$, **ó** $\mathbf{z^l = z^u}$, otro caso.

$$u^k(b - A\,x) < u^{t+1}(b - A\,x) \qquad (11)$$

En el caso que $\mathbf{u^k \neq u^{t+1}}$ para la desigualdad (7),

$u^k(b - A\,x) \geq u^i(b - A\,x)$, $(i = 1,\dots, t)$; por (11) se tiene que:

$u^i(b - A\,x) < u^{t+1}(b - A\,x)$, $(i = 1,\dots, t)$ ó $u^{t+1} \neq u^i$, $(i = 1, \dots, t)$.

y entonces, a menos que la solución óptima entera mixta es encontrada, un nuevo punto extremo es generado en cada tiempo y el problema (4) es resuelto.

Entonces en el caso más malo, todos los puntos extremos son enumerados y los equivalentes a problemas enteros son resueltos, lo que proporciona que el algoritmo llegue a una solución.
La prueba de convergencia muestra tambien que cuando el problema entero mixto es resuelto, se tiene una solución optima del problema entero, en la etapa (3) no puede ser repetido el mismo. Por suposición de lo contrario se tiene que $\bar{x}$ resuelve el problema entero dos veces. Esto es menor que $u(b - A\,\bar{x})$, la función objetivo para el problema (4), aparece doblemente, y esta region factible $\mathbf{U}$ es independiente de $\mathbf{X}$, puntos extremos óptimos $\mathbf{u^l(1 \leq l \leq t)}$ y $\mathbf{u^{t+1}}$ es encontrado que:

$$u^l(b - A\,\bar{x}) = u^{t+1}(b - A\,\bar{x}) \qquad (12)$$

Usando el mismo argumento se puede mostrar que existe un indice $\mathbf{k}$,$\mathbf{(1 \leq k \leq t)}$ tal que:

$$u^k(b - A\,\bar{x}) \geq u^i(b - A\,x), \quad (i = 1, \dots, t) \qquad (13)$$

y tambien que:

$$u^{t+1}(b - A\,\bar{x}) \geq u^k(b - A\,x) \qquad (14)$$

Combinando las desigualdades (13) y (14) y usando (12) se tiene:

$$u^{t+1}(b - A\,\bar{x}) = u^{k}(b - A\,x) \qquad (15)$$

Por lo que por medio de la expresión (10) con $\bar{x}$ y la $\bar{y}$ resultante resuelve el problema entero mixto.

Se muestra que cuando se obtiene la solución óptima del entero mixto, es obtenido un nuevo punto extremo $\mathbf{u}^{i}$ de U, es generado después de cada visita a la etapa 2. Este es inferior a cada vector no óptimo $\mathbf{x}$ que resuelve el problema entero apareciendo en la etapa 3, el máximo de $\mathbf{u}(b - \mathbf{A}\,\mathbf{x})$ para $\mathbf{u} \in U$ ocurre en diferente vértice $\mathbf{u}^{i}$. Esto representa una situación imposible.
Finalmente se hace notar que cuando la cota superior $\mathbf{z}^{u}$ decrece, una restricción no redundante $\mathbf{z} \geq \mathbf{c}\,\mathbf{x} + \mathbf{u}^{i}\,(\mathbf{b} - \mathbf{A}\,\mathbf{x})$, es introducida en el problema entero en la etapa 2.

2.3. DESCOMPOSICION DANTZIG - WOLFE

La descomposicion Dantzig- Wolfe para problemas lineales puede ser expresada en términos del problema lineal.

$$\underset{x \geq 0}{\mathrm{Max.}}\ c^t x;\ \text{s.a.,}\ \ A x \leq b,\ \bar{A} x \leq \bar{b} \qquad (1)$$

Donde se han dividido arbitrariamente las restricciones en dos grupos. Con la definición siguiente.

$$X \stackrel{\Delta}{=} \{x \geq 0 : A x \leq b\}. \qquad (2)$$

Se puede escribir (1) como:

$$\underset{x \in X}{\mathrm{Max.}}\ c^t x,\ \text{s.a}\ :\ \bar{A} x \leq \bar{b} \qquad (3)$$

Entonces **X** es un politope convexo, que admite una linealización interna exacta usando solamente un número finito de puntos. Usando esta representación para **X**, se obtiene un nuevo *problema lineal maestro* con un gran número de variables, en el que las restricciones pueden ser aplicadas en la forma del método simplex. En la solución se asume que **X** es no vacia y acotada. Entonces **X** puede ser representado en términos de los puntos extremos $(x^1, x^2, \ldots, x^p)$, y (3) puede ser escrito en el *problema maestro lineal equivalente*.

$$\underset{\alpha \geq 0}{\mathrm{Max.}}\ c^t\Big(\sum_{j=1}^{p} \alpha_j x^j\Big);\ \text{s.a.}\ \ \sum_{j=1}^{p} \alpha_j = 1,\ \ \bar{A}\Big(\sum_{j=1}^{p} \alpha_j x^j\Big) \leq \bar{b}. \qquad (4)$$

El método simplex para este problema corresponde a la restricción con respecto de las restricciones $\alpha \geq 0$.
Se tiene que la operación de precios puede ser mecanizada, por lo que se usa la terminología general de programación lineal. Las condiciones de optimalidad en la iteración general es $\mathbf{u} \geq \mathbf{0}$, entonces,

$$u_0 + u^t A^t x^j - c^t x^j \geq 0, \quad j = 1, \ldots, p. \tag{5}$$

Donde $\mathbf{u}_0$ y el vector $\mathbf{u}$ son los *multiplicadores corrientes simplex*, la ecuación (5) es equivalente a.

$$u_0 + \min_{1 \leq j \leq p} \{(u^t \bar{A} - c^t) x^j\}] \geq 0$$

ó, entonces $(x^1, x^2, \ldots, x^p)$ en el espacio X, ó

$$u_0 + \min_{x \in X} (u^t \bar{A} - c^t) x] \geq 0 \tag{6}$$

El problema lineal en esta expresión es un remplazamiento válido para el mínimo finito en las expresiones previas por que el mínimo de una función lineal sobre **X** ocurre en un punto extremo.
Entonces se observa que la prueba de optimalidad con el método simplex es aplicado a (4). Si cualquier $\mathbf{u} \geq \mathbf{0}$ en (6), se toma una variable no básica preferida que satisface el criterio usual para la entrada de la variable, la cual es obtenida automáticamente: si existe violación en $\mathbf{u} \geq \mathbf{0}$, se introduce la correspodiente variable de holgura; si en (6) se introduce la variable α_{j0}, donde $\mathbf{x}^{j0}$ es una solución óptima básica factible del problema lineal (6) (los coeficientes de la función extrema de α_{j0} es $\mathbf{c}^t\, \mathbf{x}^{j0}$, y la columna de coeficientes tecnológicos es unitaria mostrada por $\bar{A}\, x^{j0}$). Lo cual permite la aplicación del método simplex en (4).

En cada iteración se requiere resolver el subproblema lineal en (6). Esta aproximación puede presentar una ventaja sobre la aplicación directa del método simplex en (1) cuando el subproblema tiene una estructura especial. Por ejemplo si (1) es un problema de transporte con restricciones adicionales, entonces el subproblema se hace un problema de transporte, si Λ se toma que contiene restricciones adicionales. Otro ejemplo es el caso en que **A** es un block - diagonal, para el subproblema se separan dentro de k problemas lineales pequeños e independientes. En general, se selecciona un grupo de restricciones (en términos de **A** y Λ) que se aísla en una estructura especial, entonces explotando esta estructura y tratándola con (6). Dantzig en principio no considera la versión no lineal de (3), es decir se tiene.

$$\operatorname*{Max}_{x \in X} f(x); \text{ s.a. : } g_i(x) \leq b_i \text{ , } i = 1, \ldots, m. \tag{7}$$

Donde **X** es convexa, **f** es concavo en **X**, y $\mathbf{g_i}$ es convexo en **X**. La aproximación de Dantzig - Wolfe para este problema presenta lo siguiente. Sea **f** y todo $\mathbf{g_i}$ el cual puede ser aproximado por linealización interna sobre una base arbitraria $(x^1, \ldots, x^n)$ en **X**, (en principio, es mínimo) para el problema maestro lineal siguiente.

$$\begin{aligned} &\operatorname*{Max}_{\alpha \geq 0} \sum_j \alpha_j f(x^j); \\ &\text{s.a.} \quad \sum_j \alpha_j = 1 \\ &\qquad \sum_j \alpha_j g_i(x^j) \leq b_i ; \; i = 1, \ldots, m \end{aligned} \tag{8}$$

En principio se dice por que no se quiere evaluar actualmente **f** en cada $\mathbf{g_i}$ en la base en cada punto . Por lo que es natural resolver (8) con las restricciones $\alpha \geq 0$ es el candidato para la restricción a igualdad (donde α_j es restringida a cero, los valores $\mathbf{f(x^j)}$ y $\mathbf{g_i(x^j)}$ no son necesarios). Esto es obtenido con el método simplex, buscando asegurar que los problemas restringidos son verdaderamente optimizados: Las variables de holgura corresponden a las restricciones de $\mathbf{g_i}$ dando prioridad sobre la estructura de las variables en que se determina que las variables tienen una base entera.

Toda solución factible de (7) puede ser usada para encontrar la solución básica inicial, y en la iteración general el criterio de optimalidad en problema es $\mathbf{u_i \geq 0}$ $\mathbf{(1 \leq i \leq m)}$ y:

$$u_0 + \sum_{i=1}^{m} u_i\, g_i(x^j) - f(x^j) \geq 0, \ \forall\ j \qquad (9)$$

Donde (u_0, u_1, ..., u_m) son los multiplicadores simplex corrientes. Se asume que $\mathbf{u_i} \geq \mathbf{0}$ $(\mathbf{1} \leq \mathbf{i} \leq \mathbf{m})$. Se tiene que (9) está íntimamente relacionada con el problema convexo siguiente.

$$\underset{x \in X}{\mathrm{Min}} \ \sum_{i=1}^{m} u_i\, g_i(x) - f(x) \qquad (10)$$

Si $\mathbf{u_0}$ más el valor óptimo de este problema es no negativo, en (9) toma la solución óptima de (7) en este sentido ($x^* = \sum_j \hat{\alpha}_j x^j$, donde $\hat{\alpha}$ es la solución corriente óptima de (8)); en otro caso el óptimo o solución cercana al óptimo x de (10) puede ser adicionada a la base explícita corriente por incorporación de la correspondiente α_j dentro de la base en el camino usual después de la evaluación de $f(\hat{x})$ y $g_i(\hat{x})$. En la práctica, termina tomando los valores corrientes de la aproximación de la solución óptima de (7) - la cantidad $f(\sum_j \hat{\alpha}_j x_j)$ aproximadamente cerrada, demuestra la *cota superior* para el valor óptimo verdadero.

$$\sum_{i=1}^{m} u_i b_i - \underset{x \in X}{\mathrm{Min}} \left[\sum_{i=1}^{m} u_i\, g_i(x) - f(x)\right] \qquad (11)$$

Esta aproximación es particularmente atractiva cuando la estructura es tal que (10) es relativamente tratable por comparación con (7); por ejemplo, cuando **X** es un conjunto abierto y **f** y $\mathbf{g_i}$ son diferenciables, o cuando (10) es separable dentro de subproblemas severamente independientes.

En una variante, es interesante observar que la linealización interna no requiere de aplicar todas las funciones no lineales de (7). Una ventaja puede ser ganada al mismo tiempo por linealización interna solamente a un subconjunto de funciones no lineales, dado como $\mathbf{g_1}$, ... , $\mathbf{gm_1}$ $(\mathbf{m_1} < \mathbf{m})$. Entonces en vez de (8) se tiene el *problema maestro cóncavo*.

$$\begin{aligned} &\operatorname*{Max}_{\alpha \geq 0} \; f(\sum_j \alpha_j x^j) \\ &\text{s.a.} \quad \sum_j \alpha_j = 1 \\ &\qquad \sum_j \alpha_j\, g_i(x^j) \leq b_i, \; i = 1, \ldots m_1 \\ &\qquad g_i(\sum_j \alpha_j x^j) \leq b_i, \; i = m_{1+1}, \ldots m \end{aligned} \tag{12}$$

Nuevamente se aplica con solo la restrición de no negatividad $\alpha \geq 0$, las cuales son candidatas de la restricción de igualdad El método simplex no puede ser adaptado grandemente con este proposito, entonces (12) no es un problema lineal. La implantación requiere un algoritmo de programación cóncavo para la solución de versiones restringidas de (12). Se requiere la determinación de los precios $\mu^s{}_j$ para todo j en **S**, además donde **S** es el conjunto corriente de índices para que ###$_j$ sea restringida al valor cero. Sea α^s la solución óptima en (12) con las restricciones adicionales $\alpha = 0$ para $j \in S$, y sea $u^s{}_0, u^s{}_1, \ldots, u^s{}_m$ los cuales son asociados a multiplicadores óptimos. Entonces asuma todas las funciones como contínuas diferenciables, el precio $\mu^s{}_j$ asociado con $\alpha_j = 0$ es dado para todo $j \in$ **S** por.

$$\mu^s{}_j = u^s{}_0 - \nabla \;\; f(x^s)\, x^j + \sum_{i=1}^{m_1} u^s{}_i\; g_i(x^j) + \sum_{i=m_1+1}^{m} u^s{}_i\; \nabla \;\; g_i(x^s) x^j, \tag{13}$$

Donde:

$$x^s \cong \sum_{j \notin S} \alpha^s{}_j\, x^j \tag{14}$$

Esto muestra que el problema de precio puede ser resuelto por la optimización convexa ($u^s{}_i \geq 0$) el subproblema.

$$\operatorname*{Min}_{x \in X} \; - \nabla \;\; f(x^s) x + \sum_{i=1}^{m_1} u^s{}_i\; g_i(x) + \sum_{i=m_1+1}^{m} u^s{}_i\; \nabla \;\; g_i(x^s) x \tag{15}$$

Comparando con (15). Si **f** es linealizada, el primer término de **max.** de (15) puede ser - **f(x)**.
Todas las restricciones dadas pueden ser incorporadas dentro de **X**, sea **f** la misma que puede ser linealizada internamente, depende principalmente de la disponibilidad de algoritmos eficientes para las versiones resultantes de (15) con $\alpha = 0$ para **j** $\in$ **S**. Se tiene que la descomposición de Dantiz-Wolfe y Benders son duales uno del otro.

2.4. DESCOMPOSICION CRUZADA

Existen varios métodos para dar solución a problemas de Programación Entera Mixta, los cuales son basados en la **descomposición del problema primal o del dual**, que producen ,respectivamente, un algoritmo de descomposición de Benders y un Algoritmo de Enumeración Implícita con cotas calculadas vía Relajación Lagrangeana. Estos métodos explotan ambos la estructura primal o dual del problema. Un método que permite aprovechar simultáneamente ambas estructuras, es el conocido como Descomposición Cruzada. Este presenta profundas relaciones entre la descomposición primal y dual, esto implica que más restricciones pueden ser incluidas en la Relajación Lagrangeana (proporciona una brecha de dualidad cero). Si la relajación de Programación Lineal no tiene brecha de dualidad, solamente un corte de Benders es requerido para verificar optimalidad.

2.4.1. EL PRINCIPIO DE LA DESCOMPOSICION CRUZADA

El algoritmo de descomposición dual resuelve sucesivamente un *Subproblema Dual y un Problema Maestro* hasta que el óptimo es obtenido y verificado.
El Subproblema es obtenido por la toma de la Relajación Lagrangeana del problema original relativo a muchas restricciones. Cada iteración consiste de:

1).- Selección de un nuevo conjunto de Multiplicadores de Lagrange (por el problema maestro dual).

2).- Resolver el problema dual para los valores dados de los multiplicadores.

El Primal o Método de Descomposición de Benders es introducido después que ha sido desarrollado el Método de Descomposición de Dantzig - Wolfe. Ambos métodos son pares duales, es decir , si se aplica el algoritmo de Benders a problemas de programación lineal pura, coincide con el algoritmo de descomposición de Dantzig - Wolfe que es aplicado al dual de este problema.

El Primal o Subproblema de Benders es una restricción del problema original cuando muchas de las variables primales tienen fijos sus valores. En cada iteración del algoritmo de descomposición primal, estos valores [illegible] justados por el problema maestro.

Se tiene que el principio de descomposición en su forma primal o dual ha proporcionado algoritmos eficientes para muchos problemas de Programación Entera Mixta. La técnica permite tomar ventaja de la estructura especial del problema mediante la solución de una secuencia de subproblemas sencillos.

La idea básica de la ***Descomposición Cruzada*** es usar ambos Subproblemas en un procedimiento simple de descomposición que procede en general de la siguiente forma:

ETAPA 1: INICIO.
Seleccionar valores iniciales para los Multiplicadores de Lagrange y fijar el correspondiente subproblema dual.

ETAPA 2:
Resolver el subproblema dual (SD). Ejecutar las pruebas de convergencia CT_P: parar, o ir a la etapa 4, o establecer el correspondiente problema primal de la solución óptima del actual (SD) subproblema dual, e ir a la etapa 3.

ETAPA 3:
Resolver el subproblema primal (SP). Ejecutar la prueba de convergencia CT_P: parar, o ir a la etapa 4, ó establecer el correspondiente subproblema dual para la solución óptima del actual (SP) e ir a la etapa 2.

ETAPA 4: PROBLEMA MAESTRO.
Encontrar nuevos valores para los Multiplicadores de Lagrange y para las variables primales que han sido fijadas en (SD) o (SP). Establecer el correspondiente subproblema e ir a la etapa respectiva 2 ó 3.

Las pruebas de convergencia CT_P y CT_D controlan la secuencia del subproblema primal y dual problema maestro.

2.4.2. DEFINICIONES Y NOTACION

Cosidérese el problema de Programacion Lineal Entera Mixta:

(P)

$$\min_{x \in S} \; c\,x$$
$$\text{s.a.} \quad A\,x \geq b$$

Donde **x** es un vector renglón de valores reales n-dimensional, **A** es una matriz (m x n) y **c** y **b** son vectores de dimensiones conformables; sea **S** un subconjunto de $\mathbf{R}^n$ y restringido sólamente a algunos elementos de **X** (valores) que sean enteros.
Cuando la matriz **A** es particionada con $\mathbf{n = n_1+n_2}$ y $\mathbf{m = m_1+m_2}$ el problema puede ser escrito como:

(P)

$$\min_{x \in S} \; c^1x_1 + c^2x_2$$
$$\text{s.a.} \quad A_1^1 x_1 + A_1^2 x_2 \geq b_1$$
$$A_2^1 X_1 + A_2^2 x_2 \geq b_2$$

$$\text{Donde:} \qquad A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^1 & A^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_1^2 \\ A_2^1 & A_2^2 \end{bmatrix}$$

Sea la partición de **A** tal que $\mathbf{x_2}$ respectivamente $\mathbf{A_2\ x_2 \geq b_2}$ son variables y restricciones complicadas de (P).
Entonces las restricciones de (P) por fijar x_2, tambien como la relajación de (P) al quitar $\mathbf{A_2\ x_2 \geq b_2}$, son subproblemas de (P) fáciles de resolver.

En el contexto de la Programación Entera - Mixta, las variables complicadas *son aquellas que estan restringidas a ser enteras*. Entonces el conjunto **S** es definido como:

$$S = \{ x = (x_1, x_2) : x_1 \geq 0, \; x_2 \in Z \}$$

Donde **Z** es un subconjunto del espacio $\mathbf{n}_2$- dimensional de enteros.

Se establece para todo que:

1).- El conjunto $\{ x: x_1 \geq 0, \; A x \geq b \}$ es no vacio y acotado para todas las $\mathbf{x_2} \in \mathbf{Z}$.

2).- El conjunto $\{ x: x \in S, \; A_1 x \geq b_1 \}$ es no vacio y acotado.

Tomese la siguiente metodología que será usada más adelante en el desarrollo, sea (.) un problema de optimización, v(.) es el valor de la solución óptima y F(.) es la región factible.

La relajación del problema lineal LP, $(\bar{P})$ es el problema (P) sin las restricciones enteras sobre $\mathbf{x_2}$.

La descomposición primal o de Benders es derivada por reescritura de (P) como se muestra en la figura 2.1.

MAPA DE LAS TRANSFORMACIONES PARA LA DESCOMPOSICION

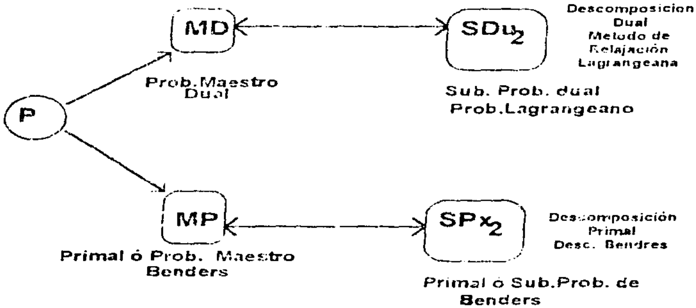


Figura 2.1

El problema (P) puede ser reescrito como:

$$\operatorname*{Min}_{x_2 \in Z}\left\{\begin{array}{l}\operatorname*{Min.}_{x_1 \ge 0}\; c^1 x_1 + c^2 x_2 \\ \text{s.a.}\quad A^1 x_1 + A^2 x_2 \ge b\end{array}\right\} \equiv \min_{x_2 \in Z} v(SP_{x_2})$$

o

$$\operatorname*{Min}_{x_2 \in Z}\left\{\begin{array}{l}\operatorname*{Max}_{u \ge 0}\; u(b - A^2 x_2) + c^2 x_2 \\ \text{s.a.}\quad u A^1 \le c^1\end{array}\right\}$$

o bien,

$$\operatorname*{Min}_{x_2 \in Z} \operatorname{Sup}\{u^t (b - A^2 x_2) + c^2 x_2 \;,\; t \in T_{PA}\}$$

o

(MP_A)

$$\min_{x_2 \geq 0} \; x_0.$$

$$\text{s.a.} \quad u^t b + (c^2 + u^t A^2)\, x_2 \leq x_0, \quad t \in T_{PA}$$

Donde:

(SPx_2)

$$\min_{x_1 \geq 0} \; c^1 x_1 + c^2 x_2.$$
$$\text{s.a.} \quad A^1 x_1 \geq b - A^2 x_2.$$

Donde $\mathbf{u^t}$, $t \in \mathbf{T_{PA}}$ son todos los puntos extremos de la (región factible) **F(DSP)** y **(DSP)** es el dual del subproblema primal **(SPx_2)**.
Por simplicidad se ha eliminado x_2 en **F(DSP)** puesto que esta región factible no depende de x_2. El problema primal maestro (MP_A) es un problema de programación entera mixta con una sola variable continua x_0.

Las restricciones del problema primal maestro son llamadas cortes originales o de Benders. Evidentemente resolviendo (MP_A) es equivalente a resolver (P) pero para esto, se requieren explícitamente a todos los puntos extremos. Entonces el procedimiento de descomposicion de Benders, sólo requiere resolver un problema maestro relajado (MP) y generar $\mathbf{u^t}$ cuando sea necesario (por resolver el subproblema primal con la solución actual para x_2 del Problema Maestro Relajado)

Como se mencionó, la descomposición dual procede similarmente. Ahora se resolvera el Dual Lagrangeano Formal de (P) relativo a $A_2\, x \geq b_2$ como se observa en el diagrama anterior.

(D)

$$\underset{u_2 \geq 0}{\text{Max.}} \left\{ \begin{array}{ll} \underset{x \in S}{\text{Min.}} & c\,x + u_2(b_2 - A_2\,x). \\ \text{s.a.} & A_1\,x \geq b_1 \end{array} \right\} \equiv \underset{u_2 \geq 0}{\text{Max.}}\ v(SDu_2)$$

o

(MD_A)

$$\underset{\substack{u_2 \geq 0 \\ u_0}}{\text{Max.}}\ u_0$$

$$\text{s.a.} \quad c\,x^t + u_2\,(b_2 - A_2\,x^t) \geq u_0\,, \quad t \in T_{DA}$$

Donde.

(SDu_2)

$$\underset{x \in S}{\text{Min.}}\ c\,x + u_2(b_2 - A_2 x).$$
$$\text{s.a.} \quad A_1 x \geq b_1$$

y $\mathbf{x^t}$, $t \in \mathbf{T_{DA}}$ son todos los puntos extremos del cápsula convexa o (contorno) convexo C_O {F(SD)}. Por simplicidad se elimina a $\mathbf{u_2}$ en F(SD) puesto que esta región factible no depende de ella. El subproblema dual (DSu_2) es comunmente llamado el Problema Lagrangeano. Una relajación lagrangeana de (P) relativa a $\mathbf{A_2x} \geq \mathbf{b_2}$, se dice que tiene brecha de dualidad cero si **v(P)-v(D) = 0**. Las restricciones del problema maestro dual (MD_A) son los llamados cortes duales.
El dual de (MD_A) es la forma familiar para el problema maestro de Dantzig - Wolfe.

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_t \geq 0} \quad & \sum_{t \in T_{DA}} \lambda_t \, c \, x^t \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{t \in T_{DA}} \lambda_t \, A_2 \, x^t \geq b_2 \\ & \sum_{t \in T_{DA}} \lambda_t = 1 \end{aligned}$$

Como en el algoritmo de descomposición primal, uno no resuelve el problema maestro completo (MD_A) sino una relajación (MD) que contiene las restricciones correspondientes a un subconjunto de $\mathbf{T_{DA}}$.
En lugar de resolver (MD) uno también puede usar optimización subgradiente para la selección de los multiplicadores de lagrange.

Restricciones válidas para el Problema Maestro pueden ser derivadas también de algún punto factible *no extremo*, solución de (DSP) y (SD). Estas restricciones son también llamadas cortes primal y dual. A pesar de que no fueron consideradas en los métodos originales de descomposición primal y dual (ellas son redundantes en (MP_A) y (MD_A), puede resultar que alguna de ellas mejore al algoritmo de descomposición. *En lo siguiente (MP) y (MD) son llamados problemas maestros (completos)* por considerar sólamente un número restringido de cortes primal y dual.

Sean los símbolos $\mathbf{T_P}$ y $\mathbf{T_D}$ que representan una iteración genérica del conjunto de índice de cortes, respectivamente, de los problemas maestros actuales relajados (MP) y (MD), el valor de la función objetivo de la mejor solución actual primal y dual es indicada, respectivamente, por v_P y v_D

2.4.3. ALGORITMO DE DESCOMPOSICION CRUZADA

Los subproblemas (SDu_2) y (SPx_2) son problemas maestros uno para el otro, es posible resolver el problema (P) al pasar de uno a otro, de esta forma, nunca se podrá terminar el algoritmo si la relajación lagrangeana tiene brecha de dualidad diferente de cero y puede ocurrir un ciclado, si no se toman precauciones. Dicho algoritmo es descrito como:

ETAPA 1: INICIO.

Hacer el contador de iteraciones $k = 0$. Hacer $\delta = 0$, $\in > 0$, $\varepsilon = 1$. Inicializar los conjuntos $T_P = \phi$ y $T_D = \phi$. Hacer $\bar{v}_D = u_0 = (+\infty)$ y $\bar{v}_D = x_0 = (-\infty)$ Seleccione $u_2^1 \geq 0$.

ETAPA 2: SUBPROBLEMA DUAL.

A).- Hacer **k = k+1**. Resolver (SDu_2^k); sea x^k una solución óptima; hacer $\mathbf{T_D} = \mathbf{T_D + k}$.

B).- Si $v_D < v(SDu_2^k)$, actualizar $v_D = v(SDu_2^k)$ y colocar $\varepsilon = 1$. Si $v_D \geq v_P$, parar: x es una solución óptima de (P). Si $v_D \geq u_0$, hacer $\delta = 1$; es decir (D) es resuelto.

C).- OPCIONAL:

Generar un conjunto de corte eficiente $T_t \subseteq Tu_2^k$; hacer $T_D = T_D + T_t$.

D).- Probar convergencia **$\mathbf{CT_P}$**: si $\varepsilon = 4$, ir al paso 4b.

OPCIONAL: si $u^t b + (c^2 - u^t A^2)\, x_2^k \geq v_P - \varepsilon$, para algún **t** $\in \mathbf{T_P - T_E}$, ir a la etapa (paso) 4b.
Otro caso, hacer $x_2^{k+1} = x_2^k$, e ir a la etapa 3.

ETAPA 3: SUBPROBLEMA PRIMAL.

A).- Hacer **k = k +1**. Resolver (SPx_2^k): sea x_1^k y u^k soluciones óptimas primal y dual: hacer $\mathbf{T_P} + \mathbf{k}$.

B).- Si $v_P > v(SPx_2^k)$, actualizar $v_P = v(SPx_2^k)$ y $\bar{x} = x^k$, y colocar $e = 1$. Si $\bar{v}_P \geq \bar{v}_D$, o $\bar{v}_P \geq \bar{x}_0$, parar: $\bar{x}$ es una solución óptima de (P).

C).- OPCIONAL: Si $\delta = 0$, generar un conjunto de corte eficiente $\mathbf{T_E} \subseteq Tx_2^k$; hacer $T_E = T_E + T_i$.

D).- Prueba de Convergencia $\mathbf{CT_P}$: Si $\delta \neq 0$, ir a la etapa 4b. Si $\varepsilon = 4$, ir a la etapa 4a.

OPCIONAL: Si $CX^t + u_2^k(b_2 - A_2X^t) \leq V_D - e$, para algún $\mathbf{t} \in \mathbf{T_D} + \mathbf{T_E}$, ir a la etapa 4a.

Otro caso, hacer $u_2^{k+1} = u_2^k$ e ir a la etapa 2.

ETAPA 4: SISTEMA MAESTRO.

A).- Resolver el problema maestro dual (MD): sea (u_0, u_2^{k+1}) una solución óptima. Hacer $\varepsilon = 1$. Si $v_D < \bar{u}_0$, ir al paso 2. Otro caso hacer $\delta = 1$.

B).- Resolver el problema maestro primal (MP): sea (X_0, X_2^{k+1}) una solución óptima. Hacer $\varepsilon = 1$. Si $v_P \leq x_0$, parar x es una solución óptima de (P); otro caso ir a la etapa 3.

CAPITULO 3

3.0. EL PROBLEMA DE PLANEACION DE LA PRODUCCION JERARQUICA.

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se trata el desarrollo teórico de la Planeación de la Producción Jerárquica, se hace una extensión a la teoría existente al respecto, tomando como punto de partida lo tratado por Bitran (1981) y se obtiene como resultado la metodología presentada para la solución del problema de la planeación de la producción del proceso de aserrio caso de aplicación mostrado en el capitulo siguiente.

El capítulo se desarrolla como sigue: en la sección 3.1., se presenta la estructura de agregación de artículos en familias y tipos, así como el modelado general del problema de interés como uno de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM); en la sección 3.2., se trata el modelado del problema de planeación de la producción, así como el desarrollo teórico de la solución mejorando las condiciones respecto a lo existente en la literatura actual; en la sección 3.3., se presenta la descripcion del algoritmo referente al problema de interés.

Se tiene que la planeación de la producción consiste en anticiparse al futuro, para la consecución eficiente y efectiva de objetivos y metas preestablecidos en el llamado horizonte de planeación (**n** períodos finitos de tiempo). El objetivo de la planeación de la producción es utilizar en forma óptima los recursos humanos, materiales y financieros para:

- Satisfacer demandas contraídas (o que se pueden contraer)
- Aprovechar oportunidades que se pudieran presentar en el mercado.
- Evitar lo no deseable referente a producción excesiva o insuficiente.

Los insumos para realizar la planeacion de la producción son.
Inventarios existentes, demandas (incluyendo aquellas cuya satisfacción se difiera a períodos futuros), pronostico de demanda, fuerzas de trabajo, capacidad de producción, materias primas, recursos financieros, politicas de costos y precios y politicas de administración.

El éxito o fracaso de un plan de producción se refleja en las cantidades producidas, los períodos de producción y entrega, el nivel de empleo de los recursos humanos (tiempos extras, capacidad ociosa, despidos, etc.), usos de los recursos materiales y financieros, utilidades, etc.

Las decisiones realizadas en los procesos de producción, entre otros, afectan a los inventarios. Se puede, por ejemplo, decidir tener grandes inventarios en épocas de demanda reducida, para utilizarlos después en épocas de gran demanda por ejemplo producir en verano para vender en navidad, o se pueden tener inventarios que correspondan a la demanda, etc.
Las políticas de planeación de la producción deben balancear los costos de grandes inventarios, con los costos de no poder satisfacer a tiempo un período.

En este apartado se presenta un procedimiento heurístico para la determinación de soluciones factibles en un problema dinámico de planeación de la producción, para el caso en que se manejan multiproductos.

La evaluación del problema es tratada dentro de la Programación Entera Mixta, en el que la producción de artículos es agregada en familias y las familias en tipos de productos, esta estructura de agregación es enmarcada dentro de la línea de investigación conocida como Planeación de la Producción Jerárquica en la que se considera que la Planeación de la Producción original es dividida dentro de una jerarquía de subproblemas, además en la estructuración de planes de producción, se considera que las partes individuales y productos finales pueden ser agregados (agrupados).

El criterio de agrupamiento de productos [Bitran (1981)] empleado es hecho en familias y estas a su vez en tipos, definidos como:

ARTICULOS: son bienes de consumo final (productos finales), demandados por los consumidores en unidad de tiempo.

TIPOS DE PRODUCTOS: son grupos de articulos (colección) de productos finales que tienen costos de producción directa similares (excluyendo el trabajo), costos de almacenamiento por unidad por periodo, y presentan el mismo modelo de demanda estacional, así como el mismo rango de producción (número de unidades que pueden producirse por unidad de tiempo).

FAMILIA DE PRODUCTOS: es representada por un conjunto de articulos dentro de un tipo tal que estos comparten una característica común, esto implica además que son grupos de artículos de productos finales que tienen un mejer costo inicial y requieren un número idéntico de las mismas partes.

En general los tipos de articulos incluyen un mismo modelo de demanda y todos los artículos pertenecen al mismo grupo, tal que un tipo puede formar una agregación de familias, para problemas de esta naturaleza, los costos de preparación son tomados por familias, los costos de tiempo extra y de almacenamiento por tipos.

El problema en estudio es modelado dentro de la Programación Entera - Mixta (PLEM) como un problema de gran escala, el problema presenta la estructura siguiente.

$$\begin{aligned} \text{Min.}\quad & c\,x + d\,y \\ \text{s.a}\quad & A\,x + D\,y \geq b \\ & x,\ y \geq 0 \\ & x \ \ \text{entera.} \end{aligned}$$

Donde en **x** se incluyendo las restricciones de integrabilidad, si **x** es fijada, el problema se convierte en uno lineal de variables continuas.
La solución de este problema puede obtenerse empleando diversos enfoques y técnicas matemáticas, una de las *aplicaciones prácticas de este tipo de modelado es aplicado en la solución del problema de planeación y calendarización de la producción.*

En el modelo de planeación de la producción, un horizonte de planeación apropiado para tomar decisiones es definido como un ciclo completo estacional que captura las fluctuaciones de la demanda. Es recomendable tomar ciclos anuales.

La problematica de planeación de la produccion consiste en el establecimiento de la cantidad de cada articulo que se produce en cada periodo y la correspondiente fuente de requerimientos.

La metodologia a emplear en la solucion del problema consiste primeramente en el reconocimiento de las diferencias existentes entre *tácticas y decisiones operacionales*.

Las Decisiones Tácticas son asociadas con la planeación de la produccion agregada en el lapso de las *Decisiones Operacionales* resueltas en los procesos de desagregación.

La estructura adoptada referente a los niveles de agregación propuestos es a nivel de: artículos, familias y tipos de productos.

Como se mencionó anteriormente la producción de artículos es agregada en familias y las familias en tipos de productos.

En general la planeación de la producción incluye muchas decisiones complejas donde las decisiones hechas son confrontadas con objetivos en conflicto, bajo la presencia de fuentes escasas.

En ete trabajo se trata una aproximación hirida la cual es aplicada al modelo de Programación Entera - Mixta considerado por Graves (1982), en vez de usar Relajacion Lagrangeana con respecto a un cierto grupo de restricciones en el modelo original, el modelo será particionado acorde con la teoría de Descomposición de Benders. Los cortes de Benders son evaluados externamente mediante un conjunto de multiplicadores de Lagrange los cuales son actualizados por optimización subgradiente, el subproblema que se requiere resolver, en esta aproximación, en el caso general es un subproblema de tamaño de lote económico sin restricción de capacidad.

3.2. EL PROBLEMA DE PLANEACION DE LA PRODUCCION

La planeación y calendarización de la producción mantiene dos objetivos.
La *función de planeación* determina las fuentes de requerimientos y cuál es el punto en el tiempo que éstos ocurren, en orden de satisfacción de la demanda agregada sobre el horizonte de planeación. También las fuentes disponibles y define el orden de satisfacción de los consumidores con productos específicos a un mínimo costo, así como la calendarización del periodo.

Como se citó anteriormente para propósitos de planeación, el producto a manufacturar es dividido en dos niveles de agregación.
El producto final es entregado a los consumidores en agregación de familias. Por lo que la necesidad de artículos es considerada en conjunto de familias cuando se hace la calendarización de la producción.

Un tipo de artículos incluidos que tienen el mismo modelo de demanda y todos los artículos pertenecen al mismo grupo, comparten una misma unidad de costo de almacenamiento de inventario. Todos los artículos que pertenecen a una familia también pertenecen al mismo tipo y entonces un tipo también puede verse como una agregación de familias.

En esta clase de modelado el problema es decidir sobre una calendarización de la producción en el nivel de familia la cual en el turno determina al inventario en el nivel tipo al final de cada periodo.

El modelado del problema deberá ser hecho en un orden que minimice la suma de los costos de tiempo extra, costos de inventario y costo de preparación, sujeto a las restricciones de capacidad y requerimientos de demanda, tal que cumpla con la estructura jerárquica tradicional, las decisiones de familias y tipos son incluidas en una formulación general del problema.

El problema matemáticamente es escrito como se muestra a continuación.

(PS)

$$Z_{PS} = \text{Min. } \sum_t (C_t O_t + \sum_i h_{it} I_{it} + \sum_j \sum_t S_{jt} X_{jt}$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in I(i)} FP_{jt} - P_{it} = 0, \ \forall\, i, t, \qquad (1)$$

$$\sum_i K_i P_{it} - O_t \leq r_t, \ \forall\, t, \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in I(i)} FI_{jt} - I_{it} = 0, \ \forall\, i, t, \qquad (3)$$

$$FP_{jt} + FI_{j,t-1} - FI_{jt} = d_{jt}, \ \forall\, j, t, \qquad (4)$$

$$FP_{jt} - m_{jt} X_{jt} \leq 0, \ \forall\, j, t, \qquad (5)$$

$$O_t, P_{it}, I_{it}, FP_{jt}, FI_{jt}, \geq 0, \ \forall\, i, j, t, \qquad (6)$$

$$X_{jt} \in \{0,1\}, \ \forall\, j, t, \qquad (7)$$

Donde:

T = Número de períodos de tiempo.

C_t = Costo de una hora de tiempo extra en el periodo **t**.

h_{it} = Unidad de costo de almacenamiento de inventario para el tipo (i), durante el período (t).

S_{jt} = Costo de preparación por familia **j** en el periodo **t**.

d_{it} (d_{jt}) = Demanda del tipo **i** (familia **j**) durante el periodo **t**.

K_i = Tiempo de producción requerido por unidad para el tipo **i**.

$T(i)$ = Conjunto de familias pertenecientes al tipo **i**.

m_{jt} = Una cota superior de la cantidad de producción para la familia **j** durante el período **t**.

r_t = Tiempo de producción regular disponible durante el período **t**.

$$m_{jt} = \sum_{k \geq t} d_{jk}$$

LAS VARIABLES DE DECISION DEL MODELO SON:

O_t = Horas de tiempo extra de la producción durante el período **t**.

I_{it} (FI_{jt}) = Inventario de tipo **i** (familia **j**) durante el período **t**.

P_{it} (FP_{jt}) = Cantidad de producción del tipo **i** (familia **j**) durante el período **t**.

X_{jt} = Variable cero - uno indica la actualización de la familia **j** en el período **t**.

En lugar de la presente restricción del conjunto puesta en (1). Graves (1982) , originalmente construye el modelo , usando una restricción de balance de inventarios en el nivel tipo es decir.

$$P_{it} + I_{i,t-1} - I_{it} = d_{it}, \ \forall \ i,t.$$

Este cambio puede ser hecho desde que:

$$\sum_{j \in T(i)} d_{jt} = d_{it} \quad \text{y} \quad \sum_{j \in T(i)} FI_{jt} = I_{it}, \ \forall \ i,t.$$

La restricción (2) del conjunto asegura la factibilidad de la capacidad. la restricción (3) del conjunto enlaza los inventarios de familias y tipos juntos. y la restricción (4) del conjunto es una restricción de balance de inventarios. La restricción (5) del conjunto asegura que $\mathbf{FP_{jt}}$ es cero cuando $\mathbf{X_{jt}}$ es cero. en otro caso es redundante.

3.3. METODOLOGIA EMPLEADA EN LA SOLUCION.

El procedimiento de solución es basado en las *Técnicas de Descomposición de Benders*. donde algunas variables son clasificadas como complicadas en (PS) las variables escogidas como unas de las variables complicadas son $\mathbf{X_{jt}}$, $\mathbf{FI_{jt}}$, $\mathbf{FP_{jt}}$, que producen un problema en el *nivel tipo y un problema en el nivel de familia*. Esta descomposición puede parecer peculiar en conexión con la estructura jeráquica de (PS). esto muestra que puede tener muchas ventajas no solamente cuando aparece la estructura de subproblema y problemas maestros pero también cuando aparece la posibilidad de interpretación de la información dual para el subproblema.

Para esta partición de las variables el subproblema de Benders mostrado que es separado por periodos es obtenido como:

(PSUBt)

$$
\begin{aligned}
Z_{PSUB}(t) &= \text{Min. } C_t \cdot O_t + \sum_i h_{it} I_{it} \\
\text{s.a.} \quad & P_{it} = \sum_{j \in J(i)} FP_{jt}, \ \forall\ i, \\
& \sum_i K_i P_{it} - O_t \leq r_t, \\
& I_{it} = \sum_{j \in J(i)} FI_{jt}, \ \forall\ i, \\
& O_t, I_{it}, P_{it} \geq 0, \ \forall\ i.
\end{aligned}
$$

Una cota superior en el valor óptimo es proporcionada por el subproblema, cuando la constante $\sum_i \sum_t S_{it} X_{it}$, es adicionada a $\sum_t Z_{PSUB}(t)$, entonces ésta es restricción de (PS). Este es el hecho de que algunas de las variables son fijadas probablemente en los valores no óptimos. El subproblema tuvo solución primal factible única que es fácilmente encontrada por inspección.

$$P_{it} = \sum_{j \in T(t)} FP_{ij}, \quad \forall \; i, t,$$
$$I_{it} = \sum_{j \in T(t)} FI_{ij}, \quad \forall \; i, t,$$
$$O_t = \max.\{0, \sum_i K_i \left(\sum_{j \in T(t)} FP_{it} \right) - r_t\}, \quad \forall \; t$$

Sean U_{it}, V_t, W_{it}, las variables duales correspondientes a las restricciones del primal ordenadas en la formulación de $(PSUB_t)$.
El problema dual de $(PSUB_t)$ es entonces formulado como.

$(DPSUB_t)$

$$Z_{DPSUB}(t) = \text{Max.} \sum_i U_{it} \left(\sum_{j \in T(t)} FP_{it} \right) + V_t r_t + \sum_i W_{it} \left(\sum_{j \in T(t)} FI_{it} \right).$$

s. a.
$$U_{it} + K_i V_t \leq 0, \quad \forall \; i.$$
$$-V_t \leq C_t,$$
$$W_{it} \leq h_{it}, \quad \forall \; i,$$
$$V_t \leq 0,$$
$$U_{it}, \; W_{it}, \text{ irrestrictas } \forall \; i.$$

El problema dual a ser resuelto por inspección tiene la siguiente solución.

$$W_{it} = h_{it}, \quad \forall \; i, t,$$

$$V_t = \left\{ \begin{array}{lll} -C_t & \text{si} & O_t > 0 \\ 0 & \text{si} & O_t = 0. \end{array} \right. \quad (\forall \; t).$$

$$U_{it} = -K_i V_t, \quad \forall \; i, t.$$

En efecto (DPSUB) tiene soluciones múltiples dado que la solucion de (PSUB) es degenerada.
Una alternativa puede ser que U_{it} y W_{it} sean iguales a cero si $\sum_{j \in I(i)} FP_{jt}$ y $\sum_{j \in I(i)} FI_{jt}$ respectivamente son iguales a cero.

Primero note que en el caso $\mathbf{O_t = 0}$ puede obtenerse el corte de Benders.

$$z_t \geq \sum_i h_{it} \left(\sum_{j \in I(i)} FI_{jt} \right).$$

Donde $\mathbf{Z_t}$ es una variable auxiliar del problema maestro de Benders.

Los cortes de este tipo salen a ser favorables permitiendo ser incluidos en el problema maestro. Más aún, sea U^*_{it} y V^*_t la solución dual correspondiente en el caso $\mathbf{O_t > 0}$.

Ahora se asume que (PSUB) ha sido resuelto para una secuencia de variables proporcionadas y que el caso $\mathbf{O_t > 0}$ puede ocurrir al menos una vez para los períodos $\mathbf{T^* \subseteq \{1, ..., T\}}$.

El problema maestro puede escribirse como:

(PM1).

$$Z_{PM} = \text{Min. } \sum_i \sum_t S_{it} X_{it} + \sum_t z_t$$

$$\begin{aligned}
\text{s.a.} \quad & z_t \geq \sum_i U^*_{it} \left(\sum_{j \in I(i)} FP_{jt} \right) + V^*_t r_t + \sum_i h_{it} \left(\sum_{j \in I(i)} FI_{jt} \right), \; t \in T^* \\
& z_t \geq \sum_i h_{it} \left(\sum_{j \in I(i)} FI_{jt} \right), \; \forall \; t. \\
& FP_{jt} + FI_{j,t-1} - FI_{jt} = d_{jt}, \; \forall \; j,t \\
& FP_{jt} - m_{jt} X_{jt} \leq 0, \; \forall \; j,t \\
& O_t, \; P_{it}, \; I_{it}, \; FP_{jt}, \; FI_{jt} \geq 0, \; \forall \; i,j,t \\
& X_{jt} \in \{0,1\}.
\end{aligned}$$

Por una sustitución de variable se obtiene el siguiente problema maestro reformulado.

(PM2)

$$Z_{PM} = \text{Min.} \sum_{j}\sum_{t} S_{jt} X_{jt} + \sum_{j}\sum_{t} h_{jt} \Big(\sum_{p \in I(t)} FI_{jp} \Big) + q_t$$

$$\text{s.a.} \quad q_t \geq \sum_{j} U^{*}_{jt} \Big(\sum_{p \in I(t)} FP_{jp} \Big) + V^{*}_{t}\, r_t\ ,\ t \in T^{*},$$

$$q_t \geq 0\ ,\ \forall\ t.$$

$$FP_{jt} + FI_{j,t-1} - FI_{jt} = d_{jt}\ ,\ \forall\ j,t.$$

$$FP_{jt} - m_{jt} X_{jt} \leq 0,\ \forall\ j,t$$

$$O_t\ ,P_{jt}\ ,I_{jt}\ ,FP_{jt}\ ,FI_{jt} \geq 0,\ \forall\ i,j,t$$

$$X_{jt} \in \{0,1\},\ \forall\ j,t.$$

El problema maestro es una relajación de (PS) y entonces $\mathbf{Z_{PM}}$ da una cota inferior de $\mathbf{Z_{PS}}$.

Cote y Laugthon (1984) sugieren el uso de relajación lagrangeana como un método apto para resolver (PM2). Así de esta manera relajando los cortes no triviales de Benders con Multiplicadores de Lagrange λ_t se fabrica la función objetivo.

$$\text{Min.} \sum_{j}\sum_{t} S_{jt}\ X_{jt} + \sum_{j}\sum_{t} h_{jt} \Big(\sum_{p \in I(t)} FI_{jp} \Big) + \sum_{t} q_t + \sum_{t \in T^{*}} l_t \big(g_t(FP,FI) - q_t\big).$$

Donde:

$$g_t(FP,FI) = \sum_{j} U^{*}_{jt} \Big(\sum_{p \in I(t)} FP_{jp} \Big) + V^{*}_{t}\, r_t.$$

Cada q_t es una variable continua no negativa que no aparece en el resto de las restricciones.
Tomando $\lambda_t \leq 1$, $t \in T^*$, el coeficiente de q_t llega a ser no negativo. Entonces, el valor óptimo de q_t puede ser igual a cero en la medida que la función objetivo es minimizada.
La Relajación Lagrangeana de (PM2) es entonces formulada como:

(LRPM)

$$Z_{LRPM}(\lambda) = \text{Min.} \sum_{j}\sum_{t} S_{jt} X_{jt} + \sum_{i}\sum_{t} h_{it}\Big(\sum_{j \in J(i)} FI_{jt} \Big) + \sum_{t \in T^*} \lambda_t\, g_t(FP, FI)$$

$$FP_{jt} + FI_{j,t-1} - FI_{jt} = d_{jt}\ , \quad \forall\ j,t.$$

$$FP_{jt} - m\, X_{jt} \leq 0\ , \quad \forall\ j,t.$$

$$O_{it}, P_{it}, I_{it}, FP_{jt}, FI_{jt} \geq 0, \quad \forall\ i, j, t.$$

$$X_{jt} \in \{0,1\}, \quad \forall\ j,t.$$

La razón para escoger este camino de relajación de (PM), es que el problema resultante (LRPM) es separado por familias dentro de un conjunto de problemas de tamaño de lote económico sin restricción de capacidad, este tipo de problema presenta la estructura adecuada que permite ser resuelto por programación Dinámica para el caso será usado el algoritmo de Wagner y Whitin (1958).

A partir de la teoría de Dualidad Lagrangeana para Programación Entera Fisher,M.L. (1981), Geoffrion, A.M. (1974) desarrollan teoría tal que se tiene que Z_{LRMP} *es una cota inferior* en Z_{PM}. La cota inferior más grande disponible es obtenida por la solución de:

(D)

$$Z_{D} = \text{Max. } Z_{LRPM}(\lambda)$$

$$\text{s.a.} \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \ t \in T^*.$$

Que es el dual lagrangeano con respecto a los cortes de Benders relajados. Esta denominación es usada por que el vector $\lambda = \{\lambda_t\}$ juega un rol similar en (LRPM) con los multiplicadores lagrangeanos usuales en el problema continuo.
La funcion objetivo dual $Z_{LRPM}(\lambda)$ es continua, cóncava y piezolineal. También es subdiferenciable.

Un aspecto interesante es que cerca del valor dual óptimo esta Z_{PM}. Desafortunadamente este es casi siempre el caso cuando algunas variables se requiere que sean enteras y una brecha de dualidad existe, lo que significa que $Z_D < Z_{PM}$. Mas aún el valor óptimo (D) proporciona una cota en Z_{PM}, tan fuerte como relajación-LP de (PM12), entonces (LRPM) no tiene la propiedad de integrabilidad [Geoffrion, A.M. (1974)]. La propiedad de integrabilidad regula que el valor óptimo del problema lagrangeano-relajado (LRPM) es no alterado por la caída de las condiciones de integrabilidad en estas variables. Se tiene que (D) proporciona una cota inferior en Z_{PS} que es mucho más fuerte que la relajación-LP de (PS).

Un procedimiento estándar para resolver el problema dual es el algoritmo de optimización subgradiente Held, M., Wolfe, P., and Crowder, H.P. (1974) que genera soluciones duales de acuerdo a la siguiente regla.

$$\lambda^{l+1}_t = \lambda^l_t + \theta_l \gamma^l_t, \qquad t \in T^*, \; l = 0,1,\dots \tag{8}$$

Donde para un valor partícular de λ, $\gamma = \{\gamma_t\}$ es un subgradiente de $Z_{LRPM}(\lambda)$ y θ_l es la longitud de paso.

Es importante hacer notar que γ en la mayoría de la literatura es llamada supergradiente, cuando está relacionada con una función objetivo cóncava, es el caso en cuestión. Un subgradiente de la función dual es determinado Shapiro, J.F. (1979). Suponga que el procedimiento de subgradiente en una iteración **l** sea:

$$P^l_t = \{P^l_{it}\} = \left\{ \sum_{p \in I(i)} FP^l_{pt} \right\}$$

Sean los valores de $\mathbf{P_t}$ generados por el problema maestro relajado. Además sea:

$$\mathbf{U^*_t = \{U^*_{it}\}} \text{ entonces } \quad g^l_t = \begin{pmatrix} U^*_t \\ V^*_t \end{pmatrix}^{+} \begin{pmatrix} P^l_t \\ r_t \end{pmatrix}, \; t \in T^*,$$

(Donde + denota transpuesta), definase un subgradiente de $Z_{LRPM}(\lambda)$ con λ^l.

La ecuación recomendable para el tamaño de paso en el proceso es la siguiente.

$$\theta_l = \rho_l [W - Z_{LRPM}(\lambda^l)] / \| \gamma^l \|^2 .$$

Donde **W** denota la mejor corrida de cota superior y $0 < \varepsilon_1 \leq \rho_1 \leq 2 - E_2$, con $E_2 > 0$.

Después de cada actualizacion de los multiplicadores de lagrange una proyección simple es hecha en el sentido de reforzar $0 \leq \lambda_t \leq 1$, $\forall t \in T^*$.

Ahora, para un cierto valor de λ, el problema maestro relajado (LRPM), es separado por familias en un conjunto de problemas de tamaño de lote sin restricción de capacidad, que es resuelto por programación dinámica. Entonces la cota inferior es obtenida resolviendo estos problemas de decisión, es probable que no sean capaces de alcanzar el valor óptimo del problema original (PS) conveniente a la brecha de dualidad aceptada, como es difícil obtener una cota superior es recomendable incorporar un intercambio heurístico al proceso de solución.

El propósito heurístico en ajustes en planes de producción extremos a veces es obtenido para el problema maestro relajado y aprovechando el vector de variables binarias actualizadas para cada familia como entrada.

Como es grande el plan de producción resultante es factible, cambiar una variable en un tiempo por *uno o cero* o viceversa.

Si la suma de los costos de preparación, costo de tiempo extra y costo de almacenamiento correspondiente al nuevo plan es reducida, el cambio es establecido. El procedimiento heurístico es procesado hasta el fin y no se observa ninguna mejora. *La nueva posibilidad* de *costo total* es entonces un candidato para un nuevo valor inferior de la cota superior.

Los planes de producción original obtenidos por el problema maestro relajado son de cualquier modo usados para la generación de nuevos cortes de Benders.

3.4. DESCRIPCION DEL ALGORITMO.

En el problema original (PS) algunas variables con consideradas como complicadas: tal es el caso de X_{jt}, FI_{jt}, FP_{jt}, debido a que son variables que requieren ser calculadas para dar solución al problema original, aplicando el criterio de descomposición de Benders para el caso, se tiene que resolver un problema que tiene variables continuas y uno de variables enteras (problema lineal y problema entero) en el caso más general, para lo cual se propone el siguiente procedimiento:

1.- Asúmase que $|T^*|$ cortes de Benders son generados y que (PM2) es resuelto mediante relajación lagrangeana y optimizacion subgradiente.

2.- El vector λ_t es actualizado un predeterminado número de veces de acuerdo a la ecuación.

$$\lambda^{l+1} = \lambda^l_t + \theta_l \gamma^l_t, t \in T^*, l = 0,1,\ldots$$

Para un valor particular de λ, $\gamma = \{\gamma_t\}$ es un subgradiente de $Z_{LRPM}(\lambda)$ y θ_l es el tamaño de paso. En todo momento (LRPM) es resuelto y *una cota inferior* en Z_{PS} es proporcionada.

Es importante hacer notar que la dirección del subgradiente no necesariamente es una dirección ascendente, esto no garantiza que el valor objetivo de (D) se incremente en cada etapa el vector λ_t es actualizado, pero si el tamaño de paso es suficientemente pequeño el nuevo punto es obtenido cercano al punto óptimo en el sentido euclidiano.

3.- Los valores de las variables complicadas obtenidas para la solución de (LRPM) son usadas como entrada de (PSUB), mientras el conjunto de variables actualizadas es mejorado para el intercambio heurístico.

4.- Las variables dual óptimas hacia **(PSUB)** son entonces fundadas en nuevos cortes de Benders así generados. Sin embargo puede suceder que un corte que está ya incluido en (PM2) sea generado otra vez como un dato apto. Para el caso se tiene que un corte que ya ha sido generado por supuesto no podrá ser incluido nuevamente en **(PM2)**.

5.- ***Una cota superior*** en **Z_{PS}** es dada por el valor obtenido a través del intercambio heurístico para la solucion de **(PSUB)**, y depende de cuál es la cota inferior.

En la siguiente iteración, el procedimiento subgradiente para **(PM2)** es continuado de la última solución de **(LRPM)**.

El procedimiento es inicializado al generar valores de las variables iniciales **$\{X_{jt}\}$** las cuales en turno, implican la cantidad de los periodos de producción y almacenamiento del inventario al nivel de familias.

El algoritmo procede hasta que un determinado número de subproblemas de Benders hayan sido investigados, o hasta que las cotas estén suficientemente cercanas.

En el presente algoritmo desarrollado en esta Tesis basado en la descomposicion de Benders, las variables duales U_{it} , W_{it} son necesarias como elementos de entrada para la función objetivo de (LRPM), las que pueden ser interpretadas como variables de producción y costos de almacenamiento del inventario para las familias que pertenecen a un cierto tipo de producto.

CAPITULO 4

4. EL PROBLEMA DE LA PLANEACION DE LA PRODUCCION EN LA INDUSTRIA FORESTAL MADERABLE (ASERRÍO)

INTRODUCCION

El capitulo se desarrolla como sigue: en la sección 4.1. se describe la problemática del sector forestal en México, la distribución de su industria, se presta atención principal a la industria del aserrío, se presenta la panorámica de la producción - consumo de la madera aserrada, se analiza el sector industrial forestal michoacano: en la sección 4.2. se describe el proceso del aserrío: en la sección 4.3. se describen y se presentan las variables que intervienen en el proceso de aserrío, se modela el problema de planeación de la producción en este sector industrial, y se muestran los planes de producción obtenidos, así como sus resultados.

4.1. PROBLEMATICA DEL SECTOR FORESTAL EN MEXICO.

Tomando como marco rector de la economía nacional el *Plan Nacional de Desarrollo* (1989 - 1994) **PND**, constituye el fundamento básico en la política de la industria forestal. El **PND** es interpretado como el esquema de desarrollo global, es decir comprende todo el territorio nacional y todos los sectores de la economía. Entre los objetivos buscados por el mismo se tienen: vencer la crisis, abatir la inflación, defender el empleo, proteger el consumo basico y la planta productiva, superar los problemas financieros y la estabilidad cambiaria, y recuperar la capacidad de crecimiento.

La política del subsector forestal, queda establecida en el *programa de bosques y selvas* del **PND**; la política industrial forestal en especial tiene una estrecha relación con el programa de desarrollo industrial del **PND**.

En materia de política forestal, se han definido dos objetivos prioritarios, el primero, enfocado al aprovechamiento óptimo del recurso y el segundo, consiste en contribuir significativamente al bienestar socioeconómico de los habitantes de las regiones silvícolas.

Así mismo, para el sector Bosques y Selvas, se enuncian entre otras, las siguientes estrategias:

El aprovechamiento del recurso forestal debe ser integral con alta productividad, regido por los conceptos de uso múltiple del bosque y de rendimiento sostenido, buscando, que se le de el mayor valor agregado posible a los productos elaborados derivados del recurso forestal, en las propias regiones en que se encuentra distribuido dicho recurso.

La Política Industrial Forestal, se orienta en forma específica a optimizar el desarrollo de la industria forestal, manteniendo el equilibrio entre el potencial del recurso y la capacidad instalada y aprovechada de la planta industrial, así como evaluar el nivel de vida y proporcionar la generación de empleos para la población involucrada en la actividad.

La Industria Forestal puede ser tipificada y clasificada en función del tipo específico de materia prima, grado de transformación y producto principal obtenido.

De acuerdo a CNIF (1993) la disponibilidad de recurso forestal maderable para el país en lo referente a bosques de clima templado y frío en los que se incluyen coníferas y latifoliadas se manejan 1 989 406 miles de metros cúbicos, a su vez en las selvas de clima cálido húmedo se tienen existencias de 3 125 267 miles de metros cúbicos. La información obtenida relativa a las extracciones maderables realizadas durante 1993 indican que se produjo un volumen de 7.6 millones de metros cúbicos de madera en rollo, observándose un decremento del 5.5 % con respecto al año inmediato anterior. Este notable retroceso es, sin duda, reflejo de los problemas que aquejan a esta actividad.

El volumen de madera industrial extraido en 1993 fue de 7.2 millones de metros cúbicos rollo; el resto de las extracciones correspondió al utilizado como combustible, leña, carbón y brazuelo, aceptado generalmente como representante de una parte del que realmente se extrae con esa finalidad.

Los productos en que realmente se transformaron estos volumenes extraidos, en términos generales, han mantenido la misma estructura que en los últimos años. Los productos con escuadría, principalmente aserrados, absorbierón el 70.1 % del total industrial; para la elaboración de productos celulósicos se destino el 21.2 % notándose una tendencia al aumento en los últimos años, la fabricación de chapa y triplay no sufrio cambios relativos con respecto al año anterior utilizándose para ello el 2.6 %; y para productos rollizos como postes, pilotes y morillos, se destinó el 1.2 %.

Por lo que hace a las especies extraídas , tradicionalmente han sido las coniferas especialmente el pino, las que representan más del 83 % de la produccion, el resto está formado por diversas especies latifoliadas, entre las que destaca el encino.

Si se analiza la producción forestal de forma regional, se tiene que en la sierra madre occidental, principalmente a lo largo de los Estados de Durango y Chihuahua se extrajo el 46.9 % ; la segunda región en importancia corresponde a los aprovechamientos realizados en la Sierra Neovolcánica que comprende principalmente los Estados de Jalisco, Michoacán, Veracruz, México y Puebla, produciéndose el 31.7 %. En la Sierra Madre del Sur que comprende los estados de Guerrero y Oaxaca se extrajo el 9.6 %; el resto de la producción se localiza en otras áreas de clima templado y clima tropical.

En relación a la producción forestal no maderable, ésta comprende una gran variedad de materiales, substancias y materias primas, destacando en primer lugar las resinas de pino con 29 797 toneladas, destinándose una gran parte al mercado exterior; le sigue en importancia la producción de fibras con 2 799 toneladas; le sigue la producción de ceras con 1 953 toneladas y rizomas (barbasco) con 1 391 toneladas. El barbasco es de gran utilidad en la elaboración de esteroides para la industria farmacéutica. El resto de la produccón la constituyen productos no especificados pero que alcanzan el 52.3 % de la producción nacional con 40 022 toneladas.

En general la transformación de este recurso, se entiende como la aplicacion de cierto grado de industrialización de los productos forestales, mediante un proceso físico- mecánico ó químico - biológico. Lo anterior implica la incorporacion de una política adecuada de industrialización del recurso.

4.1.1. LA INDUSTRIA FORESTAL EN MEXICO.

Para la industria forestal el año de 1993 fue solamente un corolario de un período que se significó por las considerables dificultades que la actividad forestal enfrentó en su conjunto y por pequeñas variaciones en sus parametros indicativos que representaron en muchas formas, un contexto de retroceso en los aspectos productivos de la industria y en sus resultantes de tipo social.

El retroceso se manifestó claramente en el valor del producto interno bruto aportado por la actividad forestal. El sector manufacturero en su conjunto tuvo un repunte de 4.2 % en relación a 1993, pero en el renglón de la madera y productos de la madera la caída fue drástica pues su contribución al valor global de dicho producto interno bruto fue de 15.1 % menor al correspondiente de 1992. En el renglón de papel, productos de papel, imprentas y editoriales, se tuvo un decremento de 0.5 % en comparación al año anterior.
Es indudable que ante una producción forestal con tendencias decrecientes en los últimos 5 años, es sumamente difícil pensar en un desarrollo de la industria que sea real y sostenido.
Con las reformas al Artículo 27 Constitucional se abren nuevas expectativas de desarrollo, pero falta la adecuación de una legislación forestal que permita el sano y cabal aprovechamiento de los recursos forestales, para con esto hacer un desarrollo real y sostenido. Así como la aplicación de herramientas como la investigación de operaciones en este campo.

La industria forestal en el país se encuentra distribuida de acuerdo a la tabla siguiente:

TABLA 4.1.

ENTIDAD	Aserraderos	Fábricas de cajas	Impregnadoras	Papel	Contrachapado	Aglomerado	Fibra	Celulosa	Resineras	Taller de secundarios	Total
Aguascalientes	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
Baja Calif. Norte	1	4	—	—	—	—	—	—	—	1	6
Baja Calif. Sur	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
Campeche	29	—	1	4	2	1	—	—	—	5	41
Coahuila	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10
Colima	2	25	—	—	—	—	—	—	—	—	27
Chiapas	23	—	—	2	3	—	—	—	—	2	30
Chihuahua	231	57	4	—	6	2	—	1	—	—	301
D.F.	6	—	—	1	—	—	—	—	—	4	11
Durango	345	127	4	1	10	2	—	2	—	—	491
Guanajuato	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
Guerrero	54	2	—	—	—	1	—	—	1	—	58
Hidalgo	19	12	—	1	1	—	—	—	—	1	34
Jalisco	70	23	—	—	1	1	—	1	—	6	102
México	17	6	—	1	5	1	1	2	2	—	38
Michoacán	[illegible]	252	—	—	2	1	—	2	10	280	1,102
Morelos	1	4	—	—	—	—	—	—	—	—	5
Nayarit	31	22	—	—	1	—	—	—	—	—	54
Nuevo León	26	12	—	—	—	—	—	—	—	—	38
Oaxaca	98	12	2	1	2	1	—	1	—	—	117
Puebla	23	30	—	—	—	—	—	—	—	—	53
Querétaro	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
San Luis Potosí	4	—	—	—	1	—	1	—	—	1	7
Sinaloa	12	8	—	—	—	—	1	8	—	—	29
Sonora	23	—	2	—	—	—	—	—	—	1	26
Tabasco	6	—	—	1	—	—	—	—	—	—	7
Tamaulipas	10	3	—	1	—	—	—	—	—	—	14
Tlaxcala	6	10	—	—	—	—	—	—	—	2	18

Veracruz	17	2	1	1		—	—	—	—	—	20
Yucatán	18	—	—	1	1	1	—	—	—	1	21
Zacatecas	11	6	—	—	—	—	—	—	—	2	19
Quintana Roo	11	—	—	—	1	—	—	—	—	1	13
TOTAL	1,543	659	14	18	37	10	3	17	13	309	2623

Fuente: CNIF, con datos de la Dirección General de Política Forestal de la SARH (1993)

De lo anterior, se tiene que de la caracterización de la industria forestal, la industria del aserrío es la más numerosa, proporcionadora de materias primas a la mayoría de la industria restante, por ende presenta gran importancia su estudio, la misma presenta las características siguientes.

TABLA 4.2.
LA INDUSTRIA DEL ASERRÍO EN MEXICO 1993

CONCEPTO	INDICADOR
Número de plantas (1)	1543
Cap. instalada en miles m3 rollo	12 344
Capacidad empleada	44.62 %
Producción en miles m3 rollo (2)	5 509
Personal ocupado	18 516
Inversión en miles de dólares (3)	367 229

(1) Unidad de Producción
(2) Incluye tablas y tablones, durmientes, cuadrados, madera para envases y otros productos con escuadría, así como la --- producción de rollizos destinados a este fin.
(3) Dólar controlado.
FUENTE: CNIF (1993).

La relación producción - consumo de madera que se tiene en el país es expresada en la tabla 4.3.

TABLA 4.3.
RELACION PRODUCCION - CONSUMO DE MADERA EN MEXICO
(Miles de m^3r)

AÑO	OFERTA	DEMANDA	DIFERENCIA
1988	9 631.52	11 124.3	- 1 492.78
1989	9 720.64	11 047.9	- 1 327.26
1990	9 809.76	10 971.5	- 1 161.74
1991	9 898. 88	10 895.1	- 996.22
1992	9 988.00	10 818.7	- 830.7
1993	10 077.12	10 742.3	- 665.18
1994	10 166.24	10 665.9	- 499.66

FUENTE: CNIF (1993).

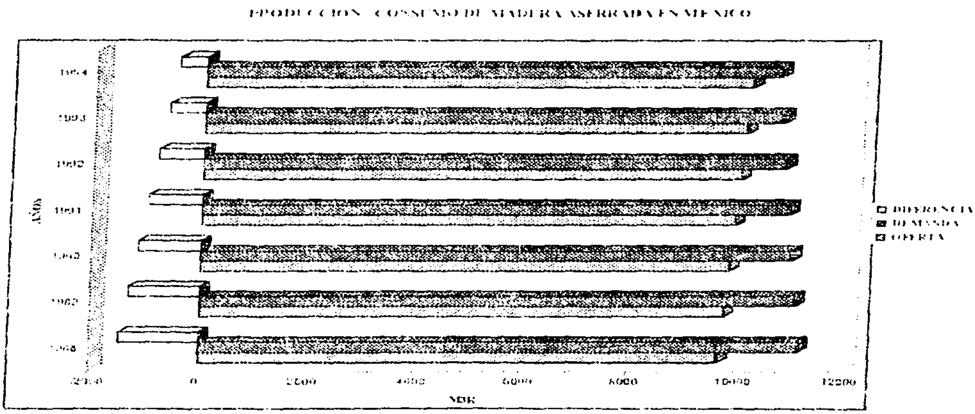


Figura 4.1.

4.1.2. EL SECTOR FORESTAL MICHOACANO

Uno de los estados con un alto potencial para la aplicación de este tipo de trabajos como se observa en la información anterior es el estado de Michoacán, en este sentido el Sector industrial Michoacano presenta las siguientes caracteristicas, este estado ocupa el tercer lugar en lo referente a producción forestal maderable, superado solamente por Chihuahua y Durango, en el concepto de producción de resina ocupa el primer lugar.

La superficie forestal del estado reportada es 4'319 000 ha. que representan el 88 % de la superficie total del estado, estimada en 5 millones de hectáreas. La superficie arbolada de la entidad asciende a 2'052 000 ha, de las cuales 1'732 000 ha. son de bosque y 320 000 de zonas arboladas de clima cálido húmedo.

En lo referente a la distribución del recurso forestal en la entidad, se han definido cuatro zonas dadas como:

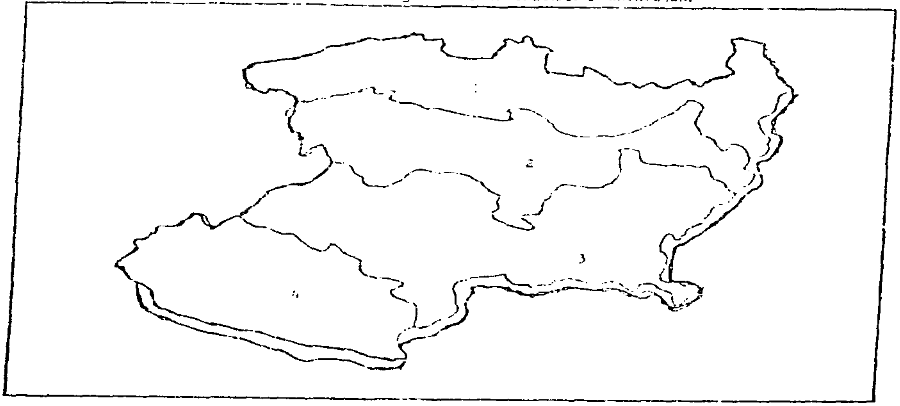
Región del Bajío (1): Se encuentra en la parte norte del estado, desde los márgenes del lago de chapala. Los principales tipos de vegetación que ocurren en la región son: la selva baja, los encinoles, los pastizales y alguna presencia de bosque de pino-encino.

Región del Eje Neovolcánico (2): Se ubica en la parte central del estado, es una amplia faja que se desarrolla de Este a Oeste, constituyendo la región montañosa y accidentada del estado y esta conformada por las sierras de Tlalpujahua, Maravatio, Ozumatlan, Corupasco, Pichátaro, Nahuatzen, Paracho, Patamban y Tancítaro. Los tipos de vegetación predominantes son bosque de pino-encino, bosque de oyamel y bosque de encino.

Región Tierra Caliente (3): Se ubica en la porción Sur del estado, limitando los estados de Guerrero y México, y se integra por la sierra de Inguarán y al Este la Sierra de Chula. Los principales tipos de vegetación que ocurren en esta región son: la selva baja, los encinales, los pastizales y los mezquitales

Región de la Sierra Madre del Sur (4): Se sitúa en la parte Suroeste de la entidad, limitando con los estados de Colima, Jalisco, Guerrero y zona costera del Océano Pacífico. Los principales tipos de vegetación de la región son: bosques de pino-encino, selvas bajas, selvas medianas y los palmares naturales.

Regionalización del Estado de Michoacán.



1.- Región del Bajío, 2 Región del Eje Neo-Volcánico, 3.- Región de Tierra Caliente, 4.- Región de la Sierra Madre del Sur.

Figura 4.2.

4.1.3. LA INDUSTRIA FORESTAL

El desarrollo de la actividad forestal en el estado es susceptible de dividir en tres etapas dadas como:

Primera etapa (1900 - 1948): Esta se caracteriza por la tala de los bosques de forma masiva e irracional. El potencial forestal del estado motiva a inversionistas nacionales y extranjeros a realizar aprovechamientos forestales; iniciándose a operar sistemas primitivos de aserrío, consistentes en sierras circulares, accionadas por fuerza generada a base de vapor. En el período de gobierno del general Plutarco Elías Calles, se promulga el 24 de Abril de 1926 la Ley Forestal, la misma observa una tendencia conversionista, no de fomento y producción, y adolece de una falta de precisión en materia de aprovechamientos e industrias al igual que la ley forestal del período de gobierno de Manuel Avila Camacho (1943). Bajo este marco se acelera la explotación inmoderada de los bosques michoacanos. Se incrementa la actividad artesanal de la madera, prolifera en algunas regiones del estado, como en la Meseta Tarasca Entre (1935-1940); se establecen las primeras sierras cinta (banda) por parte de empresarios nacionales.

Segunda etapa (1948 - 1972): Ante el grave deterioro de los bosques, se decreta veda total e indefinida para los bosques de Michoacán, el 31 de Diciembre de 1948, tiempo en el que priva una situación política de restricción de aprovechamientos, proliferación de cortas ilegales, desmontes para usos múltiples y aumento de problemas sociales de usos de recurso. En la población de Santa Clara del Cobre, en 1959, se constituye la Unión Mutualista "Lic. David Franco Rodríguez" que agrupó 22 fabricantes de caja de empaque.
En 1960 se crea la empresa Michoacana de Occidente, S. de R.L., concesionándole a la misma los bosques de la región Sur-occidental del estado.

La empresa se caracterizó por no haber cumplido con los requisitos técnicos y compromisos de infraestrcura de beneficio social. El 23 de enero de 1961, se publica la nueva Ley Forestal, dando carácter más legal a la actividad industrial, implicó además proporcionarle mayor valor agregado a la madera.

Tercera etapa (1972 - a la fecha): Se crean industrias ejidales y se forman varias unidades forestales con el objetivo de integrar la industria. El 20 de diciembre de 1973, se crea Productos Forestales de Michoacán por decreto estatal, con el objetivo de integrar a los campesinos para el aprovechamiento de los recursos forestales.
En 1973 se levanta la veda forestal, desaparecida la empresa Michoacana de Occidente, se organizan los propietarios del recurso y originan 10 centros de aserrío. Surgen las Uniones de Ejidos Forestales (Luis Echeverría Alvarez, Francisco Merino Rabago, entre otras) con el fin de industrializar eficientemente sus propios recursos forestales, sin embargo por falta de asesoría y capacitación adecuada no cristalizaron eficientemente dichos proyectos. En 1979, se reglamenta la expedición de permisos forestales.

En la actualidad la industria forestal se puede clasificar y agrupar en función de los tipos de materias primas que emplea, su grado de transformación y producto(s) principal(es) obtenidos. La industria en el estado es susceptible caracterizarla por el tipo de productos típicos que se producen en los diferentes municipos como se muestra en la Tabla 4.4.

Segunda etapa (1948 - 1972): Ante el grave deterioro de los bosques, se decreta veda total e indefinida para los bosques de Michoacán, el 31 de Diciembre de 1948, tiempo en el que priva una situación política de restricción de aprovechamientos, proliferación de cortas ilegales, desmontes para usos múltiples y aumento de problemas sociales de usos de recurso. En la población de Santa Clara del Cobre, en 1959, se constituye la Unión Mutualista "Lic. David Franco Rodriguez" que agrupó 22 fabricantes de caja de empaque.
En 1960 se crea la empresa Michoacana de Occidente, S. de R.L., concesionándole a la misma los bosques de la region Sur-occidental del estado.

La empresa se caracterizó por no haber cumplido con los requisitos técnicos y compromisos de infraestreura de beneficio social. El 23 de enero de 1961, se publica la nueva Ley Forestal, dando carácter más legal a la actividad industrial, implicó además proporcionarle mayor valor agregado a la madera.

Tercera etapa (1972 - a la fecha): Se crean industrias ejidales y se forman varias unidades forestales con el objetivo de integrar la industria. El 20 de diciembre de 1973, se crea Productos Forestales de Michoacán por decreto estatal, con el objetivo de integrar a los campesinos para el aprovechamiento de los recursos forestales.
En 1973 se levanta la veda forestal, desaparecida la empresa Michoacana de Occidente, se organizan los propietarios del recurso y originan 10 centros de aserrío. Surgen las Uniones de Ejidos Forestales (Luis Echeverría Alvarez, Francisco Merino Rabago, entre otras) con el fin de industrializar eficientemente sus propios recursos forestales, sin embargo por falta de asesoría y capacitación adecuada no cristalizaron eficientemente dichos proyectos. En 1979, se reglamenta la expedicion de permisos forestales.

En la actualidad la industria forestal se puede clasificar y agrupar en función de los tipos de materias primas que emplea, su grado de transformación y producto(s) principal(es) obtenidos. La industria en el estado es susceptible caracterizarla por el tipo de productos típicos que se producen en los diferentes municipos como se muestra en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4.
DISTRIBUCION DE LA INDUSTRIA EN MICHOACAN

MUNICIPIO	A	B	C	D	E	F	G	H
Acuitzio	•	•		•				
Ario de Rosales	•	•	•					
Coeneo	•		•					
Charo			•		•			
Huiramba					•			
Lagunillas								
Morelia	•	•	•					
Pátzcuaro	•	•		•				
La Piedad								
Queréndaro			•					
S. Escalante	•	•			•			
Sta. Ana Maya								
Tacámbaro	•	•						
Tarímbaro	•							
Villa Madero	•							
Zacapu	•	•	•					
Aporo	•	•						
Angangueo	•			•	•	•		
Hidalgo	•			•			•	
Irimbo	•			•		•		
Maravatío	•			•	•			
Ocampo	•			•				
Zitácuaro	•			•		•		•
Zinapécuaro	•			•				
Tlalpujahua	•			•				
Tuxpan	•			•				
Aguililla	•	•						
Arteaga	•							
Apatzingán	•	•						
Buenavista		•						
Charapan		•			•			
Cherán	•	•			•			
Coalcomán	•	•						
Cotija	•	•						
Los Reyes	•	•			•			
Nahuatzen	•	•		•	•			
Paracho				•	•			
Peribán								
San Juan Nuevo	•	•		•				
Tancítaro								
Tangamandapio		•						
Tangancícuaro		•			•			
Tingambato	•							
Tingüindín	•							
[illegible]	•							
[illegible]	•	•		•				
Uruapan	•	•	•	•	•			

Identificación de Productos: (A) Madera Aserrada (B) Caja de Empaque (C) Tarima (D) Muebles en Gral. (E) Muebles Regionales Artesanales (F) Tableros Aglomerados (G) Triplay (H) Cabos para Herramientas

En lo general la transformación industrial, es entendida como la aplicación de cierto grado de industrialización de productos forestales, mediante procesos físico - mecánicos o bien químico - biológicos.

La transformación primaria se refiere a la fase de industrialización de los productos forestales maderables o no maderables, es decir, integra la industria que utiliza como materia prima, trocerla, leña, brazuelo, etc., dentro de la cual es clasificado el ***Proceso de Aserrío.***

El aprovechamiento secundario, comprende a los procesos de industrialización que involucran materia prima forestal con algún grado previo de transformación. La materia prima empleada puede ser: madera aserrada, tira y costera de aserrío, brea, etc.

En el estado de Michoacán en la actualidad en el renglón de industria forestal, existe un marcado predominio de las plantas de aserrío y las de caja para empaque, por su capacidad instalada son significativas, la planta productora de celulosa y papel CEPAMISA ubicada en el municipio de Morelia, y la fábrica de Tableros y Aglomerados Vikingo de Industrias Resistol, S.A., ubicada en Zitácuaro.
En relación con la destilación de la resina operan 16 plantas, que representan el 80 % respecto al numero de instalaciones del país, el estado de la industria forestal puede representarse como:

TABLA 4.5.

CONCEPTO	REGION	NUMERO	ESTADO
Aserrío	Morelia	34	pequeños
	Uruapan	36	Pequeños
Caja de Empaque	Morelia	61	Pequeñas
	Meseta Tarasca	600	Talleres
	Hidalgo	0	No reportados
Tableros de Madera	Zitácuaro	1	Mediana
	Cd. Hidalgo (1)	2	Mediana
		1 (**)	Mediana
Muebles	Cd. Hidalgo	156	Talleres
	Patzcuaro	30	Talleres
	Morelia-Acuitzio	3	*Medianas
Celulosa y Papel	Morelia	1	Grande

(1) Fabrica de Triplay, (**) Fabrica de Tablero enlistonado

Actualmente se considera que la industria forestal en el estado se encuentra subdesarrollada, principalmente por falta de planeación del desarrollo de la misma en armonía con el recurso forestal existente, lo anterior se observa claramente, debido a la baja diversificación de la producción, con marcada preponderancia de establecimientos de aserrío y fabricación de caja de empaque, productos de poca manufactura y de poco valor agregado sin embargo el aserrío es el primer proceso de industrialización de este recurso y en el se presenta un alto indice de desperdicio y bajos aprovechamientos razón por la cual reviste importancia la aplicación de este tipo de trabajos encaminados a la realización de la optimización en el uso de los recursos escasos como lo es el forestal.

4.2. EL PROCESO DE ASERRÍO

El concepto ***aserrío***, especifica en forma general la transformación de trozas en piezas escuadradas, sean tablas, tablones, vigas, cuadrados entre otros, y constituye el giro más antiguo y extendido dentro del ramo industrial maderable.

Las operaciones esenciales en la elaboracion de madera aserrada son las siguientes:

a).- Asierre de la troza en tablas y tablones.

b).- Reasierre de las trozas longitudinalmente en una operación de corte al hilo o sobre el canto para eliminar las orillas y proporcionar el ancho requerido.

c).- Reasierre de las tablas transversalmente al hilo, en una operación de emparejado, con la finalidad de eliminar defectos y dar el largo comercial necesario.

Es común identificar a las plantas industriales de aserrío en función del tipo de maquinaria utilizada para efectuar la operación de asierre y que además, debido a su importancia se le denomina sierra principal. La sierra principal puede ser de tipo circular, banda ó multiple.

Hoy dia en Michoacán el aserradero que tiene sierra banda, es más común y no se usa la sierra principal multiple debido a la no uniformidad en las caracteristicas del abastecimiento de materias primas (un gran porcentaje de piezas son de forma irregular).

Comercialmente la madera aserrada se identifica por sus dimensiones nominales expresadas en el sistema inglés. En general la madera aserrada se divide en dos grupos: *largas dimensiones ó comercial y cortas dimensiones*.

La clasificación ***largas dimensiones***: la madera comercial clasificada en largas dimensiones, de acuerdo a sus dimensiones en grueso y ancho, se especifica como:

Se define por ***tabla*** aquellas piezas cuyo espesor (grueso) es de (1/2 a 1 1/2 pulgada) y ancho de (4 a16 pulgadas); el término ***tablón*** se asigna a las piezas con espesor de 2 pulgadas o mas y de 8 a 16 pulgadas de ancho; a las piezas cuadradas con espesor de 3 1/2 a 4 pulgadas y mismo ancho ó mas, se les denomina ***vigas***, las que en función de sus dimensiones pueden conocerse como viga larga, viga corta, viga ancha, polín, cuadrado, etc., A las piezas de menor escuadría (hasta 3 por 3 pulgadas) se les denomina ***tirantes***, y aquellas que tienen espesor de (1/2 a 2 pulgadas) y ancho de (2 a 3 pulgadas), se les conoce como ***alfajias***

Dentro de la madera serrada de cortas dimensiones, se encuentra la ***duela*** cuya medida típica es (1/2'' x 3 1/2 '' x 1'); el ***machimbre*** (3/4'' por ancho variado por 1').

La unidad de medida comercial es el **Pie-Tabla (PT)**, medida derivada del sistema inglés; es definida *como un sólido hipotético de una pulgada de espesor (grueso), por un pie de ancho, por un pie de largo.*

El volumen del *pie-tabla* equivale a 0.00236 m^3. Las piezas escuadradas se cubican mediante la siguiente expresión.

$$P_t = g\ a\ L / 12$$

Donde:

g = grueso en pulgadas.

a = ancho en pulgadas.

L = largo en pies.

Pt = pie - tabla.

Las tablas y tablones conllevan su correspondiente refuerzo, que es un exceso que se da a la medida nominal para compensar el maquinado de la misma, así como la contracción que la madera sufrirá después del proceso desecado, por tratarse de un material altamente higroscópico.
El refuerzo que se aplica en el grueso de las piezas de (1/2'' - 40%), (3/4'' - 30%), (1'' - 20%), (1 1/2'' - 15%).

4.2.1. DESCRIPCION DEL PROCESO DE ASERRÍO

Este proceso cumple con las especificaciones de los Sistemas Flexibles de Manufactura, debido a su Lay Out y flexibilidad en la forma de trabajo a través de la agrupación de artículos en familias y estas a su vez en tipos; esto permite tener importantes beneficios en reduccion de costo y tiempos de preparación de máquina, recortando los sobreciclos de manufactura (tipicamente de semanas a dias), con sus correspondientes reducciones en trabajo en inventario en proceso y costos de herramientas (instrumentación). A su vez cada una de las etapas del proceso es considerada como una celula de servicio y esta a su vez como una unidad de planeación, para el caso en analisis. El proceso de obtencion de la madera aserrada (aserrío) es clasificado como la primera etapa de la industrialización forestal maderable desde el punto de vista mecánico. las fases que conforman este proceso descritas en términos secuenciales son:

1.- ALMACENAMIENTO DE TROCERIA

El proceso de aserrío se inicia al recibir la trocería en los patios de almacenamiento del aserradero, en este lugar es donde llegan y se almacenan las trozas provenientes del monte, con el objeto de mantener un adecuado y constante suministro de materia prima al proceso de aserrío.

2.- TRANSPORTE DE TROZAS

De los patios de troceria son transportados a la nave del aserradero, hasta, la selección y limpieza de trozas.

3.- PREPARACION PARA EL ASERRIO

Según lo requieran los materiales se tendrá el trozado y descortezado a fin de eliminar cualquier material que pueda estropear las sierras, otra actividad desarrollada es la de sellar los extremos de las trozas con pintura de aceite para evitar la deshidratacion rápida y el posible ataque de insectos. Después de realizar estas actividades se desarrolla la clasificación de las trozas de acuerdo a caracteristicas de rangos diamétricos, largos y uniformidad, para de esta manera preparar las estrategias de procesamiento de acuerdo a las medidas comerciales mas adecuadas demandadas por el mercado de consumo

4.- TRANSFORMACION DE LA MATERIA PRIMA

La transformacion de la madera en este proceso inicia con el acercamiento de la madera al puente de carga, el cual se encuentra cerca de la sierra principal del proceso (torre de aserrio), la función principal del puente de carga es la de almacenar y alimentar de materia prima al carro portatrozas, además de evitar que dichas trozas cargan o se amontonen en el carro.

5.- CARRO PORTATROZAS

El carro portatrozas es un elemento sobre el cual se colocan las piezas para ser dimensionadas en la sierra principal, este se desliza sobre unos rieles en sentido perpendicular al movimiento de la hoja de la sierra.

Este carro es accionado por un cable deslizante sobre un sistema de poleas movido hidraulicamente.
La funcion del carro es la de sujetar y transportar el sentido de va y ven la troza para realizar los cortes necesarios para poder cuadrar a medidas especificas dichas trozas. El carro consta de 4 escuadras las cuales sujetan la troza y la adelantan hacia la linea de aserrado para regular el grueso de la pieza que va a cortar. Además consta de un regulador graduado que es operado por tres personas una de las cuales se encarga de regular el grueso de la pieza y las otras dos son las encargadas de sujetar la pieza con las escuadras.

6.- SIERRA PRINCIPAL (TORRE DE ASERRIO)

La función de esta máquina dentro del proceso, es la escuadrar la troza quitándole las costeras. Esta es operada por una persona, la cual controla el viaje del carro y el equipo de volteo de trozas, por lo que debe existir una buena coordinación entre dicho operador y las personas que manejan el carro para indicar la siguiente posición de la troza, de acuerdo a las especificaciones de espesor (grueso), con la que la madera deberá ser cortada.

Esta maquina esta constituida por una sierra banda de 8" de ancho calibre 16, la torre tiene diámetro de poleas de 160 cm., ésta máquina es marca *Brenta* y está accionada por un motor eléctrico de una capacidad de 150 Hp.

7.- REASERRADORAS

El equipo de proceso consta de dos reaserradoras iguales, cada una de las cuales está equipada con una sierra banda de 7'' de ancho calibre 17, con poleas de 152 Cm., y un motor de 100 Hp. La función de cada reaserradora es la de reducir los cuadrados, tablones y orillas que provienen de la sierra principal y son llevados por transportadores de rodillos móviles y cadenas transportadoras hasta las reaserradoras, donde entran en un ciclo tal que cada vuelta sufra un corte la pieza. Esta operación se hace a las piezas hasta lograr los gruesos comerciales requeridos (espesores).

8.- DESORILLADORAS

Se tienen dos desorilladoras cada una de las cuales está ubicada en una área del proceso, para procesar las piezas provenientes de las reaserradoras correspondientes. Este tipo de máquinas (desorilladoras) son mesas con rodillos adelante y atrás. Dicha máquina consta de tres discos cada una. Los discos son calibrables para proporcionar diferentes anchos comerciales a las piezas. Estos discos son de 500 mm. de diámetro, de 80 dientes calibre 12.

La función principal de estas máquinas es la de *proporcionarle el ancho comercial a la madera*. Estas máquinas son operadas por dos personas y su operación es sencilla.

9.- CABECEADORA MULTIPLE

La cabeceadora múltiple es una máquina formada por 9 motores y 9 discos de 14'' de diámetro, es semi-automática marca *Newman* operada por una persona desde una cabina. Las piezas de madera una vez que tienen el grueso y el ancho especifico son llevadas por medio de rodillos y después cadenas hacia la cabeceadora donde llegan las piezas orientadas perpendicularmente al sentido de los discos y donde se les cortan los extremos de tal forma que estén a escuadra, paralelos unos con otros y uniformes de longitud.

Las piezas de diferentes largos, se cortan en dos o más partes de acuerdo a las necesidades y dimensiones comerciales. Tambien se aprovecha al máximo la pieza y se cuida de eliminar algunos de los defectos más significativos.

10.- MESA DE CLASIFICACION

Es el lugar dentro del aserradero en el que llegan las piezas de madera ya completamente cortadas en dimensiones requeridas, por medio de cadenas transportadoras.

En esta etapa se clasifican todas las piezas de madera de acuerdo a su calidad y de dimensiones comerciales haciéndose unas pequeñas pilas que el montacargas se encargará de llevarlas a la estufa o al patio de secado.

11.- PATIO DE SECADO AL AIRE LIBRE

Es el área donde se coloca la madera, previamente seleccionada de tal forma que facilite disminuir su contenido de humedad. El apilamiento de la madera es tal que consta de callejones principales y transversales con el objeto de permitir la circulación de los montacargas a la hora de apilar o retirar la madera para enviar al mercado.

4.3. MODELADO DEL PROBLEMA

El modelado del problema surge a partir de la necesidad de hacer un planteamiento de un uso óptimo del recurso forestal maderable (coníferas) en su primera etapa de industrialización el aserrío, ya que en esta fase del procesamiento de dicho recurso, existen grandes volúmenes de desperdicios debido a un mal uso del sistema de producción.

Con base en el análisis se tomó como referencia la determinación de las variables representativas que intervienen en el sistema, captación de datos, modelado del sistema, procesamiento de la informacion usando el modelado matemático representativo, lo anterior permite tener una herramienta de planeación de la producción útil en la toma de decisiones en el sector industrial forestal.

4.3.1. DETERMINACION DE VARIABLES DEL SISTEMA

En el proceso de aserrado de la madera, al igual que en cualquier otro proceso productivo, intervienen diferentes variables de mayor o menor importancia, las cuales en todo momento controlan el comportamiento del sistema, haciendo depender de estas la produccion que se esté manejando.

En los sistemas primarios de aserrío, intervienen un gran número de variables, las cuales restringen y controlan la producción. En el proceso real las variables que permiten tener dominio y control sobre dicho sistema son: *materias primas, tiempo de maquinado y proceso, insumos, mantenimiento, mano de obra, energía eléctrica, mercado, capacidad instalada, inventario inicial, tiempo extraordinario,* entre otras.

A).- MATERIAS PRIMAS

Las materias primas constituyen una restricción importante, debido a que dependiendo de las características físicas de éstas, dependerá, tanto su costo como el valor agregado que se le asocie al producto.

En el sistema analizado se trabajan diferentes largos como lo son 8´, 10´, 12´, 14´, 16´, 18´, 20´, 22´ ; debido a los requerimientos del mercado y a las disponibilidades del recurso existente en las areas de abastecimiento. Los diámetros con que comúnmente se trabaja van de 12 a 30 pulgadas en general y estos son acordes con la tecnologia que presenta el proceso y con las características del recurso que se encuentra en las areas de abastecimiento.

La disponibilidad de abastecimiento de materia prima es de 5000 m^3r. mensuales, para el caso que se trabaje un turno, la disponibilidad maxima al mes es de 10 000 m^3r. El 70 % del abastecimiento corresponde a diámetros de (12 a 21 pulgadas), que corresponden al primer grupo de procesamiento; y el 30 % restante corresponde a diámetros que oscilan en (22 a 30 pulgadas) de diametro.

El formato de las restricciones de materia prima es el costo asociado a cada pieza comercial obtenida de largos y diametros diferentes, cada variable corresponde a una medida comercial específica, originada por un rango diamétrico y largo dado.

B).- TIEMPO DE MAQUINA

Es una de las variables que intervienen en forma directa. La cuantificación del tiempo de proceso se lleva a cabo haciendo un analisis de tiempos y movimientos para los diferentes rangos diamétricos y largos que presentan los abastecimientos de materias primas. Esta restriccion está formada por todas las medidas comerciales obtenidas en el proceso [variables Xi], cada una corresponde de forma ordenada a cierta medida comercial, como se muestra en el anexo1.

Esta variable es definida por el tiempo empleado en la máquina para producir dicha pieza. Este depende en gran medida de la densidad de la madera así como tambien del largo del producto, ya que los tiempos empleados varian en cierta medida con el largo de las piezas. Se toma tambien en cuenta el diametro de la troza del que provengan las medidas comerciales mencionadas, ya que los tiempos empleados en aserrar diferentes rollos varian notablemente.

C).- INSUMOS

La restricción de insumos es una variable del proceso de aserrío e incluye gastos de diesel, aceites, grasas, estopas, etc.. El gasto del mismo depende fundamentalmente del volumen de producción aunque en realidad no varia de forma proporcional con esta, lo que quiere decir que no es notorio un cambio
Esta variable es definida como el gasto de insumos por pieza evaluada en base al tiempo empleado en producir dicha pieza. La restricción es formada por las [Xi] variables que conforman las diferentes medidas comerciales.

D).- MANTENIMIENTO

Este concepto es manejado como directamente proporcional a la producción, la restricción (es) esta(n) formada (s) por [Xi] variables, correspondientes a cada una de las medidas comerciales especificadas (anexo 1) y son definidas como el costo de mantenimiento por cada pieza evaluada tomando como base un periodo de operación tipo.

E).- MANO DE OBRA

Esta variable es una de las mas significativas. De acuerdo al análisis representa uno de los gastos por unidad producido más representativo. El gasto global en el área de proceso depende del volumen que se este produciendo en el periodo analizado.

Esta variable se define como gasto de mano de obra directa e indirecta invertida en producir una pieza determinada y evaluada en función del tiempo.
Dicha restricción está formada por las variables [Xi] que corresponden a diferentes medidas comerciales.

F).- ENERGIA ELECTRICA

Esta variable es tomada como el gasto de energia eléctrica necesario para producir cada pieza especifica, representada por una medida comercial. La restriccion está formada por [Xi], cada una de las cuales representa un producto determinado (medida comercial).

G).- MERCADO

Esta variable es establecida por las medidas comerciales más demandadas y restringidas por la capacidad que la planta puede ofrecer a los consumidores, hoy dia el mercado se encuentra abierto a este producto y presenta características de consumir lo que se le ofrezca, por lo que presenta todas las características de un mercado cautivo.

H).- CAPACIDAD INSTALADA

Para el análisis es tomada una planta que es considerada como una de las plantas tipo por sus características de operación y tecnologia con que cuenta, la misma se encuentra instalada en el poblado de Villa Madero en el estado de Michoacán, es generalizable la operación a las que se encuentran operando en las diferentes regiones forestales con que cuenta el país. La planta de referencia tiene una capacidad instalada de 50 000 Pt-Turno.

4.3.2. OBTENCION DE LA INFORMACION

En el desarrollo del estudio de la planeación de la produccion, es necesario contar con información lo suficientemente confiable y adecuada. Para la captación de información se recurrío a la fuente directa como lo es la planta de aserrio de *Productora Forestal de Michoacán (PROFORMICH)* ubicada en el poblado de Villa Madero en Michoacán y en las plantas de *Madera y Derivados de Tumbiscatio*, ubicadas en el poblado de Tumbiscatio Michoacán. la información usada corresponde al periodo de operacion de octubre, noviembre, diciembre de 1993 y enero de 1994 en los que se manejaron un promedio de 32 000 m^3r.

Una vez que se concluyó la etapa de captacion de la información, se procedio a procesarla y analizarla para traducirla en una forma adecuada para ser utilizada como datos representativos de las variables consideradas dentro del modelado establecido en el capítulo 3.

El modelo fue elaborado para un periodo de operación de un mes, trabajando 25 días hábiles con un turno de 8 hrs., y teniendo disponibilidad de 160 hrs. efectivas de proceso al mes, el abastecimiento de materias primas disponible está dado para las necesidades que requiere la planta operándola al 100 % de su capacidad instalada por turno, pero se tiene disponibilidad de abastecimiento de materias primas hasta para dos turnos.

En el analisis se incluye un conjunto de problemas de prueba que tienen 8 tipos de productos su presentación desglosada es hecha en el anexo1. La asignación de familias a través de tipos es dada como se muestra

TABLA 4.6.

Número de Familias en:								Total de Familias
Tipo 1	**Tipo 2**	**Tipo 3**	**Tipo 4**	**Tipo 5**	**Tipo 6**	**Tipo 7**	**Tipo 8**	**No.Fam.**
1	1	1	1	1	1	1	1	8
2	2	2	2	2	2	2	2	16
4	4	4	4	4	4	4	4	32

Además se procesaron problemas que incluirán dos familias para todos los tipos, así como 4 familias para todos los tipos, en este caso particular se incluyen los 160 productos diferentes que es susceptible manejar en el aserradero en medidas comerciales como se muestra en el anexo 1. Se observa en la tabla anterior que el manejo de los problemas hace uso del principio de Sistemas Flexibles de Manufactura y Celular dado que se tomaron como criterio de operación los tipos y familias, lo cual permite tener grupos de operaciones estándar. El manejo de una familia en el modelado incluye 5 medidas comerciales diferentes de madera aserrada, para 2 familias el número de medidas comerciales es de 10 y para el caso de 4 es de 20 medidas comerciales diferentes para cada uno de los tipos que se tienen, las cuales participan en la obtención de la política óptima de producción.

En lo referente al ***costo de tiempo extra***, es denotado por C_t y tomado como 5.00 unidades monetarias para todo periodo, para todos los problemas tratados.

El ***Costo de Almacenamiento*** del inventario h_{it} es de 1 para el tipo 1, 1.75 para el tipo 2, 2 para el tipo 3; 2.5 para el tipo 4; 3 para el tipo 5; 3.2 para el tipo 6; 3.5

para el tipo 7; 4 para el tipo 8, para todos los periodos y para todos los problemas tratados.

Los ***Costos de Preparación*** son definidos para cada familia en relación con el tipo en el que son clasificadas, estos son dados como se muestra:

TABLA 4.7.

TIPO	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Costo de preparación (N$)	**100**	**110**	**118**	**125**	**130**	**133**	**135**	**138**

El tiempo regular disponible para un conjunto de **k** problemas, para un periodo **t** se recomienda sea calculado como:

$$r_t^k = 1/12 \sum_i \sum_j k_i d_{jt}^k \quad .$$

Donde $\mathbf{k_i}$ es (1.2, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5) respectivamente para los 8 tipos.

La ***demanda de familias*** para el problema del conjunto **k**, para la familia **j** en el periodo **t** es dada por:

$$d_{jt}^k = f_{it}^k u_j \;\; ; \;\; j \in T(i)$$

Donde : $\mathbf{f_{it}^k}$ = factor de estacionalidad para el tipo **i** en el periodo **t** en el problema del conjunto **k**.

$\mathbf{u_j}$ = demanda de familia, es posible generarla aleatoriamente para una distribución uniforme en el rango (D_j, D'_j) La demanda a usar en los problemas es dada en cada caso como se muestra en cada política de producción, la misma fue obtenida de un estudio de mercado comercialización y precios elaborado previamente para tal fin.

En la solución del problema, se tienen varias alternativas de operacion del sistema de producción, en las que ***se busca se cumplan los objetivos generales*** del mismo como lo son la **satisfacción de la demanda**, el **conocimiento de los niveles de producción en unidad de tiempo**, así como el **nivel de inventario** tales que satisfagan las restricciones del modelo y que esto lleve a la **obtención de una política óptima de operación.**

Para el caso se obtuvieron planes de producción para cada caso mostrado en la tabla 4.6, sin embargo los más representativos desde el punto de vista práctico, debido a que cumplen eficientemente con las características físicas y del mercado del proceso analizado, son establecidos para cada tipo en los que se incluyen 4 familias diferentes para cada caso, los mismos presentan 20 medidas comerciales diferentes de madera aserrada para cada análisis como se muestra en el anexo 1.

En cada plan de producción se especifica la medida comercial y su ubicación con respecto a la familia y tipo en que se encuentra, la misma contribuye de forma eficiente en la función objetivo en la minimización del costo, en la satisfacción de la demanda, se especifica el nivel de producción de ésta, así como su nivel de inventario en el horizonte de planeación considerado de 12 meses (1 año) de operación, este proceso es dinámico en el análisis, esto le permitirá al empresario definir con claridad su forma de operación de la planta. Los planes de producción son:

PLAN DE PRODUCCION 1:

El plan de produccion se diseña para el ***tipo 1*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificacion hecha en el anexo 1, la solucion obtenida es:

TABLA 4.8

TIPO 1												
	Familia 1			Familia 2			Familia 3			Familia 4		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*40*	*125*	*0*	*40*	*90*	*0*	*65*	*65*	*0*	*70*	*120*	*0*
2	*60*	*0*	*85*	*50*	*6*	*50*	*120*	*120*	*0*	*50*	*0*	*50*
3	*25*	*0*	*25*	*50*	*90*	*0*	*120*	*145*	*0*	*100*	*190*	*0*
4	*65*	*65*	*0*	*40*	*0*	*40*	*25*	*0*	*25*	*90*	*0*	*90*
5	*120*	*120*	*0*	*70*	*120*	*0*	*60*	*120*	*0*	*80*	*120*	*0*
6	*120*	*145*	*0*	*50*	*0*	*50*	*60*	*0*	*60*	*40*	*0*	*40*
7	*25*	*0*	*25*	*100*	*190*	*0*	*85*	*125*	*0*	*60*	*85*	*0*
8	*60*	*120*	*0*	*90*	*0*	*90*	*40*	*0*	*40*	*25*	*0*	*25*
9	*60*	*0*	*60*	*80*	*120*	*0*	*40*	*90*	*0*	*65*	*65*	*0*
10	*85*	*165*	*0*	*40*	*0*	*40*	*50*	*0*	*50*	*120*	*120*	*0*
11	*40*	*0*	*80*	*60*	*85*	*0*	*50*	*90*	*0*	*120*	*145*	*0*
12	*40*	*0*	*40*	*25*	*0*	*25*	*40*	*0*	*40*	*25*	*0*	*25*

T = meses. D = nivel de demanda. P = nivel de produccion. I = nivel de inventario

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.9

FAMILIAS	PRODUCTO	t (min)	COSTO (N$)
1	(3/4" x 6" x 8")	.826	3891.60
2	(1/2" x 8" x 8")		
3	(2" x 10" x 8")		
4	(3/4" x 12" x 8")		

t(min) = tiempo en min

PLAN DE PRODUCCION 2:

Se diseña para el ***tipo 2*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.10

TIPO 2												
	Familia 1			Familia 2			Familia 3			Familia 4		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*32*	*98*	*0*	*40*	*108*	*0*	*84*	*84*	*0*	*50*	*150*	*0*
2	*48*	*0*	*66*	*40*	*0*	*68*	*120*	*145*	*0*	*100*	*0*	*100*
3	*18*	*0*	*18*	*28*	*0*	*28*	*25*	*0*	*25*	*108*	*108*	*0*
4	*33*	*117*	*0*	*49*	*99*	*0*	*72*	*150*	*0*	*104*	*136*	*0*
5	*84*	*0*	*84*	*50*	*0*	*50*	*78*	*0*	*78*	*32*	*0*	*32*
6	*120*	*145*	*0*	*100*	*208*	*0*	*127*	*175*	*0*	*48*	*99*	*0*
7	*25*	*0*	*25*	*108*	*0*	*108*	*48*	*0*	*48*	*18*	*0*	*51*
8	*72*	*150*	*0*	*104*	*136*	*0*	*40*	*80*	*0*	*33*	*0*	*33*
9	*78*	*0*	*78*	*32*	*0*	*32*	*40*	*0*	*40*	*84*	*84*	*0*
10	*128*	*216*	*0*	*48*	*97*	*0*	*40*	*117*	*0*	*120*	*145*	*0*
11	*48*	*0*	*88*	*17*	*0*	*49*	*28*	*0*	*77*	*25*	*0*	*25*
12	*40*	*0*	*40*	*32*	*0*	*32*	*49*	*0*	*49*	*72*	*72*	*0*

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.11

FAMILIAS	PRODUCTO	t (min)	COSTO (N$)
1	(1/2'' x 6'' x 10')	.796	3894.25
2	(2'' x 8'' x 10')		
3	(3/4'' x 10'' x 10')		
4	(1/2'' x 12'' 10')		

t(min) = tiempo en min

PLAN DE PRODUCCION 3:

Se diseña para el ***tipo 3*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.12

TIPO 3												
	Familia 1			**Familia 2**			**Familia 3**			**Familia 4**		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*40*	*125*	*0*	*50*	*140*	*0*	*156*	*156*	*0*	*65*	*65*	*0*
2	*60*	*0*	*85*	*50*	*0*	*90*	*180*	*213*	*0*	*130*	*220*	*0*
3	*25*	*0*	*25*	*40*	*0*	*40*	*33*	*0*	*33*	*90*	*0*	*90*
4	*78*	*78*	*0*	*105*	*170*	*0*	*60*	*114*	*0*	*80*	*120*	*0*
5	*156*	*156*	*0*	*65*	*0*	*65*	*54*	*0*	*54*	*40*	*0*	*40*
6	*180*	*213*	*0*	*130*	*220*	*0*	*60*	*116*	*0*	*60*	*85*	*0*
7	*33*	*0*	*33*	*90*	*0*	*90*	*24*	*0*	*56*	*25*	*0*	*25*
8	*60*	*114*	*0*	*80*	*120*	*0*	*32*	*0*	*32*	*78*	*78*	*0*
9	*54*	*0*	*54*	*40*	*0*	*40*	*50*	*140*	*0*	*156*	*156*	*0*
10	*60*	*116*	*0*	*60*	*85*	*0*	*50*	*0*	*90*	*180*	*212*	*0*
11	*24*	*0*	*56*	*25*	*0*	*25*	*40*	*0*	*40*	*32*	*0*	*32*
12	*32*	*0*	*32*	*78*	*78*	*0*	*105*	*105*	*0*	*60*	*60*	*0*

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.13

FAMILIAS	**PRODUCTO**	**t (min)**	**COSTO (N$)**
1	(1 1/2'' x 6'' x 12')	.903	4247.00
2	(3/4'' x 8'' x 12')		
3	(1 1/2'' x 10'' x 12')		
4	(3/4'' x 12'' x 12')		

t(min) = tiempo en min.

PLAN DE PRODUCCION 4:

Se diseña para el ***tipo 4*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificacion hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.14

TIPO 4												
	Familia 1			**Familia 2**			**Familia 3**			**Familia 4**		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*20*	*90*	*0*	*40*	*110*	*0*	*100*	*220*	*0*	*40*	*115*	*0*
2	*50*	*0*	*70*	*40*	*0*	*70*	*100*	*0*	*120*	*75*	*0*	*75*
3	*20*	*0*	*20*	*30*	*0*	*30*	*20*	*0*	*20*	*75*	*155*	*0*
4	*45*	*145*	*0*	*50*	*90*	*0*	*50*	*100*	*0*	*60*	*0*	*80*
5	*100*	*0*	*100*	*40*	*0*	*40*	*50*	*0*	*50*	*20*	*0*	*20*
6	*100*	*120*	*0*	*75*	*150*	*0*	*70*	*100*	*0*	*50*	*115*	*0*
7	*20*	*0*	*20*	*75*	*0*	*75*	*30*	*0*	*30*	*20*	*0*	*65*
8	*50*	*100*	*0*	*60*	*80*	*0*	*50*	*130*	*0*	*45*	*0*	*45*
9	*50*	*0*	*50*	*20*	*0*	*20*	*40*	*0*	*80*	*100*	*100*	*0*
10	*70*	*150*	*0*	*50*	*115*	*0*	*40*	*0*	*40*	*100*	*170*	*0*
11	*30*	*0*	*80*	*20*	*0*	*65*	*30*	*80*	*0*	*20*	*0*	*70*
12	*50*	*0*	*50*	*45*	*0*	*45*	*50*	*0*	*50*	*50*	*0*	*50*

T meses, D nivel de demanda, P nivel de producción, I Nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.15

FAMILIAS	**PRODUCTO**	**t (min)**	**COSTO (N$)**
1	(1/2´´ x 6´´ x 14´)		
2	(1 1/2´´ x 8´´ x 14´)	550	4080.00
3	(3/2´´ x 10´´ x 14´)		
4	(3/4´´ x 12´´ x 14´)		

t(min) tiempo en min

PLAN DE PRODUCCION 5:

Se diseña para el ***tipo 5*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.16

TIPO 5												
	Familia 1			**Familia 2**			**Familia 3**			**Familia 4**		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*16*	*93*	*0*	*32*	*110*	*0*	*70*	*190*	*0*	*40*	*115*	*0*
2	*40*	*0*	*77*	*32*	*0*	*78*	*100*	*0*	*120*	*75*	*0*	*75*
3	*14*	*0*	*37*	*21*	*0*	*46*	*20*	*0*	*20*	*90*	*196*	*0*
4	*23*	*0*	*23*	*25*	*0*	*25*	*60*	*125*	*0*	*90*	*0*	*105*
5	*70*	*190*	*0*	*40*	*115*	*0*	*65*	*0*	*65*	*16*	*0*	*16*
6	*100*	*0*	*120*	*75*	*0*	*75*	*105*	*141*	*0*	*40*	*77*	*0*
7	*20*	*0*	*20*	*90*	*196*	*0*	*36*	*0*	*36*	*14*	*0*	*37*
8	*60*	*125*	*0*	*90*	*0*	*106*	*50*	*82*	*0*	*23*	*0*	*23*
9	*65*	*0*	*65*	*16*	*0*	*16*	*32*	*0*	*32*	*70*	*190*	*0*
10	*105*	*191*	*0*	*40*	*77*	*0*	*32*	*78*	*0*	*100*	*0*	*120*
11	*36*	*0*	*86*	*14*	*0*	*37*	*21*	*0*	*46*	*20*	*0*	*20*
12	*50*	*0*	*50*	*23*	*0*	*23*	*25*	*0*	*25*	*60*	*60*	*0*

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.17

FAMILIAS	**PRODUCTO**	**t (min)**	**COSTO (N$)**
1	(2´´ x 6´´ x 16´)	.54	4019.00
2	(3 1/2´´ x 8´´ x 16´)		
3	(3/4´´ x 10´´ x 16´)		
4	(3/4´´ x 12´´ x 16´)		

t (min) = tiempo en min

PLAN DE PRODUCCION 6:

Se diseña para el ***tipo 6*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.18

TIPO 6												
	Familia 1			Familia 2			Familia 3			Familia 4		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	30	110	0	45	125	0	143	143	0	59	194	0
2	55	0	80	45	0	80	165	198	0	135	0	135
3	25	0	25	35	0	35	33	0	33	120	240	0
4	66	66	0	72	131	0	55	105	0	90	0	120
5	143	143	0	59	0	59	50	0	50	30	0	30
6	165	198	0	135	135	0	56	113	0	55	146	0
7	33	0	33	120	240	0	21	0	57	25	0	91
8	55	105	0	90	0	120	36	0	36	66	0	66
9	50	0	50	30	0	30	45	125	0	143	143	0
10	56	113	0	55	146	0	45	0	80	165	253	0
11	21	0	57	25	0	91	35	0	35	33	0	88
12	36	0	36	66	0	66	72	72	0	55	0	55

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.19

FAMILIAS	PRODUCTO	t (min)	COSTO (N$)
1	(3/4'' x 6'' x 18')	.81	4634.4
2	(1 1/2'' x 8'' x 18')		
3	(2'' x 10'' x 18')		
4	(3.4'' x 12'' x 18')		

t(min) = tiempo en min.

PLAN DE PRODUCCION 7:

Se diseña para el ***tipo*** *7* y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.20

TIPO 7												
	Familia 1			Familia 2			Familia 3			Familia 4		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*24*	*112*	*0*	*36*	*72*	*0*	*77*	*157*	*0*	*32*	*122*	*0*
2	*44*	*0*	*88*	*36*	*0*	*36*	*25*	*0*	*80*	*90*	*0*	*90*
3	*18*	*0*	*44*	*32*	*94*	*0*	*55*	*0*	*55*	*80*	*188*	*0*
4	*26*	*0*	*26*	*30*	*0*	*62*	*66*	*138*	*0*	*84*	*0*	*108*
5	*77*	*157*	*0*	*32*	*0*	*32*	*72*	*0*	*72*	*24*	*0*	*24*
6	*25*	*0*	*80*	*90*	*170*	*0*	*120*	*162*	*0*	*44*	*88*	*0*
7	*55*	*0*	*55*	*80*	*0*	*80*	*42*	*0*	*42*	*18*	*0*	*44*
8	*66*	*138*	*0*	*84*	*108*	*0*	*45*	*81*	*0*	*26*	*0*	*26*
9	*72*	*0*	*72*	*24*	*0*	*24*	*36*	*0*	*36*	*77*	*102*	*0*
10	*120*	*207*	*0*	*44*	*88*	*0*	*36*	*98*	*0*	*25*	*0*	*25*
11	*42*	*0*	*87*	*18*	*0*	*44*	*32*	*0*	*62*	*55*	*121*	*0*
12	*45*	*0*	*45*	*26*	*0*	*26*	*30*	*0*	*30*	*66*	*0*	*66*

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.21

FAMILIAS	PRODUCTO	t (min)	COSTO (N$)
1	(3/2'' x 6'' x 20')	.58	4192.50
2	(2'' x 8'' x 20')		
3	(2'' x 10'' x 20')		
4	(3 1/2'' x 12'' x 20')		

t(min) = tiempo en min.

PLAN DE PRODUCCION 8:

Se diseña para el ***tipo 8*** y para 4 familias de acuerdo a la clasificación hecha en el anexo 1, la solución obtenida es:

TABLA 4.22

TIPO 8												
	Familia 1			Familia 2			Familia 3			Familia 4		
T	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**	**D**	**P**	**I**
1	*30*	*110*	*0*	*45*	*125*	*0*	*110*	*245*	*0*	*45*	*135*	*0*
2	*55*	*0*	*80*	*45*	*0*	*80*	*110*	*0*	*135*	*90*	*0*	*90*
3	*25*	*0*	*25*	*35*	*0*	*35*	*25*	*0*	*25*	*80*	*180*	*0*
4	*55*	*165*	*0*	*60*	*105*	*0*	*55*	*110*	*0*	*70*	*0*	*100*
5	*110*	*0*	*110*	*45*	*0*	*45*	*55*	*0*	*55*	*30*	*0*	*30*
6	*110*	*135*	*0*	*90*	*170*	*0*	*80*	*160*	*0*	*55*	*135*	*0*
7	*25*	*0*	*25*	*80*	*0*	*80*	*35*	*0*	*80*	*25*	*0*	*80*
8	*55*	*110*	*0*	*70*	*100*	*0*	*45*	*0*	*45*	*55*	*0*	*55*
9	*55*	*0*	*55*	*30*	*0*	*30*	*45*	*90*	*0*	*110*	*110*	*0*
10	*80*	*160*	*0*	*55*	*135*	*0*	*45*	*0*	*45*	*110*	*190*	*0*
11	*35*	*0*	*80*	*25*	*0*	*80*	*35*	*95*	*0*	*25*	*0*	*80*
12	*45*	*0*	*45*	*55*	*0*	*55*	*60*	*0*	*60*	*55*	*0*	*55*

T = meses, D = nivel de demanda, P = nivel de producción, I = nivel de inventario.

El plan de producción incluye medidas comerciales correspondientes a cada familia para este tipo, como se muestra:

TABLA 4.23

FAMILIAS	PRODUCTO	t (min)	COSTO (N$)
1	(3 1/2'' x 6'' x 22')	7	4600.00
2	(2'' x 8'' x 22')		
3	(2'' x 10'' x 22')		
4	(1 1/2'' x 12'' x 22')		

t(min) = tiempo en min

PLAN DE PRODUCCION 9:

A diferencia de los planes de produccion anteriores este se elaboró incluyendo todos los tipos manejados en el proceso y las familias 1 y 2 para todos los tipos de acuerdo a lo establecido en el anexo 1. Las tablas que incluye el plan son (4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28).

TABLA 4.24

	TIPO 1						TIPO 2					
	Familia 1			Familia 2			Familia 1			Familia 2		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	40	125	0	40	90	0	32	98	0	30	108	0
2	60	0	85	50	0	50	48	0	66	40	0	68
3	25	0	25	50	90	0	18	0	18	28	0	28
4	65	65	0	40	0	40	33	117	0	39	99	0
5	120	120	0	70	120	0	84	0	84	50	0	50
6	120	145	0	50	0	50	120	145	0	100	208	0
7	25	0	25	100	190	0	25	0	25	108	0	108
8	60	120	0	90	0	90	72	150	0	104	136	0
9	60	0	60	80	120	0	78	0	78	32	0	32
10	85	165	0	40	0	40	128	216	0	48	97	0
11	40	0	80	60	85	0	48	0	88	17	0	49
12	40	0	40	25	0	25	40	0	40	32	0	32

Tabla 4.25 correspondiente al Plan 9.

	TIPO 3						TIPO 4					
	Familia 1			Familia 2			Familia 1			Familia 2		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	40	125	0	50	140	0	20	90	0	40	110	0
2	60	0	85	50	0	90	50	0	70	40	0	70
3	25	0	25	40	0	40	20	0	20	30	0	30
4	78	78	0	105	170	0	45	145	0	50	90	0
5	156	156	0	65	0	65	100	0	100	40	0	40
6	180	213	0	130	220	0	100	120	0	75	150	0
7	33	0	33	90	0	90	20	0	20	75	0	75
8	60	114	0	80	120	0	50	100	0	60	80	0
9	54	0	54	40	0	40	50	0	50	20	0	20
10	60	116	0	60	85	0	70	150	0	50	115	0
11	24	0	56	25	0	25	30	0	80	20	0	65
12	32	0	32	78	78	0	50	0	50	45	0	45

Tabla 4.26 correspondiente al Plan 9.

	TIPO 5						TIPO 6					
	Familia 1			Familia 2			Familia 1			Familia 2		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	16	93	0	32	110	0	30	110	0	45	125	0
2	40	0	77	32	0	78	55	0	80	45	0	80
3	14	0	37	21	0	46	25	0	25	35	0	35
4	23	0	23	25	0	25	66	66	0	72	131	0
5	70	190	0	40	115	0	143	143	0	59	0	59
6	100	0	120	75	0	75	165	198	0	135	135	0
7	20	0	20	90	196	0	33	0	33	120	240	0
8	60	125	0	90	0	106	55	105	0	90	0	120
9	65	0	65	16	0	16	50	0	50	30	0	30
10	105	191	0	40	77	0	56	113	0	55	146	0
11	36	0	86	14	0	37	21	0	57	25	0	91
12	50	0	50	23	0	23	36	0	36	66	0	66

Tabla 4.27 correspondiente al Plan 9.

	TIPO 7						TIPO 8					
	Familia 1			Familia 2			Familia 1			Familia 2		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	24	112	0	36	72	0	30	110	0	45	125	0
2	44	0	88	36	0	36	55	0	80	45	0	80
3	18	0	44	32	94	0	25	0	25	35	0	35
4	26	0	26	30	0	62	55	165	0	60	105	0
5	77	157	0	32	0	32	110	0	110	45	0	45
6	25	0	80	90	170	0	110	135	0	90	170	0
7	55	0	55	80	0	80	25	0	25	80	0	80
8	66	138	0	84	108	0	55	110	0	70	160	0
9	72	0	72	24	0	24	55	0	55	30	0	30
10	120	207	0	44	88	0	80	160	0	55	135	0
11	42	0	87	18	0	44	35	0	80	25	0	80
12	45	0	45	26	0	26	45	0	45	55	0	55

Dicho plan de producción incluye las medidas comerciales mostradas, así como la ubicación respecto a las familias en las que se encuentran y estas a su vez su ubicación con respecto del tipo correspondiente.

TABLA 4.28

TIPO	FAMILIA	PRODUCTO	T (min)	COSTO (N$9)
1	*1*	*3/4''x 6''x8'*	*3.03*	*16 411.2*
	2	*1/2''x8''x8'*		
2	*1*	*3 1/2''x6''x10'*		
	2	*2''x8''x10'*		
3	*1*	*1 1/2''x6''x12'*		
	2	*3/4''x8''12'*		
4	*1*	*1/2''x6''x14'*		
	2	*1 1/2''x10''x14'*		
5	*1*	*2''x6''x16'*		
	2	*3 1/2''x8''16'*		
6	*1*	*3/4''x6''x18'*		
	2	*1 1/2''x8''x18'*		
7	*1*	*3 1/2''x6''x20'*		
	2	*2''x8''x20'*		
8	*1*	*3 1/2''x6''x22'*		
	2	*3/4''x8''x22'*		

T(min) tiempo en minutos

PLAN DE PRODUCCION 10.

Este plan se elaboró incluyendo todos los tipos manejados en el proceso de produccion y las familias 3 y 4, de acuerdo a lo establecido en el anexo 1. Las tablas incluidas en el plan son (4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.3).

TABLA 4.29

	TIPO 1						TIPO 2					
	Familia 3			Familia 4			Familia 3			Familia 4		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	65	65	0	70	120	0	84	84	0	50	150	0
2	120	120	0	50	0	50	120	145	0	100	0	100
3	120	145	0	100	190	0	25	0	25	108	108	0
4	25	0	25	90	0	90	72	150	0	104	136	0
5	60	120	0	80	120	0	78	0	78	32	0	32
6	60	0	60	40	0	40	127	175	0	48	99	0
7	85	125	0	60	85	0	48	0	48	18	0	51
8	40	0	40	25	0	25	40	80	0	33	0	33
9	40	90	0	65	65	0	40	0	40	84	84	0
10	50	0	50	120	120	0	40	117	0	120	145	0
11	50	90	0	120	145	0	28	0	77	25	0	25
12	40	0	40	25	0	25	49	0	49	72	72	0

Tabla 4.30 correspondiente al Plan 10.

	TIPO 3						TIPO 4					
	Familia 3			Familia 4			Familia 3			Familia 4		
T	D	P	I	D	P	T	D	P	I	D	P	I
1	156	156	0	65	65	0	100	220	0	40	115	0
2	180	213	0	130	220	0	100	0	120	75	0	75
3	33	0	33	90	0	90	20	0	20	75	155	0
4	60	114	0	80	120	0	50	100	0	60	0	80
5	54	0	54	40	0	40	50	0	50	20	0	20
6	60	116	0	60	85	0	70	100	0	50	115	0
7	24	0	56	25	0	25	30	0	30	20	0	65
8	32	0	32	78	78	0	50	130	0	45	0	45
9	50	140	0	156	156	0	40	0	80	100	100	0
10	50	0	90	180	212	0	40	0	40	100	170	0
11	40	0	40	32	0	32	30	80	0	20	0	70
12	105	105	0	60	60	0	50	0	50	50	0	50

Tabla 4.31 del Plan 10.

	TIPO 5						TIPO 6					
	Familia 3			Familia 4			Familia 3			Familia 4		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	70	190	0	40	115	0	143	143	0	59	194	0
2	100	0	120	75	0	75	165	198	0	135	0	135
3	20	0	20	90	196	0	33	0	35	120	240	0
4	60	125	0	90	0	106	55	105	0	90	0	120
5	65	0	65	16	0	16	50	0	50	30	0	30
6	105	141	0	40	77	0	56	113	0	55	146	0
7	36	0	36	14	0	37	21	0	57	25	0	91
8	50	82	0	23	0	23	36	0	36	66	0	66
9	32	0	32	70	190	0	43	125	0	143	143	0
10	32	78	0	100	0	120	45	0	80	165	253	0
11	21	0	46	20	0	20	35	0	35	33	0	88
12	25	0	25	60	60	0	72	72	0	53	0	55

Tabla 4.32 del Plan 10.

	TIPO 7						TIPO 8					
	Familia 3			Familia 4			Familia 3			Familia 4		
T	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I
1	77	157	0	32	122	0	110	245	0	45	135	0
2	25	0	80	90	0	90	110	0	135	90	0	90
3	55	0	55	80	188	0	25	0	25	80	180	0
4	66	138	0	84	0	108	55	110	0	70	0	100
5	72	0	72	24	0	24	55	0	55	30	0	30
6	120	162	0	44	88	0	80	160	0	55	135	0
7	42	0	42	18	0	44	35	0	80	25	0	80
8	45	81	0	26	0	26	45	0	45	55	0	55
9	36	0	36	77	102	0	45	90	0	110	110	0
10	36	98	0	25	0	25	45	0	45	110	190	0
11	32	0	62	55	121	0	35	95	0	25	0	80
12	30	0	30	66	0	66	60	0	60	55	0	55

Dicho plan de producción incluye las medidas comerciales mostradas, así como la ubicación respecto a las familias en las que se encuentran y éstas a su vez su ubicacion con respecto del tipo correspondiente.

TABLA 4.33

TIPO	FAMILIA	PRODUCTO	T (min)	COSTO (N$)
1	*3*	*2''x10''x8'*		
	4	*3/4''x12''x8'*		
2	*3*	*3/4''x10''x10'*		
	4	*1/2''x12''x10'*		
3	*3*	*1 1/2''x10''x12'*		
	4	*3/4''x12''x12'*		
4	*3*	*3 1/2''x10''x14'*	*2.75*	*17 056. 95*
	4	*3/4''x12''x14'*		
5	*3*	*3/4''x10''16'*		
	4	*3/4''x12''x16'*		
6	*3*	*2''x10''x18'*		
	4	*3/4''x12''x18'*		
7	*3*	*2''x10''x20'*		
		3 1/2''x12''x20'		
8	*3*	*2''x10''x22'*		
	4	*1 1/2''x12''x22'*		

T(min) tiempo en minutos

EFICIENCIA COMPUTACIONAL

La implantación del problema de planeación de la producción tratado a sido posible hacerlo en una computadora personal, ya que no requiere de una gran capacidad de memoria y su solución es obtenida en tiempos razonables.

Los programas computacionales y procedimientos de los mismos, se realizarón en una computadora personal IBM-PS / 70 de 25 mhz. con procesador 80386 sin coprocesador matemático, los problemas para 240 y 480 variables 0-1, fuerón procesados en una computadora Hewlett Packard Vectra VL2 4/25e de 33 mhz, sin coprocesador matemático haciendo un tiempo promedio de 92 y 185.4 seg. en promedio, los datos incorporados a estos problemas fuerón generados de forma aleatória.

El sistema fue desarrollado para realizar como máximo 200 iteraciones como límite, para obtener la mejor solucion (no la óptima), ya que se trata de un heurístico, se estableció un nivel de tolerancia de 1E-4, entre los valores de cota inferior y superior para establecer el criterio de paro, como se cita puede ser hecho a través del número de iteraciones, o bien a través de la tolerancia.

El consumo de tiempo de CPU para el caso es dado como:

TABLA 4.34

<table>
<tr><th>Plan</th><th>T (p).</th><th>T (max).</th><th>T (min).</th><th>T (Prom).</th></tr>
<tr><td>1</td><td>49.56</td><td rowspan="8">54.18</td><td rowspan="8">32.4</td><td rowspan="8">42.85</td></tr>
<tr><td>2</td><td>47.76</td></tr>
<tr><td>3</td><td>54.18</td></tr>
<tr><td>4</td><td>33.54</td></tr>
<tr><td>5</td><td>32.4</td></tr>
<tr><td>6</td><td>48.6</td></tr>
<tr><td>7</td><td>34.8</td></tr>
<tr><td>8</td><td>42</td></tr>
<tr><td>9</td><td>181.8</td><td rowspan="2" colspan="2"></td><td rowspan="2">173.4</td></tr>
<tr><td>10</td><td>165</td></tr>
</table>

T(max) tiempo máximo en segundos. T(min) tiempo mínimo en seg., T(p) Tiempo plan seg.

Como se observa el tiempo promedio de CPU para el grupo de problemas de 1 a 8 es de 42.85 seg. y 173.4 seg. para el grupo de problemas 9 y 10. El algoritmo termina después de 4 iteraciones principales. En las primeras 3 iteraciones principales. los multiplicadores de lagrange se actualizaron 5 veces y en la última iteración se realizarón 105 actualizaciones.

La longitud del tamaño de paso es constante en el proceso de subgradiente y es escogido como: $\rho_l = 1.0$; si $l < 40$; 0.5; si $l \geq 40$. Se inicia haciendo $\lambda_{it} = 0$; el procedimiento de subgradiente actualiza la búsqueda para $\lambda = \lambda_l$ por movimientos en la direccion del subgradiente γ_t^l. el escalar θ tamaño de paso para el problema se usó como $\theta_l = 1$ para $l = 1, 2, \ldots, 10$; $\theta_l = 0.5$ para $l = 11, \ldots, 20$; $\theta = 0.25$, para $l = 21, \ldots, 30, \ldots$; para cada problema el procedimiento de subgradiente termina después de 60 iteraciones.

Aardal 1990, cita que para un problema con 5 familias y 7 periodos con 35 variables 0-1 y 105 variables continuas usando un código comercial para programacion entera mixta , los calculos fueron interrumpidos después de 10 hrs. de CPU en una computadora DEC-20. sin haber llegado a la solución.

Graves S. 1980. realiza experimentos en una computadora PRIME 400, la que cita es equivalente con una compatadora IBM 370 / 168 en problemas de prueba con datos generados aleatoriamente para casos del mismo nivel , tarda para el primer tipo de problema un tiempo promedio de 236 seg. y para el segundo grupo 311 seg., a su vez Aardal para los problemas analizados por Graves informa tiempos como se muestra en la tabla 4.35.

TABLA 4.35

Tipo	Familia	Variables 0-1.	Var.continuas	Tiempo promedio CPU (seg).			
				Graves	Aardal	Comercial	Trabajo
1	1 a 4	20	108	236	72		42.8
1-8	1 y 2: 3 y 4	80	192	311	184		173.4
		35	105			10 hrs	
		240	555				92
		480	1020				185.4

A continuación se presenta el porcentaje de desviacion existente entre la mejor solución factible y la cota inferior, para los problemas tratados.

Table 4.36

NIVEL	No. VAR. 0-1	No.VAR.CONT.	DESVIACION
B	20	108	1.27
M			0.5
A			1.48
B	80	192	1.03
M			2.19
A			1.47
B	240	555	0.57
M			0.38
A			0.6
B	480	1020	0.0
M			0.0
A			1.2

B= bajo, M= medio, A= alto. No Var 0-1= numero de variables 0-1. No Var. Cont= Numero variables continuas. Desviacion = %.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se partió del Estado del Arte, se revisaron diferentes métodos relacionados con la Planeación de la Producción. Se enfocó principalmente la atención al análisis de la técnica de descomposición de Benders, relacionada con el problema de la Planeación de la Producción Jerárquica.

Se hace una extensión a la teoría existente al respecto y se obtiene como resultado la metodología presentada para la solución del problema de la planeación de la Producción Jerárquica a través de un procedimiento heurístico para la determinación de soluciones factibles en un problema dinámico de planeación de la producción, para el caso que se manejan multiproductos.

Aprovechando la estructura general del problema de Programación Lineal Entera Mixta, se realiza una desagregación en dos subproblemas, de los cuales uno es lineal y el otro es un problema de tamaño de lote económico sin restricción de capacidad.

El algoritmo se aplica por primera vez en el sector industrial forestal (aserrío). En la literatura actual no se encuentran publicaciones a la fecha en este campo. Proporciona mayor eficiencia de solución con respecto a los algoritmos citados en la literatura especializada con problemas con un número de variables 0-1 equivalentes y mencionados como altamente eficientes.

Se exhibe eficiencia computacional, observándose que el algoritmo propuesto es más eficiente, con respecto de los citados en la literatura para instancias de problemas equivalentes.

El algoritmo propuesto proporciona una mayor información que los establecidos en la literatura, ya que da planes de producción con una especificación de niveles de demanda, medida comercial a producir en unidad de tiempo, así como su nivel de producción, presenta la calendarización del nivel de inventario, así como el costo del plan de producción en unidad de tiempo; a su vez la clasificación a nivel de articulo, familia y estas a su vez en tipos.

La comparación del algoritmo propuesto con respecto a las condiciones de operacion que usa el aserradero de PROFORMICH hoy día en la práctica es que le permite tener un nivel de respuesta en operación inmediata, en los niveles de tiempo especificados en este trabajo, sin el uso del algoritmo propuesto le lleva un 300 % de tiempo mas para planear su operacion en unidad de tiempo, ya que se opera con el criterio de pedido (prueba y error). En términos de costo se estima que se tiene un ahorro del 70 % aproximado sobre el que se gasta hoy día para realizar la planeacion y calendarización de la producción.

El aplicar el criterio especificado en el trabajo, le permite al industrial tener alto nivel de eficiencia de respuesta al mercado, con un costo de operación inferior, lo cual le garantiza permanencia y proyección en el sector industrial en el que se encuentra.

Es importante resaltar el hecho que la técnica resulta de gran valía cuando es aplicada a problemas en que se manejan multiproductos en procesos de mediana o gran escala que pertenecen a la clase NP-completo. El esfuerzo para instrumentar el algoritmo en computadora es eficiente dada la estructura que presentan los subproblemas ya que éstos son resueltos en tiempo polinomial, lo cual permite una instrumentación adecuada.

De lo anterior se tiene que la aplicación de los modelos de la Programación Lineal Entera Mixta, así como los criterios básicos de la teoría de decisiones, aplicadas a la planeación y programación de la producción jerárquica, así como la evaluación de sistemas productivos en el sector industrial forestal, proporcionan una herramienta poderosa y moderna de planeación, que ofrece grandes perspectivas con su aplicación en el futuro y abre el camino en el proceso de la toma de decisiones en este sector industrial en el País.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Arthur M. Geoffrion 1970. *Elements of large scale mathematical programming. part.II: synthesis of algorithms and bibliography*. Management Sci., vol.16, no.11, july.

Aardal Karen and Larsson Tobjorn 1990. *A Benders Descomposition based heuristic for the hierarchical production planning problem*. European Journal of Operational Research. 45, 4-14.

Browman, E.H. 1963. *Consistency and optimality in managerial decision making*. Management Sci. 9, 310-321.

Bitran, G.R., and A.C. Hax. 1977. *On the Design of Hierarchical Production Planning Systems*. Decision Sci. 8, 28-55.

Bitran, G.R., and A.C. Hax 1981. *Disaggregation and Resource Allocation Usin Covex Knapsack Problems*. Management Sci. 27, 431-441.

Bitran G.R., Haas E.A., Hax A.C. 1981. *Hierarchical Production Planning: A Single Stage System*. Operations Res. 30, 232-251.

Bedworth David D, and James E. Bailey 1987. *Integrated production control systems, 2nd ed.* New York, John Wiley.

Bard JF, Moore JT. 1990. *Production planning with variable demand*. Omega Int.J.Mgmt.Sci.vol.18, 35-42.

Caramanis Michael. 1987. *Production system design: A discrete event dinamic system and generalized Benders descomposition approach*.Int.J.Prod.Res.,vol 25, no.8, 1223-1234.

Cheng TCE, Chui CB 1988. *A case of production expansion planning in a soft-drink manufacturing company. Omega Int.J.Mgmt.sci. 521-532.*

Chin- Wen Lin and Colin L. Moodies 1989. *Hierarchical Production Planning for a Modern Steel Manufacturing System.* Int. J. Prod. Res., 1989. Vol. 27, No. 4, 613-628.

CNIF-1993. Reporte anual de la Camara Nacional Industrial Forestal.

Elmaleh, J. , Eilan, S. 1974. *A new approach to production switching.* Int.Journal production Research, 12, 673-681.

E.F. Peter Newson 1975. *Multi Item lot size Scheduling by heuristic part II: With variable resources.* Vol.21, No. 10, 1194-1204.

Fisher, M.L. 1981. *The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems.* Management Science 27, 1-18.

Goodman, D.A. 1974a. *A section search approach to agregate planning of production and work force.* Decision Sci. 5, 545-563.

Geoffrion, A.M. 1974. *Laggrangian relaxation for integer programming.* Mathematical Programming Study, 2, 82-114.

Graves Stephen C. 1982. *Using Lagrangean Techniques to Solve Hierarchical Production Planning Problems.* Management Sci 28, 260-274.

Gilles Cote, Michael A.Laughton 1984. *Large- scale mixed integer programming: Benders - type heuristics.* European J. of Operational Res. 16, 327-333.

Geoff Buxey 1988. *Production planning under seasonal demand: A case study perspective.* Omega Int.J.of Mgmt.Sci. vol 16, no.5, 447-455.

Gupta, O.K., Ravindran, A. 1985.. *Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming.* Management Sci., Vol. 31, no. 12.

Guignard Monique and Siwhan Kim 1987. *Lagrangean descomposition: A model yielding stronger lagrangean bounds.* Mathematical Programming 39, 215-228.

Gutierrez Andrade M.A. 1991. *La Técnica de Recocido Simulado y sus Aplicaciones.* DEPFI-UNAM. Tesis Doctoral.

Goldratt Elyahaum 1993. *La Meta.* Ediciones Castillo.

González Santoyo F. 1987. *Modelado Matemático de un Aserradero Estandar en el Estado de Michoacán.* Boletin No. 11 de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, pp. 21-33.

González Santoyo F. 1994. *Las Técnicas de Descomposición en la planeación de la producción.* Memorias del VII Congreso Latino Ibero-Americano de Investigación de Operaciones e Ingeniería de Sistemas, Santiago de Chile.

González Santoyo F., 1994. *Planeacion de la producción de sistemas de gran escala.* Memoria del encuentro anual de Inv. Cient. y tec. de la UMSNH.

González Santoyo F. 1994. *Problemática y perspectivas en el sector industrial forestal michoacano.* Universidad Michoacana, vol. 11, Enero-Marzo 1994, 100-104.

González Santoyo F., et al. 1995. *La planeacion de la producción Jerárquica.* Memorias de la Conferencia Internacional de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, la Habana Cuba.Enero.

Holt, Modigliani y Simon 1955. *A linear decision rule for production and employment scheduling.* Management Sci. 2, 1-30.

__________. Muth 1956. *Derivation of a linear decision rule for production and employment.* Management Sci. 2, 159-177.

__________ , 1960. *Planning production inventories and work force.* Prentice Hall, Englewood clieffs, nj.

Held, M., Wolfe, Ph. Crowder, H.P. 1974. *Validation de subgradient optimization.* Math. Prog. 6, 62-68.

Hackman T.Steven, Leachman C.R. 1989. *A general framework for modeling production.* Management Sci. vol.35, no.4, 478-495.

Johnson, L.A., and D.C. Montgomery 1974. *Operations Research in production Planning, Scheduling and inventory control.* john wiley and sons, NY.

Keith R. Plossl 1988. *Production in the factory of the future.* Int.J.Prod.Res. Vol.26., no. 3, 501-506.

K.Ishii, K.Takahashi, and R.Muramatsu 1988. *Integrated production, inventory distribution systems.* Int.J.Prod.Res., vol.26, no.3, 473-482.

Kirca Omer 1990. *An efficient algorithm for the capacited single item dynamic lot size problem.* European J.Op.Res. 45, 15-24.

Kathryn E. Stecke. 1992. *Planning and scheduling approaches to operate a particular FMS.* European J. Op.Res. 61, 273-291.

Lasdon, L.S. 1970. *Optimization theory for large systems.* Ny. Mc. Millan.

L.S.Lasdon, R.C.Terjung 1971. *An efficient algorithm for multi item scheduling.* Operations Res. 19, 946-969.

Lee, S.M., Moore, L.J. 1974. *A practical approach to production scheduling.* Journal of production and inventory management 15, 79-92.

Lee y Orr, D. 1977. *Further results on planning horizons in the production smoothin problem.* Management Sci.23, 490-498.

Lee L.Hau, Arai Yano Candace 1988. *Production control in multistage systems with variable yield losses.* Operations Research Society of America. 269-278.

Mellichamp, J.M., Love, R.M. 1978. *Production swiching heuristics for the agregate planning problem.* Management Sci. 24, 1242-1251.

Marshall L. Fisher 1981. *The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems.* Management Science. 27, 1-18.

M.A.H. Dempster, M.L. Fisher, A.H.G. Rinnooy Kan 1981. *Analytical Evaluation of Hierarchical Planning System.* Operations Researh. 29, no.4, 707-716.

Mattew J. Liberatore 1984. *A production planning and scheduling algorithm for two products processed on one line.* European Journal of Operational Res. 17, 351-360.

Orr, D. 1962. *A random walk production - inventory policy: rationale and inplementation.* Management Sci. 9, 108-122.

Silver, E.A. 1972. *Medium range agreggate production planning: state of the art.* Journal production and inventory management 13, 15-38.

Shapiro, J.F. 1979,. *Mathematical programing: structures and algorithms.* wiley, New York.

Spencer B. Smith 1989. *Computer based production and inventory contro.* Prentice Hall.

Sing N., Susuil, 1990. *A physical system theory framework for modeling manufacturing systems.* Int.J.Prod.Res. vol. 28, no. 6, 1067-1082.

Saikm M. Harvey, Mathur Kamlesh. 1990. *Foundations of integer programming.* North - Holland, NY.

San - jin Nam and Rasaratnam Logendran 1992. *Aggregate production planning-A survey of models and metodologies.* European Journal of Operational Research, 61, 255-272.

Serafini Paolo, Speranza Grazia M. 1992. *Production scheduling problems in a textile industry.* European Journal of operational Res. 58, 173-190.

Taubert, W.H. 1968. *A serach decision ... for aggregate scheduling problem.* Management Sci. 14, 343-359.

Tony J.Van Roy 1983. *Cross decomposition for mixed integer programming.* Mathematical Programming 25, 46-63

Vergin, R.C. 1966. *Production scheduling under seasonal demand.* Journal of industrial engineeering, 17, 260-266.

Vahid Lotfi, Wun-Hwa Chen 1991. *An optimal algorithm for the multi-item capacited production planning problem.* European J. Operational Res. 52, 179-193.

Wagner M. Harvey and Whithin M. Thomson 1958. *Dynamic version of the economic lot size model.* Management Sci., 5,1 (october), 89-96

Wagner 1969. *Principles of operation research.* Prentice Hall Inc.

Wemmerlov, U 1987. *Production planning and control procedures for cellular manufacturing systems: concepts and practice, falls church, va.:* American production and inventory control society.

_______ , and J.Vakharia 1991. *Job and family scheduling a flow line manufacturing cell. A simulation study.* IIE transactions, december.

William W.Trigeiro, L.Joshep Thomas , Jhon O. McClain 1989. *Capacited lot sizing which setup times.* Management Sci. 353-366.

You Lin Jianyu 1990. *Planeación del sistema de generación y transmisión usando técnicas de descomposición.* DEPFI-UNAM. Tesis doctoral.

APENDICE

Apendice 1.
Apéndice 2.
Apéndice 3.

Apéndice 1

ESTRUCTURA DEL MODELO

TIPOS: Largos en pies (8,10,12,14,16,18,20,22)

Familias: diferentes medidas comerciales por largos.

TIPO		TIPO		TIPO		TIPO		TIPO		TIPO		TIPO		TIPO	
LARGO 8		LARGO 10'		LARGO 12'		LARGO 14		LARGO 16'		LARGO 18'		LARGO 20'		LARGO 22'	
VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.	VA	M.C.
1	1/2" x 6" x 8	21	1/2" x 6" x 10	41	1/2" x 6" x 12	61	1/2" x 6" x 14	81	1/2" x 6" x 16	101	1/2" x 6" x 18	121	1/2" x 6" x 20	141	1/2" x 6" x 22
2	3/4" x 6" x 8	22	3/4" x 6" x 10	42	3/4" x 6" x 12	62	3/4" x 6" x 14	82	3/4" x 6" x 16	102	3/4" x 6" x 18	122	3/4" x 6" x 20	142	3/4" x 6" x 22
3	1 1/2" x 6" x 8	23	1 1/2" x 6" x 10	43	1 1/2" x 6" x 12	63	1 1/2" x 6" x 14	83	1 1/2" x 6" x 16	103	1 1/2" x 6" x 18	123	1 1/2" x 6" x 20	143	1 1/2" x 6" x 22
4	2" x 6" x 8	24	2" x 6" x 10	44	2" x 6" x 12	64	2" x 6" x 14	84	2" x 6" x 16	104	2" x 6" x 18	124	2" x 6" x 20	144	2" x 6" x 22
5	3 1/2" x 6" x 8	25	3 1/2" x 6" x 10	45	3 1/2" x 6" x 12	65	3 1/2" x 6" x 14	85	3 1/2" x 6" x 16	105	3 1/2" x 6" x 18	125	3 1/2" x 6" x 20	145	3 1/2" x 6" x 22
6	1/2" x 8" x 8	26	1/2" x 8" x 10	46	1/2" x 8" x 12	66	1/2" x 8" x 14	86	1/2" x 8" x 16	106	1/2" x 8" x 18	126	1/2" x 8" x 20	146	1/2" x 8" x 22
7	3/4" x 8" x 8	27	3/4" x 8" x 10	47	3/4" x 8" x 12	67	3/4" x 8" x 14	87	3/4" x 8" x 16	107	3/4" x 8" x 18	127	3/4" x 8" x 20	147	3/4" x 8" x 22
8	1 1/2" x 8" x 8	28	1 1/2" x 8" x 10	48	1 1/2" x 8" x 12	68	1 1/2" x 8" x 14	88	1 1/2" x 8" x 16	108	1 1/2" x 8" x 18	128	1 1/2" x 8" x 20	148	1 1/2" x 8" x 22
9	2" x 8" x 8	29	2" x 8" x 10	49	2" x 8" x 12	69	2" x 8" x 14	89	2" x 8" x 16	109	2" x 8" x 18	129	2" x 8" x 20	149	2" x 8" x 22
10	3 1/2" x 8" x 8	30	3 1/2" x 8" x 10	50	3 1/2" x 8" x 12	70	3 1/2" x 8" x 14	90	3 1/2" x 8" x 16	110	3 1/2" x 8" x 18	130	3 1/2" x 8" x 20	150	3 1/2" x 8" x 22
11	1/2" x 10" x 8	31	1/2" x 10" x 10	51	1/2" x 10" x 12	71	1/2" x 10" x 14	91	1/2" x 10" x 16	111	1/2" x 10" x 18	131	1/2" x 10" x 20	151	1/2" x 10" x 22
12	3/4" x 10" x 8	32	3/4" x 10" x 10	52	3/4" x 10" x 12	72	3/4" x 10" x 14	92	3/4" x 10" x 16	112	3/4" x 10" x 18	132	3/4" x 10" x 20	152	3/4" x 10" x 22
13	1 1/2" x 10" x 8	33	1 1/2" x 10" x 10	53	1 1/2" x 10" x 12	73	1 1/2" x 10" x 14	93	1 1/2" x 10" x 16	113	1 1/2" x 10" x 18	133	1 1/2" x 10" x 20	153	1 1/2" x 10" x 22
14	2" x 10" x 8	34	2" x 10" x 10	54	2" x 10" x 12	74	2" x 10" x 14	94	2" x 10" x 16	114	2" x 10" x 18	134	2" x 10" x 20	154	2" x 10" x 22
15	3 1/2" x 10" x 8	35	3 1/2" x 10" x 10	55	3 1/2" x 10" x 12	75	3 1/2" x 10" x 14	95	3 1/2" x 10" x 16	115	3 1/2" x 10" x 18	135	3 1/2" x 10" x 20	155	3 1/2" x 10" x 22
16	1/2" x 12" x 8	36	1/2" x 12" x 10	56	1/2" x 12" x 12	76	1/2" x 12" x 14	96	1/2" x 12" x 16	116	1/2" x 12" x 18	136	1/2" x 12" x 20	156	1/2" x 12" x 22
17	3/4" x 12" x 8	37	3/4" x 12" x 10	57	3/4" x 12" x 12	77	3/4" x 12" x 14	97	3/4" x 12" x 16	117	3/4" x 12" x 18	137	3/4" x 12" x 20	157	3/4" x 12" x 22
18	1 1/2" x 12" x 8	38	1 1/2" x 12" x 10	58	1 1/2" x 12" x 12	78	1 1/2" x 12" x 14	98	1 1/2" x 12" x 16	118	1 1/2" x 12" x 18	138	1 1/2" x 12" x 20	158	1 1/2" x 12" x 22
19	2" x 12" x 8	39	2" x 12" x 10	59	2" x 12" x 12	79	2" x 12" x 14	99	2" x 12" x 16	119	2" x 12" x 18	139	2" x 12" x 20	159	2" x 12" x 22
20	3 1/2" x 12" x 8	40	3 1/2" x 12" x 10	60	3 1/2" x 12" x 12	80	3 1/2" x 12" x 14	100	3 1/2" x 12" x 16	120	3 1/2" x 12" x 18	140	3 1/2" x 12" x 20	160	3 1/2" x 12" x 22

M.C. =MEDIDA COMERCIAL

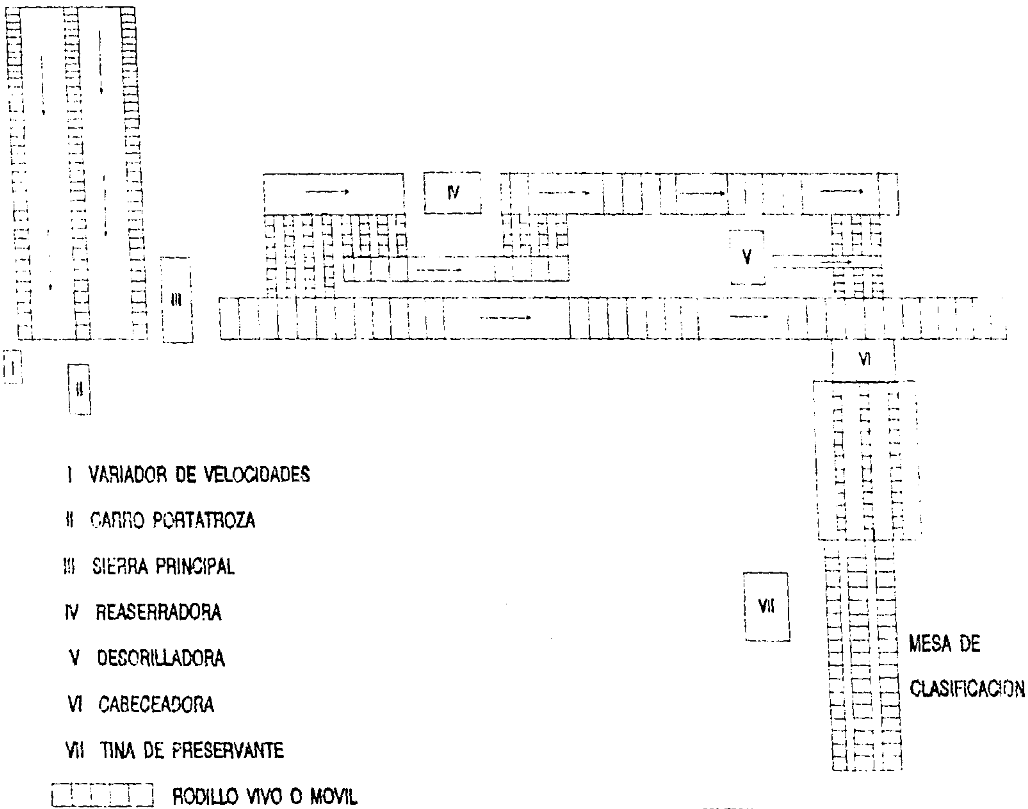
VA =VARIABLE

Apéndice 2

APENDICE 4.

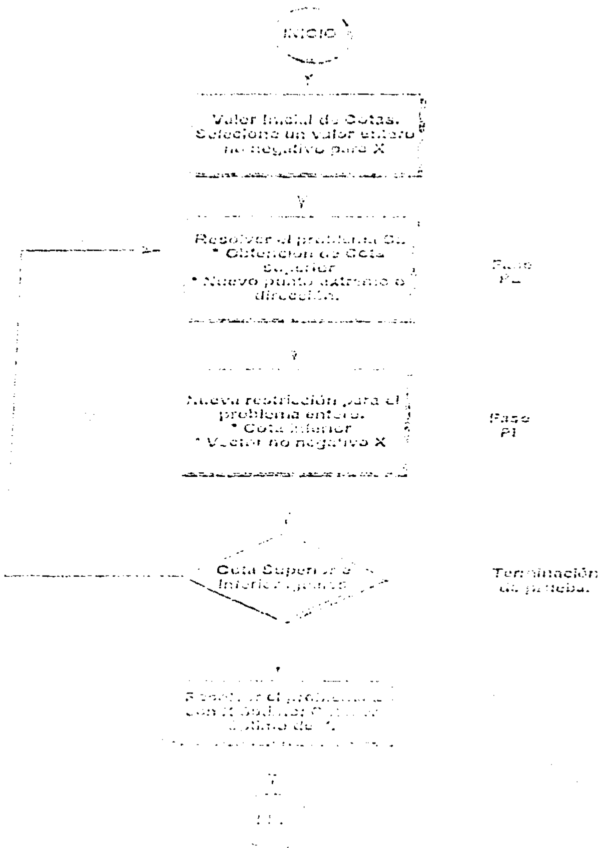
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ASERRIO

DIAGRAMA DE FLUJO Y EQUIPO ASERRADERO PARA MADERA DE PINO



SIN ESCALA

Apéndice 3


INICIO
Valor Inicial de Cotas.
Seleciona un valor entero
no negativo para X
* Obtención de Cota
Superior
* Nuevo punto extremo o
dirección.
Nueva restricción para el
problema entero.
* Cota Inferior
* Vector no negativo X
Paso
PI
Terminación
de prueba.

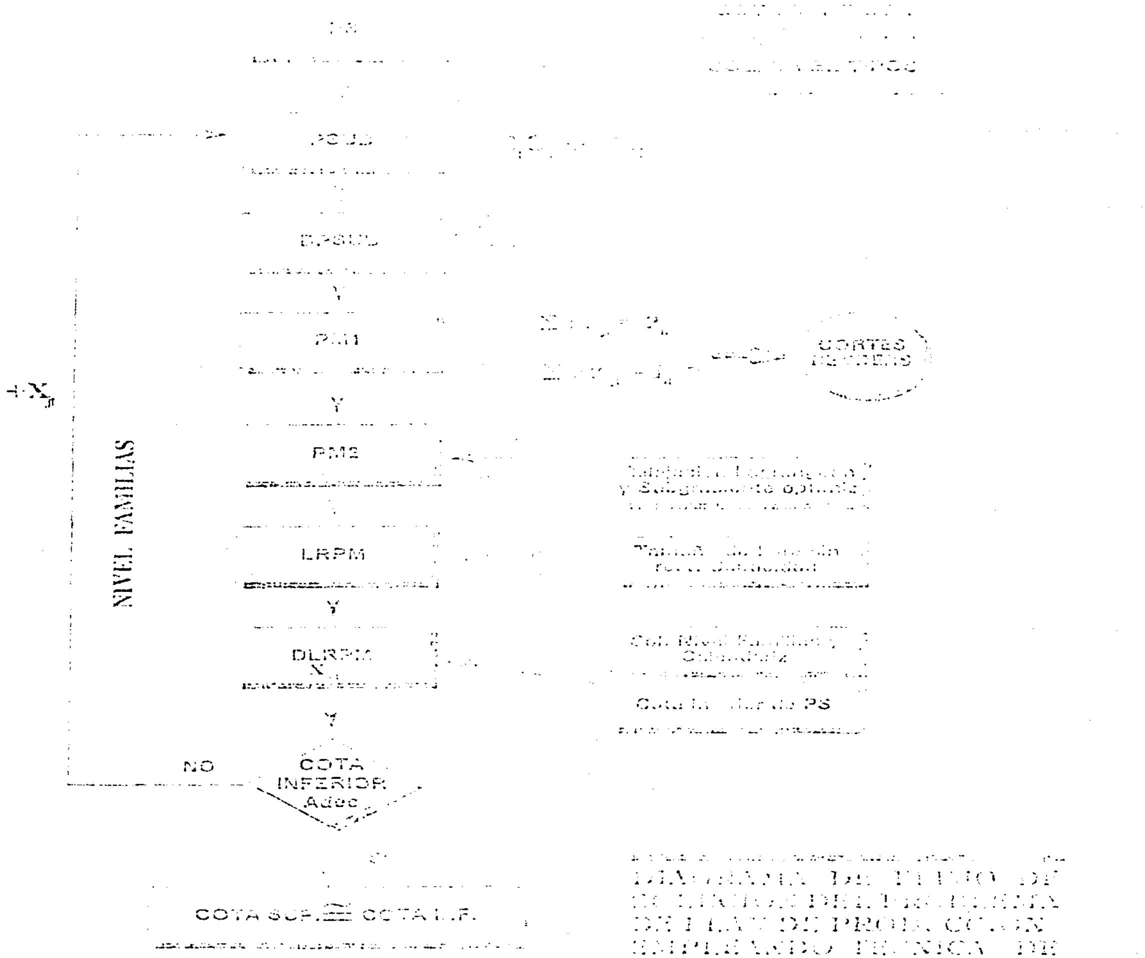


DIAGRAMA DE FLUJO [illegible] DEL PROBLEMA DE [illegible] DE PROD. [illegible] EMPLEANDO TECNICA DE DESCOMPOSICION DE BENDERS.

FALLA DE ORIGEN