



TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

MODELO DE PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN
DE LA PRODUCCIÓN

Autor: Nicolás Alejandro Figueira Sanjurjo.
44096

Director de Tesis:
Ing. Roberto Castillo.

2010

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres, hermano, abuelos y novia por el apoyo durante todos estos años.

RESUMEN EJECUTIVO.

La necesidad de llevar a cabo planes robustos que permitan encontrar oportunidades de mejora en los procesos de planificación, siempre fue y será una parte importante del trabajo del ingeniero industrial. Los cambios constantes del contexto resaltan la importancia de una correcta planificación y programación de la producción para la supervivencia y competitividad de una empresa en el mercado mundial actual. Se requieren de planes dinámicos que se adapten fácilmente a las nuevas necesidades buscando maximizar el beneficio de la compañía. Es necesario planificar usando estrategias diferentes y precisas, supervisar y adaptar los planes de manera de enfrentar el cambio de forma estratégica, eficiente y planificada.

Este trabajo propone una estrategia para la resolución del problema de planeamiento y programación de una o varias líneas de producción trabajando en paralelo. Se describe el enfoque y los principales criterios seguidos en la elaboración de un modelo matemático de programación lineal mixta que facilita la planificación agregada, la planificación maestra, y la planificación detallada de la producción, incorporando los criterios de las decisiones tomadas en la planificación estratégica. Es necesario destacar que, a pesar de que el modelo no resuelve en su totalidad el problema de la planificación de necesidades (MRP), permite establecer los requerimientos y el impacto en la secuencia de disponer de cantidades acotadas de recursos de demanda dependiente.

La modelización matemática, para determinar la secuencia óptima de fabricación de productos, es compleja debido a la naturaleza combinatoria del problema, a la proliferación de restricciones y variables derivadas de la representación de las lógicas productivas, y al carácter multitemporal del caso. Si no están debidamente acotados, muchos de estos modelos no pueden resolverse en tiempos de computación razonables. El modelo de programación lineal mixta propuesto incorpora conceptos y relaciones sofisticadas, y mediante un proceso de segmentación conducida del espacio de soluciones factibles, se puede ejecutar el programa en un tiempo razonable para establecer:

- La planificación y secuenciamiento de la producción siguiendo criterios económicos y del mercado establecidos por el plan estratégico de la compañía.
- La propuesta de abastecimiento a los mercados donde se comercializa cada producto controlando los niveles de inventario.

- La simulación de diferentes escenarios (“What if”), a nivel plan y secuencia, con sus impactos en ventas y entregas a los diferentes mercados.
- La evaluación de diferentes políticas de inventario y el cumplimiento tardío de la demanda para cada producto terminado.
- La disponibilidad de recursos (materias primas) para llevar a cabo las secuencias de producción.
- La planificación y programación de la producción considerando la capacidad de máquina en función de las horas disponibles de producción.
- Propuestas para adelantar/atrasar producciones según avances de venta.
- Planes que respalden las decisiones tomadas por los planificadores de planta.

El modelo presentado en este trabajo promueve la reducción de los inventarios y quiebres de producto terminado, permitiendo también adaptarse con facilidad a los cambios en los programas de ventas, y evaluar el impacto del contexto sobre los niveles de producción y secuencia de fabricación de cada unidad productiva. Cabe señalar que el uso de este modelo permite disponer de mayor visibilidad en la planificación, promoviendo una adecuada planificación de la compra de insumos y el seguimiento de las entregas. A su vez, el uso asiduo del modelo permite lograr mejores relaciones internas entre sectores producto de un mejor entendimiento de los impactos de cada sector sobre la capacidad y secuencia de producción.

EXECUTIVE BRIEF.

Making strong plans to find out opportunities of improving the planning process will always be an important part of the industrial engineer work. Frequently changes in context stand out the importance of a having a better planning and scheduling process to survive and compete in the world market. Dynamic plans which can adapt easily towards new necessities looking for maximum benefit for the company are required. It is necessary to make plans using different and precise strategies, supervising and adapting plans to confront the crisis in a strategic, efficient and organized way.

This paper puts forward a strategy to find out the best way of planning and scheduling several production lines working in parallel. By using a mathematical model the production, resource and scheduling plans can be solved taking into account the decisions taken by the business plan. Although this paper does not solve entirely the MRP process, it can inform the requirements and evaluate the impacts over the sequence of having limited resources of dependent demand.

The task of finding out the optimum scheduling plan is not easy because of the combinatorial complexity of the problem, the number of restrictions and variables needed to represent the productive logics of the process and the multitemporal characteristics of the case studied. If this problems are not properly restricted, the time needed to find a solution can take longer than the expected. The planning and scheduling model described in this paper uses quantitative advanced methods of operations research to achieve:

- Production planning and scheduling following market and economic criteria settled by the business plan of the company.
- Supply proposals for export and local markets controlling inventory levels on every market.
- Simulation of different scenarios (“What if”), at plan and scheduling levels, measuring the impact in sales and deliveries to export and local markets.
- Evaluation of stock policies and fulfilled demand for every product in every market.
- Resource availability to execute the production sequence.
- Production planning and scheduling considering machine capacity in hours.

- Proposals to move forward or delay production according to sales and inventory level during the month.
- Plans that can support planner's every day decisions.

This model causes inventory level reductions at the same time that avoids running out of stock on critical products and allows adapting easily to changes in sales forecast, evaluating the impact over production levels, inventory and production scheduling of every manufacturing unit. In addition, this model provides more visibility promoting a better purchasing plan and allowing planners to follow up delivery dates. The model's regular use can generate better relationships along the company due to better understanding of the impact of every division's job on the production plan.

TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN.....	1
1.1. EL CONTEXTO DE LA PLANIFICACIÓN.....	5
1.2. IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACIÓN EN EMPRESAS.....	8
1.3. ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN.....	10
2. EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN EMPRESAS MANUFACTURERAS.....	12
2.1. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE DISPONIBLES PARA EL PLANEAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN.....	12
2.2. LOS OBJETIVOS DEL PLAN ESTRATÉGICO Y LA CONSISTENCIA DE CRITERIO EN EL PROCESO DE PLANEAMIENTO.....	13
2.3. LA CALIDAD DEL PLAN.....	15
3. CASO DE ESTUDIO: LAS DIFICULTADES DE LA PLANIFICACIÓN.....	17
3.1. ELEMENTOS DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	17
3.2. EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DETALLADA.....	18
3.3. EL PROBLEMA DEL INVENTARIO DE PRODUCTO TERMINADO.....	20
3.4. CAPACIDAD INSTALADA SEGÚN EL HORIZONTE DE PLANIFICACIÓN.....	22
3.5. PLANIFICACIÓN CONTRA PEDIDO Y PLANIFICACIÓN CONTRA STOCK.....	23
4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PROGRAMACIÓN LINEAL AL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	26
4.1. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL.....	26
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL.....	27
4.3. SUPUESTOS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL.....	28
4.4. PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA Y MIXTA.....	29
4.5. EL PROCESO GERENCIAL DE PLANEAMIENTO UTILIZANDO PROGRAMACIÓN LINEAL.....	30
5. DESARROLLO DEL MODELO.....	32
5.1. OBJETIVOS DEL MODELO.....	32
5.2. VARIABLES DEL MODELO.....	33
5.3. MODELO DEL PROCESO.....	36
5.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS.....	39
5.5. SUPUESTOS MATEMÁTICOS DEL MODELO.....	40
6. CONSECUENCIAS DE LA IMPLEMENTACIÓN.....	47
7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	51
8. CONCLUSIONES.....	53
9. BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Horizontes de planificación.	2
Figura 1.2. El problema de la planificación	4
Figura 2.1. Plan vs Plan óptimo.	15
Figura 3.1. Consideraciones de la programación de la producción.....	19
Figura 3.2. Capacidad instalada.....	23
Figura 3.3. Proceso de fabricación contra stock y contra pedido	24
Figura 4.1. Clasificación de modelos matemáticos.	27
Figura 5.1. Flujo de transformación.....	32
Figura 5.2. Flujo de proceso.....	37
Figura 5.3. Curva de arranque.	44
Figura 5.4. Tiempo muerto.	45
Figura 5.5. Velocidad de régimen.	46
Figura 7.1. Línea de producción con stock de semielaborado.	51
Figura 7.2. Maquinas en paralelo abastecidas por una máquina común.	52
Figura 7.3. Flujo de producción con reprocesos.	52

1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN.

Antiguamente, la preocupación principal de las empresas era tratar de mejorar el resultado de su producción. Estando los productos posicionados en el Mercado, lo indispensable era obtener ganancias. Vender productos no resultaba difícil, la empresa debía mantener sus productos en el mercado y, al ser los clientes o usuarios poco exigentes, sólo debía hacer sus actividades productivas de forma correcta.

Sin embargo, el contexto y el mercado cambiaron. Actualmente la empresa tiene que lidiar por obtener un lugar en el mercado, sostenerlo además de incrementarlo. No debe pensar en vender solamente sus productos y ganar dinero, sino también subsistir en un medio que se hace cada vez más competitivo y exigente.

La globalización de los mercados, la velocidad y el poder de la información, son los factores que presionaron a las Instituciones a asumir el cambio en su planificación. De esta forma, las empresas se vieron obligadas a utilizar estrategias que permitan diferenciarse de sus competidores dentro del mismo mercado, y asegurar de este modo la preferencia de los clientes y por ende su supervivencia.

Los clientes actualmente tienen mayor información para tomar sus decisiones. La información, tanto de la competencia como de los productos sustitutos, está disponible. La competencia obliga a una evaluación constante del entorno y del mercado, las empresas deben estar siempre listas para un cambio dinámico que permita el cumplimiento de metas y objetivos. Es necesario planificar usando estrategias diferentes y precisas, supervisar los planes y adaptar a éstos a los cambios constantes del entorno que rodea a la empresa. De esta manera, resulta necesario disponer de planes de producción que puedan adaptarse a las necesidades del plan estratégico, permitiendo un cambio dinámico y eficiente que evalúe los impactos de dichas modificaciones, y permita realizar secuencias de producción que logren ubicar el producto en el lugar y el momento indicado para la venta.

La planificación en las empresas puede definirse como un proceso por el cual cada uno de los departamentos organiza sus recursos en el tiempo con el objetivo de optimizar su uso y conseguir así el mayor beneficio posible para la empresa. En este sentido, la planificación de la producción consiste en definir el volumen y el momento de fabricación de los productos, estableciendo un equilibrio entre la producción y la capacidad de los distintos niveles, en busca de la competitividad deseada al menor costo [Santos, J. 2007]. Para ello, se

requiere un proceso concatenado de planes que vinculen los distintos niveles jerárquicos de la organización.

Existen diferentes niveles de planificación en función del horizonte de tiempo en el que se toman las decisiones. En la Figura 1.1, se presentan dichos niveles para que el lector comprenda la importancia de la planificación de las diferentes etapas, y la manera en la que el modelo y la metodología propuesta puede solucionar y facilitar la programación y planificación de una línea de producción continua acorde con las políticas y restricciones de una empresa.



Figura 1.1. Horizontes de planificación.

Como puede observarse en la Figura 1.1, los niveles de planificación según el horizonte comprenden:

- La **planificación estratégica**: Es elaborada por los niveles más altos de la empresa sobre la base de pronósticos del entorno en un contexto global. Afecta a las decisiones estratégicas de la empresa. El horizonte de este tipo de planificación varía, según los casos, entre 1 y 3 años. Ej: el lanzamiento de nuevos productos o la incorporación de nuevas tecnologías.
- La **planificación agregada**: determina los niveles de producción, inventario y recursos necesarios para satisfacer la demanda. El horizonte puede comprender desde 1 mes hasta 1 año.

- La **planificación maestra de producción (PMP)**: corresponde a la planificación de los productos con demanda independiente (aquel cuya demanda no depende de la demanda de otros productos, es decir, sólo está condicionada por el mercado) y es consecuencia de la planificación agregada. Este nivel de planificación determina los niveles de producción, inventario y recursos necesarios para realizar la producción en cada una de las unidades productivas. El horizonte es de 6 meses.
- La **planificación de necesidades (MRP)**: deriva de la planificación maestra y centra su acción en los recursos de demanda dependiente (aquel cuya demanda depende de la demanda de otro producto). En este tipo de planificación se hace imprescindible la utilización de medios informáticos en su ejecución. El horizonte entre 1 y 6 meses dependiendo de los recursos y el proceso.
- La **planificación detallada**: Establece, siguiendo los lineamientos anteriores, la coordinación, seguimiento y control de las actividades semanales o diarias utilizando los procedimientos de asignación, secuenciación y temporización de la producción adecuados al tipo de proceso productivo. Normalmente se realiza cada semana, aunque en algunas empresas se planifica más de una vez al día. Es, sin duda, *el nivel de planificación más complejo*.

En el nivel detallado de planificación, los intentos de automatización han sido numerosos, pero la gran cantidad de variables básicas involucradas en la planificación final, hace que sea extremadamente difícil obtener un plan detallado que permita encontrar soluciones óptimas que logren:

- Minimizar costos / maximizar ganancias;
- Minimizar la inversión en inventarios de acuerdo a un nivel de servicio al cliente acorde;
- Minimizar los cambios en las tasas de producción;
- Disponer del producto comercializado en el lugar y el momento en el que se produce la demanda.
- Maximizar la utilización de planta y equipos, pudiendo evaluar paradas de máquina ante reducciones o aumentos de demanda propios del contexto económico mundial;
- Respaldar las decisiones tomadas, encontrando soluciones rápidas que puedan adaptarse a cambios propuestos por los encargados de la

planificación estratégica, y generen un beneficio económico para el negocio.

Cabe destacar que, a medida que se desciende en el horizonte de planificación, existe un mayor número de variables que afectan la toma de decisiones. Dichas variables pueden sufrir desviaciones importantes, obligando a replanificar y a desechar planes anteriores. A medida que se desciende en la pirámide, es menor el número de empresas que lleva a cabo la planificación de estos niveles. El gran nivel de detalle que exigen estos horizontes, provoca que el planificador requiera de un tiempo prolongado para evaluar el impacto sobre la producción de las alternativas propuestas estratégicamente desde la dirección de la empresa. Esto genera que el tiempo de respuesta ante los cambios estratégicos sea mayor, y las modificaciones necesarias para lograr los objetivos no se lleven a cabo en tiempo y forma.

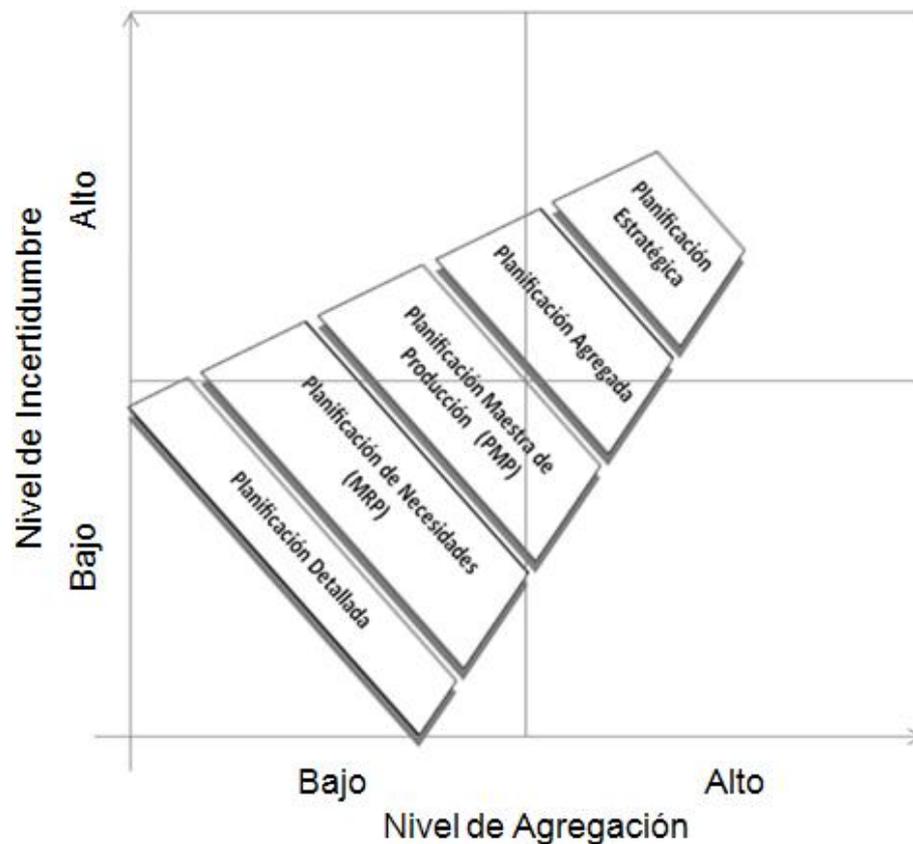


Figura 1.2. El problema de la planificación

Como puede observarse en la Figura 1.2, la planificación estratégica, ubicada en la cúspide de la pirámide de horizontes de planificación, requiere de un bajo nivel de detalle para los problemas que resuelve. El objetivo de este nivel se encuentra en resolver el problema de planificación de forma macro. En consecuencia, los problemas tratados no pretenden considerar en detalle las operaciones necesarias para llevar a cabo los planes propuestos. Esto provoca

que, a pesar de que las variables que entran en juego en este horizonte son importantes, el nivel de dificultad implicado en la realización de un modelo de Programación Lineal que resuelva la problemática es reducida. Las variables de este tipo de problemas son macro y la cantidad de combinaciones entre dichas variables resulta escasa. Sin embargo, si el problema se encuentra en horizontes de planificación menores, el número de variables aumenta, incrementándose también las combinaciones posibles entre variables y el impacto de las mismas en la solución. El modelo de programación lineal que resuelve un problema detallado requiere de un nivel de desarrollo mayor que un modelo que resuelva el problema macro. De esta manera, el objetivo de esta Tesis es centrarse en tres de los niveles de planificación más detallados, brindando un plan y una secuencia de producción que determine el momento, la máquina y la cantidad que debe fabricarse de cada producto, respetando las decisiones tomadas desde la planificación estratégica de la compañía y evaluando el impacto de dichas estrategias sobre la producción.

De esta forma, el modelo de programación propuesto se centra en resolver el problema de la planificación agregada, la planificación maestra (PMP), y la planificación detallada de la producción considerando como faro las decisiones tomadas por la planificación estratégica. A pesar de que el modelo no resuelve en su totalidad el problema de la planificación de necesidades (MRP), permite informar los requerimientos y establecer el impacto sobre la secuencia de producción de disponer de cantidades acotadas de recursos de demanda dependiente.

En resumen, es preciso destacar que la planificación, aunque sufrirá variaciones, es necesaria y por lo tanto debe ser realizada de forma rigurosa. El objetivo del modelo planteado es lograr la automatización adecuada del plan para respaldar las decisiones de los planificadores, optimizando el secuenciamiento en máquina y evaluando el impacto de los cambios del plan estratégico sobre la secuencia, los niveles de producción y los inventarios. De esta manera se facilita la realización de planes detallados, permitiendo replanificar de una manera sencilla ante acontecimientos indeseados.

1.1. EL CONTEXTO DE LA PLANIFICACIÓN.

La crisis económica y financiera que atravesó el mundo desde principios de 2009, provocó que los ejecutivos de las empresas locales tuvieran que enfrentar grandes desafíos para administrar efectivamente los escasos recursos.

En tiempos como los actuales, es importante cuestionarse de forma crítica ciertos aspectos claves del negocio, ¿qué necesitamos hacer de forma diferente?, ¿qué necesitamos hacer mejor? El secreto de la supervivencia

consiste en tomar medidas prácticas para posicionar al negocio de manera adecuada.

Bajo un contexto dinámico como el que se presenta actualmente el mundo empresarial, las organizaciones deberán adaptarse rápidamente a los cambios del entorno modificando sus planes estratégicos. En esta sección se desarrollan los puntos más importantes del contexto sobre el cual se desarrollan actualmente los planes, para comprender los posibles cambios. Se recuerda que los cambios en el plan estratégico impactan directamente sobre los planes de menor horizonte.

La importancia de comprender el impacto verdadero del contexto en el negocio.

Cada uno de los gerentes y directores de la compañía debe intentar comprender como afectará realmente el contexto a su negocio, debe incluir, interiorizar y reflexionar junto con su equipo de trabajo:

- ¿Qué se debe hacer bien para minimizar el impacto de la crisis en nuestro negocio? ¿Cómo afectan las decisiones estratégicas a la capacidad de producción? ¿Cómo impactan los cambios en las operaciones? ¿Rever las políticas de inventarios? ¿Cómo impacta cada decisión sobre los niveles de inventario y producción? ¿Cómo impacta sobre el Operating Profit? ¿Qué decisiones se deben tomar según estos impactos?

A pesar de que el modelo de planificación propuesto no resuelve el problema de la planificación estratégica, las decisiones tomadas por la dirección y la gerencia determinarán los escenarios sobre los cuales el modelo optimizará el plan y la secuencia de producción. Por lo tanto, es de suma importancia contar con la dirección establecida por los encargados del planeamiento estratégico para evaluar el impacto de las decisiones sobre la producción, los inventarios y la disponibilidad de producto en tiempo y forma.

Cabe recordar que, cuando las condiciones son difíciles, las empresas exitosas son las que reaccionan más rápidamente, es decir, aquellos que toman las decisiones difíciles temprano y que lideran en los cambios que deben realizar. Una vez definida la nueva estrategia, se debe compartir con todos los niveles de la firma para asegurarse que la misma pueda ser comprendida por todos los niveles del negocio.

Administrar de forma efectiva el Capital de Trabajo

En tiempos de crisis la administración eficaz se debe centrar en la reducción del capital de trabajo al mínimo. La administración eficaz del capital de trabajo

limitará costos de financiamiento y reducirá el riesgo de pérdida por la obsolescencia del inventario y los malos créditos.

Las estrategias de administración del capital de trabajo deberían contener entre otros:

- La recaudación del efectivo: Se debe manejar de forma proactiva, quizás desplegando recursos adicionales para el control de crédito, u ofreciendo incentivos tales como descuentos por pagos anticipados.
- Cobro efectivo de la venta: Se debe incentivar el cobro efectivo de la venta más que la formalización del pedido del cliente;
- Pago a proveedores según las condiciones de crédito convenidas: Los proveedores deben ser pagados de acuerdo a las condiciones de crédito convenidas y no antes, a menos que existan descuentos atractivos;
- Reducción de inventario: Los inventarios deben mantenerse a niveles mínimos y consistentes con las entregas convenidas con los clientes.

Si bien los primeros tres puntos escapan al objetivo de esta Tesis, el último punto, relacionado con los niveles de inventario, es uno de los temas sobre los cuales se enfoca este trabajo. Si bien no se determina la política de inventario para cada categoría de producto, el modelo permite evaluar el impacto del establecimiento de una determinada política de stocks sobre la producción, el cumplimiento de la demanda y el beneficio económico de la compañía.

La administración eficaz del capital de trabajo en una crisis requerirá contacto cercano con los clientes y los proveedores de la logística, revisión de las proyecciones de ventas y de los niveles de inventario requeridos junto con el personal encargado de realizar la planificación y programación de la producción, los equipos de marketing y ventas.

Mantener la comunicación fluida

La comunicación en tiempos de cambio puede consumir mucho tiempo pero es una inversión de vital importancia. Una de las características importantes del modelo de planificación propuesto es favorecer la comunicación entre sectores. La herramienta permite evaluar y justificar las diferentes alternativas de acción implicadas en la producción e informar a cada uno de los responsables las acciones a seguir para lograr, mediante la dirección establecida por el planeamiento estratégico, el cumplimiento de los objetivos. El impacto generado por el incumplimiento del plan de producción puede ser evaluado y

comunicado rápidamente, por lo que cada responsable conoce cuál será el impacto de no realizar en tiempo y forma sus tareas.

Evaluar el impacto de los planes estratégicos sobre la producción.

Los altos niveles de incertidumbre sobre la economía global, regional y local, conllevan a que las actividades de planeación posean niveles de revisión y prospección de menor alcance en el tiempo. Algunas empresas, por ejemplo, realizan ejercicios de proyección en un orden trimestral, sujetos al análisis del comportamiento de sus mercados y del consiguiente resultado del negocio. De esta manera, resulta primordial estar preparados para afrontar los cambios de manera eficiente, estratégica y *planificada*.

Es de esperar que, a medida que las industrias puedan adaptarse a requerimientos cambiantes de producción, su productividad y competitividad se acrecienten. Para alcanzar este objetivo es esencial una eficaz asignación y priorización de tareas en los sistemas de fabricación, a fin de optimizar los tiempos de producción y cambiar constantemente para satisfacer la demanda de los clientes en el menor tiempo posible.

Para ello es necesario disponer no solo de sistemas de fabricación flexibles, sino también de políticas flexibles de planificación de la producción que permitan adaptarse, sin pérdida de tiempo, a los diferentes requerimientos estratégicos.

De esta manera, resulta evidente la necesidad de contar con un modelo de planificación de la producción que permita evaluar el impacto sobre la producción de las diferentes estrategias propuestas por los directivos de la compañía, ya que la versatilidad del mercado actual exige la generación de planes de acción que respalden las decisiones estratégicas y permitan articular el conjunto de acciones necesarias para alcanzar los objetivos del negocio durante momentos de incertidumbre.

1.2. IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACIÓN EN EMPRESAS.

Nadie duda de la importancia que posee la planificación dentro de una organización. Sin embargo, resulta necesario recordar algunos aspectos claves que hacen de la planificación una herramienta fundamental para lograr el progreso de una empresa.

Debido a que los planes definen los procedimientos adecuados para alcanzar los objetivos de la organización, resulta de suma importancia disponer de una herramienta de planificación que ayude a la empresa a encontrar alternativas de acción y a definir una guía para:

- Obtener y aplicar los recursos disponibles para lograr los objetivos;
- Lograr que los miembros de la organización tomen decisiones congruentes con los objetivos organizacionales, enfocando las actividades de los empleados en el logro de dichos objetivos;
- Controlar el logro de objetivos;
- Fijar prioridades ante limitaciones adicionales en la disponibilidad de recursos y definir cursos de acción que permitan resolver la problemática.
- Resolver problemas ante cambios en el entorno externo;

Cabe señalar que, en caso de que la empresa no disponga de un plan acorde a sus necesidades y que permita maximizar el beneficio económico de la compañía según los planes estratégicos establecidos, la organización puede encontrarse con las siguientes consecuencias indeseadas:

- Reducción de las ventas provocada por falta de producto en el lugar y el momento indicado, acompañado de un aumento en el costo de los fletes como un intento de ubicar, en forma rápida pero tardía, la mercadería en los centros de distribución o puntos de venta adecuados.
- Ambiente de trabajo inestable y demasiada presión para el personal de producción.
- Excesivos cambios de configuración (cambios de grado) que reducen la productividad y el aprovechamiento de la capacidad de máquina.
- Aumento de los costos de insumos y recursos.
- Desaprovechamiento de recursos necesarios debido a la necesidad de solucionar imprevistos que fácilmente pudieron ser anticipados y evitados. La presencia de dificultades no previstas suele ser resuelta a un alto costo con el irremediable impacto en el bienestar económico de la empresa.
- Sucesivos retrasos e incumplimientos de compromisos en los pedidos hechos por los clientes, lo que provoca un alejamiento hacia otros proveedores. Dicho alejamiento se debe principalmente a la falta de un plan que contemple las variables necesarias para realizar promesas de abastecimiento realistas y competitivas. Los planes de producción deben

maximizar el cumplimiento de los pedidos proveyendo de un nivel de servicio acorde para cada producto.

- Utilidades menores para la empresa.
- Baja competitividad en términos de calidad de los productos.
- Desaprovechamiento de oportunidades para acceder a nuevos mercados o nichos, provocando pérdidas económicas importantes debido a la falta de capacidad productiva o de niveles de inventario requeridos.
- Problemas o dificultades en la integración de los pronósticos de ventas con los planes de producción. Dichas fallas en la integración pueden provocar la inmovilización de activos y el deterioro financiero de la empresa.
- Reducción de la liquidez debido a la falta de previsibilidad en el abastecimiento de recursos necesarios para la producción producto de los sucesivos cambios en las secuencias y los volúmenes proyectados. Los proveedores optan por cotizar a precios que poseen un factor de incertidumbre respecto de la posibilidad de recuperar su capital. También suele suceder que algunos de ellos opten por no trabajar más con la empresa, y por lo tanto haya que abastecerse con otros que, o bien cobran valores muy por encima de los habituales en el mercado u obligan a pagarles de manera inmediata. Ambos casos implican contar con una liquidez que la empresa no suele tener, y que necesita para poder operar.

Estos acontecimientos indeseados pueden evitarse mediante la realización de un plan de producción que permita llevar a cabo el plan estratégico de la compañía.

1.3. ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN.

Se presenta una solución para el problema de planificación que pretende concentrarse en resolver los siguientes aspectos y necesidades propias del proceso, generando un modelo que permita:

- Lograr la planificación y secuenciamiento de la producción siguiendo criterios económicos y de mercado establecidos por el plan estratégico de la compañía.

- Automatizar la propuesta de abastecimiento a los centros de distribución controlando niveles de inventario.
- Evaluar el impacto del cumplimiento tardío de la demanda y la discontinuación de productos sobre la producción y los inventarios.
- Realizar la planificación y programación de la producción considerando la capacidad de máquina en función de las horas disponibles de producción en lugar de las unidades que puedan ser fabricados por máquina. El medir la capacidad en unidades provoca que la capacidad de la máquina dependa del mix de producción que se lleve a cabo.
- Simular diferentes escenarios (“What if”), a nivel plan y secuencia, con sus impactos en ventas y entregas a los diferentes mercados. El objetivo es poder evaluar el plan y la secuencia de producción verificando los impactos de cada cambio del plan estratégico.
- Evaluar diferentes políticas de inventario propuestas por el usuario del modelo para cada producto terminado.
- Evaluar la matriz de cambio grado entre productos.
- Evaluar la disponibilidad de recursos (materias primas) para llevar a cabo las secuencias de producción informando la necesidad de abastecimiento y el nivel de inventario luego de cumplir con los niveles de producción sugeridos.
- Realizar propuestas para adelantar/atrasar producciones según avances de venta.
- Evaluar secuencias de producción preestablecidas midiendo el impacto en la producción, las ventas y los niveles de inventario.

2. EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN EMPRESAS MANUFACTURERAS.

2.1. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE DISPONIBLES PARA EL PLANEAMIENTO DE LA PRODUCCION.

En grandes empresas con sistemas productivos complejos, resulta difícil adecuar los módulos específicos de planificación, incluidos en paquetes de software de administración de la producción (Ej. SAP), para poder desarrollar o ajustar modelos matemáticos a efectos de determinar planes en condiciones cercanas al óptimo. Dichos paquetes de software permiten administrar y controlar apropiadamente la producción, pero poseen un déficit a la hora de optimizar, según criterios preestablecidos, una secuencia o un plan de producción. Cabe señalar que los paquetes mencionados poseen altos costos de instalación y ejecución, requiriendo de asistencia por parte de empresas de integración de sistemas. La falta de flexibilidad de estos sistemas estandarizados no permite adaptar rápidamente el plan a los cambios del negocio. De esta manera, se genera un impacto negativo en el grado de respuesta ante los cambios, y en muchas ocasiones la empresa termina ajustándose al sistema en lugar de adaptar a este a los nuevos requerimientos.

Por este motivo, los procesos de planificación suelen hacerse con herramientas de escritorio (planillas electrónicas de cálculo) que, a pesar de tener una flexibilidad superior, por lo general no tienen la potencia ni las herramientas de desarrollo para embeber el software que resuelva modelos matemáticos basados en métodos cuantitativos de investigación de operaciones.

A pesar de ello, los planificadores de la producción suelen utilizar, para la elaboración de los planes de producción, planillas electrónicas de cálculo sobre las cuales se realiza la asignación de recursos según criterios y experiencias previas del planificador. Dichas planillas resultan deficientes a la hora de brindar un soporte que respalde las decisiones tomadas, ya que no permiten cuantificar fácilmente el impacto de una decisión en el plan, ni el beneficio generado para la empresa ante cada alternativa. De esta forma, los planificadores suelen llevar a cabo planes de producción sin la posibilidad de evaluar cambios de rumbo de manera práctica y sencilla durante el mes en curso. La evaluación de los diferentes escenarios estratégicos propuestos por los directivos de la organización, requiere que el planificador resuelva cada escenario sin una herramienta de optimización apropiada, demorando así la evaluación del impacto y no encontrando, en la mayoría de los casos, la solución que maximice el resultado para la empresa.

Mediante el modelo presentado en este trabajo se facilita la generación de planes y secuencias de producción, brindando flexibilidad ante cambios en el plan estratégico de la compañía y permitiendo cuantificar el impacto de una decisión sobre la producción. El modelo propuesto se basa en métodos cuantitativos de investigación de operaciones, permitiendo así determinar para cada escenario la secuencia y el plan que maximicen el resultado para la compañía.

2.2. LOS OBJETIVOS DEL PLAN ESTRATÉGICO Y LA CONSISTENCIA DE CRITERIO EN EL PROCESO DE PLANEAMIENTO.

Los objetivos establecidos en los planes estratégicos son los que determinan la dirección sobre la cual los esfuerzos deben realizarse para lograr alcanzar las metas de la organización. Tanto el plan agregado como el PMP, el MRP y el plan detallado, deben ser coherentes con el plan estratégico, maximizando la contribución para la compañía según los lineamientos que este último determine. Sin embargo, los objetivos planteados por el plan estratégico deben ser consistentes y alcanzables por parte del plan de producción. Los objetivos y el plan de producción no son independientes, y por lo tanto deben ser compatibles.

Cabe señalar que existe un trade off entre los diferentes objetivos de la compañía, y que el cumplimiento de uno de ellos generalmente se lleva a cabo mediante el deterioro de otro objetivo. Como ejemplos pueden citarse:

- *El nivel de servicio al cliente vs el capital inmovilizado en el inventario.* Disponer de una cantidad reducida de producto en inventario provoca una reducción de la cobertura ante fluctuaciones de demanda. Los objetivos relacionados con la cantidad máxima de capital inmovilizado dispuesta en almacén, deben ser compatibles con el nivel de servicio a clientes pretendido por la empresa. El reducir en demasía los niveles de inventario para minimizar costos, puede repercutir negativamente en el cumplimiento de entregas y por lo tanto en los niveles de servicio objetivo.
- *La capacidad instalada disponible vs el nivel de servicio al cliente.* La capacidad de producción disponible se encuentra establecida por el plan estratégico ya que requiere de un análisis macro del comportamiento del mercado a futuro y del presupuesto del negocio. Sin embargo, la capacidad debe estar dimensionada adecuadamente para cumplir con los niveles de servicio objetivo establecidos por la dirección. Por lo tanto, la capacidad de la planta y la disponibilidad de recursos, debe ser suficiente como para lograr mantener el nivel de servicio pretendido. En caso de que esto no fuera posible, el planificador debe fundamentar su

posición y solicitar la revisión de alguno de los objetivos establecidos por el plan estratégico.

- *Los mantenimientos de máquina vs la necesidad de producto.* Objetivos demasiado ambiciosos en cuanto a los porcentajes de utilización de máquina y a los niveles de servicio o niveles mínimos de inventario solicitados, no permiten que las instalaciones se detengan para realizar los mantenimientos preventivos correspondientes. Esto genera que la productividad de la máquina resulte perjudicada y en ocasiones se deban realizar paradas no programadas por fallas que fácilmente pudieron ser evitadas mediante el mantenimiento apropiado. Por lo tanto, según los requerimientos productivos proyectados, debe poder planificarse el momento adecuado para realizar los mantenimientos preventivos, sin perjudicar el cumplimiento de pedidos ni el aprovechamiento de recursos.

El plan de producción debe maximizar el beneficio económico de la empresa logrando un trade off que no comprometa el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Cabe señalar que existen numerosas herramientas que pueden ser utilizadas para controlar los resultados operativos cuando el plan es llevado a cabo por operaciones. Dichas herramientas controlan e intentan mejorar los procesos pero no se ocupan de lograr mejorar el plan propuesto. Algunas de ellas son:

- **Tableros de comando:** Es una herramienta que permite transformar la estrategia en objetivos operativos. Dichos objetivos constituyen una guía para la obtención de resultados del negocio y de comportamientos estratégicamente alineados de las personas de la organización. El tablero de comando permite el control y seguimiento de los objetivos planteados por el plan, vinculando el logro de objetivos con indicadores establecidos para medirlos.
- *Six sigma:* Metodología de mejora de procesos centrada en la eliminación de defectos o fallas en la entrega de producto al cliente. Se lleva a cabo en cinco etapas: definir el problema o el defecto; medir y recopilar los datos; analizar los datos; mejorar el funcionamiento del proceso; y controlar.
- *Control estadístico de procesos:* Tiene por objetivo hacer predecible un proceso en el tiempo. Las herramientas utilizadas para este fin son los gráficos de control que permiten distinguir las causas especiales de las causas comunes de variación.

Como puede observarse, estas herramientas controlan los desvíos respecto de los objetivos o de lo establecido por el plan de producción, pero no buscan optimizar el plan de producción dentro de las condiciones impuestas por el plan estratégico. El objetivo de este trabajo está en encontrar el mejor plan posible, logrando mejorar los resultados de la compañía independizándose de los desvíos que resulten entre el plan propuesto y la operación.

2.3. LA CALIDAD DEL PLAN.

Actualmente el problema de planificación en empresas se encuentra centrado en cómo hacer para que las operaciones se adapten mejor al plan de producción y a la secuencia sugerida. La diferencia entre el resultado obtenido y la secuencia propuesta por parte de los planificadores de planta, recae sobre el personal de operaciones, pero pocas empresas centran su atención en medir si realmente el plan y la secuencia sugerida maximizan el beneficio de la compañía. Esta tesis se concentra en encontrar el mejor plan y la mejor secuencia para mejorar los resultados de la empresa.

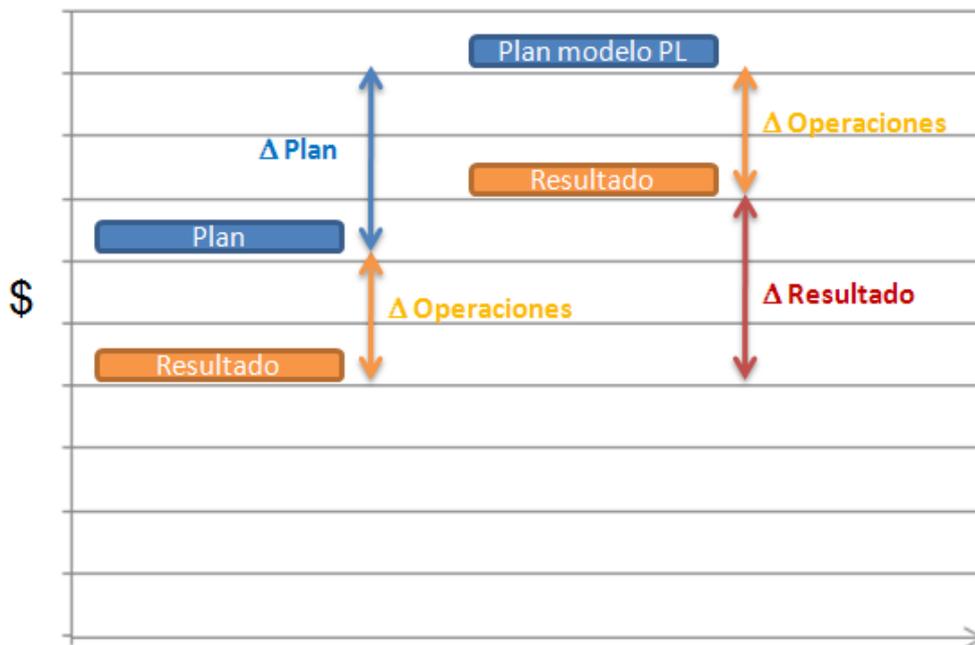


Figura 2.1. Plan vs Plan óptimo.

Como puede observarse en la Figura 2.1, existe una diferencia económica entre lo propuesto por el plan y aquel resultado obtenido cuando el plan de producción es llevado a cabo (Δ Operaciones). Dicha diferencia suele deberse a fallas en la ejecución del plan. La responsabilidad de lograr reducir la diferencia existente entre el resultado del plan y el plan propuesto, es en gran medida del departamento de operaciones, pero pocas empresas se preguntan si existe un plan mejor que, a pesar de las deficiencias en el cumplimiento del plan, logre mejorar los resultados de la compañía (Δ Plan). De esta manera, el modelo

propuesto incentiva a lograr un mayor beneficio para la empresa, encontrando un plan que mejore los resultados (Δ Resultado) independientemente de la diferencia existente entre el plan y el resultado de su ejecución. El obtener un mejor plan de producción permite alcanzar mejores resultados independientemente de las ineficiencias de la operación.

3. CASO DE ESTUDIO: Las dificultades de la planificación.

3.1. ELEMENTOS DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.

El principal objetivo del proceso de planificación de la producción es responder a las necesidades del cliente (cantidad y plazo) al menor costo posible para la empresa utilizando los recursos de forma eficiente.

Algunas de las variables necesarias a tener en cuenta en el proceso de planificación son:

- Demanda
- Costos
- Capacidad de producción
- Mantenimiento de máquina.
- Disponibilidad de MP
- Nivel de inventario
- Secuenciamiento

Las variables presentadas no siempre son significativas para cada empresa. Por lo tanto es fundamental, para que el proceso de planificación sea efectivo, encontrar las variables principales que intervienen en la planificación de la empresa sobre la cual se aplica el modelo. Esta Tesis presenta algunas de las variables que deben ser consideradas para el desarrollo del modelo. Sin embargo, a la hora de utilizar el mismo, es necesario que el usuario revise los conceptos, consideraciones y supuestos para corroborar que estos puedan aplicarse al caso particular de la línea de producción que se pretende planificar.

Un modelo de planificación como el estudiado en esta Tesis debe ser flexible y dinámico. Sus funciones de simulación *what-if* deben permitirle evaluar el impacto de diferentes escenarios de manera sencilla y elegir el mejor plan de producción para cada alternativa. El equipo de planificación debe ser capaz de interactuar con el plan, ya que pueden producirse continuas modificaciones provocadas por la entrada de nuevos órdenes, cambios en las existentes, paradas por averías, falta de materiales, problemas de capacidad, etc. El modelo estudiado le permite al planificador adaptarse a las condiciones de cambio, obteniendo una visión de la planta en su totalidad, teniendo en cuenta

todas las restricciones de maquinaria, de tiempos de arranque o de cambio de grado, optimizando la planta de manera global, no local.

3.2. EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DETALLADA.

En las empresas la tarea de determinar la secuencia óptima de fabricación de productos es complicada debido al carácter combinatorio del problema. Sólo unos pocos casos se pueden resolver de forma exacta.

El Plan Maestro de Producción (PMP) y la planificación de materiales (MRP) determinan los volúmenes que se deben fabricar para cada producto y las necesidades de MP para lograr producir el mix planificado. Sin embargo, en estos niveles de planificación, no se establece la secuencia en que debe procesarse cada producto en las instalaciones [Santos, J. 2007]. La definición de las prioridades de los artículos que van a procesarse debe seguir algún criterio de optimización, como el costo, el tiempo de cambio, o la importancia de cumplir con la demanda de ciertos productos clave para la compañía.

La planificación detallada tiene como objetivo principal decidir la secuencia de trabajos que realizará cada recurso de la empresa en el horizonte de planificación más pequeño posible, (no será el mismo para todas las empresas, por lo que la solución propuesta debe contemplar la posibilidad de extender o reducir el horizonte temporal de scheduling). Dicha secuencia debe:

- Minimizar los plazos de entrega y cumplir en tiempo y forma con las necesidades del mercado. En ocasiones, es preciso dar una fecha de entrega al cliente cuando realiza el pedido. Una fecha demasiado tardía o demasiado optimista puede perjudicar, en algunos casos, las relaciones con el cliente o conducir a sanciones.
- Minimizar el tiempo utilizado en cambios de grado y el costo involucrado.
- Cumplir con las políticas estratégicas establecidas por la dirección.
- Cumplir con políticas de inventario para cada producto terminado.
- Considerar las limitaciones de la línea de producción para cumplir con las necesidades (Ej: capacidad de la línea, restricciones físicas, mantenimientos, etc.)

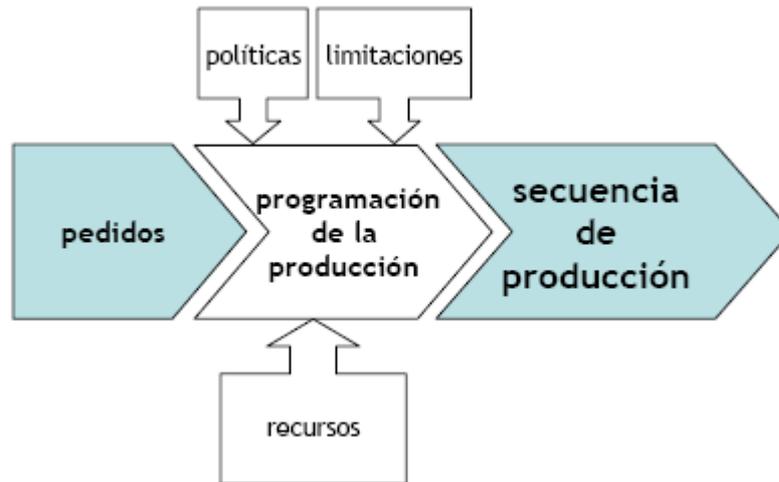


Figura 3.1. Consideraciones de la programación de la producción. Fuente: Santos, J. 2007.

El análisis de la programación de la producción brinda la posibilidad de descubrir puntos débiles en la secuencia de producción. Por lo tanto, se puede considerar a la programación como una fuente de proyectos de mejora, tratando de eliminar limitaciones que no involucren restricciones físicas sino paradigmas creados por los empleados y políticas inapropiadas que dificultan la definición de la secuencia.

3.2.1. Dificultades presentes en el secuenciamiento de máquinas.

Para el planificador, el cálculo de la secuencia óptima de los trabajos resulta muy complejo. La gran cantidad de variables involucradas a la hora de generar un plan o secuencia de producción, no permite reaccionar rápidamente y de manera coordinada a cambios no planificados generados por el mercado o el entorno sobre el cual se lleva a cabo el plan de producción. La necesidad de evaluar nuevas secuencias, a veces de manera inmediata, no es fácilmente realizable debido a la interacción simultánea de las variables que el planificador debe contemplar. Esto genera que no se actúe de forma inmediata ante un problema y se desperdicien recursos innecesariamente a la hora de atender emergencias.

A su vez, los programadores se encuentran con metas contrapuestas a la hora de elegir la mejor forma de ordenar los trabajos [Santos, J. 2007]:

- Si se busca minimizar el plazo de entrega de los productos, la utilización de los recursos se ve perjudicada debido a la necesidad de un mayor número de cambios de grado en máquina para cumplir con el mix de pedidos.
- Si se busca maximizar la utilización de recursos, las corridas de producción suelen ser más largas, el plazo de entrega a clientes resulta

mayor y en consecuencia aumentarán los retrasos (incumplimiento de entrega a los clientes que provocan el desgaste en las relaciones comerciales).

Las tendencias actuales recomiendan disponer de exceso de capacidad y operarios polivalentes que se adaptan a las necesidades de cada período. Esto no puede, ni debe, ser presentado como una solución posible bajo la situación económica y financiera mundial actual.

3.3. EL PROBLEMA DEL INVENTARIO DE PRODUCTO TERMINADO.

Una de la principales problemáticas de la planificación es poder establecer y evaluar una política de inventario acorde a los niveles de producción, demanda y nivel de servicio pretendido. En esta sección se resalta la importancia de evaluar e identificar una política de stocks acorde, que contemple el cumplimiento de las demandas proyectadas y los costos implicados en su mantenimiento. Si bien no es el objetivo de este trabajo determinar la política de stocks que debe poseer cada material, el modelo evalúa el impacto sobre la producción, el cumplimiento de la demanda y el Operating Profit de la compañía de cada política que el usuario del modelo decida incorporar para cada producto.

3.3.1. Necesidad de disponer de inventario de producto terminado.

La necesidad de disponer de un nivel de inventario objetivo puede resumirse en los siguientes puntos:

- *Nivel de servicio:*
 - Tiempos de entrega menores al tiempo de fabricación;
 - Producto disponible al momento que el cliente solicita.
- *Amortiguar la variabilidad del mercado:* El exceso de demanda respecto de los niveles proyectados puede provocar incumplimientos de venta por falta de disponibilidad de producto terminado. Dichos incumplimientos pueden ser atenuados mediante niveles de inventarios acordes al nivel de servicio pretendido.
- *Amortiguar la variabilidad de la producción:* Debido a que la secuencia de producción se ve afectada por sucesos no pronosticados que pueden modificar los volúmenes de producción y el momento en el que los productos entran en secuencia, el nivel de inventario debe contemplar

dicha variabilidad en la producción de manera de brindar al cliente el nivel de servicio pretendido.

En función de lo enunciado, el no disponer de un nivel de inventario acorde puede provocar las siguientes consecuencias sobre la operación y las relaciones con los clientes:

- Perdida de ventas:
 - Perdida del margen generado por la venta
 - Repercusiones estratégicas en los planes de la empresa debido a posibles quiebres de relaciones con clientes, niveles de inventarios proyectados innecesarios y capacidad de producción o mix de producción no adecuado.
- Multas o descuentos por incumplimiento de las condiciones de entrega pactadas.
- Perdida de la imagen comercial y la confianza de los clientes:
 - Perdida de actuales clientes.
 - Perdida de potenciales clientes.

Sin embargo, existen costos asociados a la disponibilidad de inventario, por lo que es necesario lograr una relación de compromiso entre estos y el nivel de servicio pretendido para los clientes. A continuación se enumeran algunos de los costos de disponer inventario. Sin embargo, los costos y su importancia sobre el resultado de la compañía dependen del tipo de producto que se comercialice.

- Costo financiero:
 - Capital inmovilizado;
 - Pérdida de valor en el tiempo.
- Costo de almacenamiento:
 - Movimientos internos entre posiciones;
 - Espacio de almacenamiento;

- Administración de existencias:
 - ✓ Personal;
 - ✓ Equipos;
 - ✓ Etc.
- Costo de mantenimiento:
 - Limpieza;
 - Muestreo de calidad;
- Costo de seguridad:
 - Vigilancia;
 - Sistemas de control de robos;
 - Sistemas de prevención de incendio;
- Costo de pérdidas / mermas / robos:
 - Obsolescencia natural o provocada.
 - Deterioro por movimiento / tiempo en almacén.

El modelo de planificación desarrollado en este trabajo permite evaluar cada política de inventario que el usuario disponga, permitiendo asignar un costo al mantenimiento de la mercadería y al incumplimiento de los niveles de stock objetivo propuestos por política. De esta manera, se le permite al usuario observar los impactos de cada política de inventario sobre la producción, las ventas y el beneficio de la empresa. Sin embargo, el modelo no pretende establecer la política de inventarios adecuada para cada producto, simplemente pretende medir los impactos de cada política.

3.4. CAPACIDAD INSTALADA SEGÚN EL HORIZONTE DE PLANIFICACIÓN.

En algunas ocasiones la planificación de la producción no se lleva a cabo de manera correcta por considerar una capacidad de producción superior a la real.

En consecuencia, suele ser necesario realizar replanificaciones constantes sobre los niveles de producción, recursos e inventarios proyectados.

Por este motivo, es necesario familiarizarse con los niveles de capacidad involucrados en cada uno de los niveles de planificación:

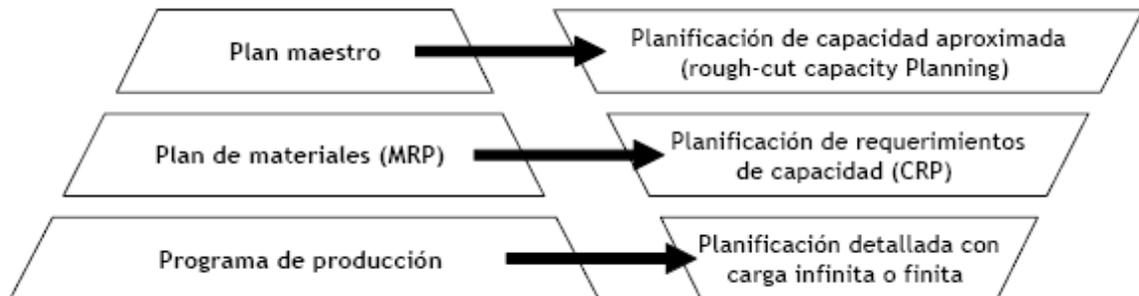


Figura 3.2. Capacidad instalada. Fuente: Santos, J. 2007.

La capacidad de planta disponible debe conocerse y compararse con las necesidades de capacidad y, en caso de ser insuficiente, analizar las alternativas existentes para aumentarla. En lo que al modelo propuesto respecta, no se hacen evaluaciones acerca de la necesidad de realizar inversiones que permitan incrementar los niveles de producción. Sin embargo, es de suma importancia para el modelo conocer la capacidad involucrada en cada uno de los niveles de planificación para poder restringir la solución a niveles de capacidad acordes. Este es un dato fundamental para el modelo propuesto, ya que la cantidad de horas disponibles de producción por período para cada máquina, determina la capacidad de producción que, junto con la velocidad de máquina y los tiempos de cambio de grado, se dispone para cumplir con la demanda proyectada. El modelo permite evaluar si la capacidad disponible resulta suficiente para cumplir con los pronósticos de demanda.

3.5. PLANIFICACIÓN CONTRA PEDIDO Y PLANIFICACIÓN CONTRA STOCK.

Existen básicamente dos tipos de planificación: *Contra stock* y *contra pedido*. Frecuentemente se confunden ambos conceptos debido a que erróneamente podría parecer que la fabricación contra stock no tiene en cuenta la demanda de los clientes. En la fabricación contra stock los productos son retirados del almacén de productos terminados de acuerdo con la demanda del cliente. Por lo tanto, numerosas empresas aseguran trabajar contra pedido cuando realmente su fabricación es contra stock.

Algunas veces un pedido del cliente da lugar a un pedido a producción por una cantidad mayor a la demandada, almacenándose el resto del pedido en el almacén. En este caso, el tipo de planificación es mixta. Otras veces la

empresa trabaja contra stock con un grupo de productos y con otros fabrica contra pedido. Sin embargo, son muchas las empresas que tienen necesidad de trabajar únicamente contra pedido (caldererías, bienes de equipo, etc.) [Santos, J. 2007].

Cabe señalar que, en ocasiones, una empresa puede combinar ambas formas de producción. Por ejemplo, podría trabajar contra stock en una primera parte del proceso productivo y contra pedido en la parte final, donde se personaliza el producto. También es posible que, debido a la imposibilidad de cumplir los plazos exigidos por los clientes, la empresa se vea obligada a adelantar producción y almacenar producto en curso.

Para distinguir claramente ambos conceptos, es necesario identificar el proceso que se realiza desde que se recibe un pedido hasta que éste se envía al cliente. Para identificarlos es necesario descubrir que hace que se inicie el proceso productivo, un pedido del cliente (contra pedido) o una reposición en el almacén (contra stock).

Pueden distinguirse dos casos representados en la Figura 3.3.

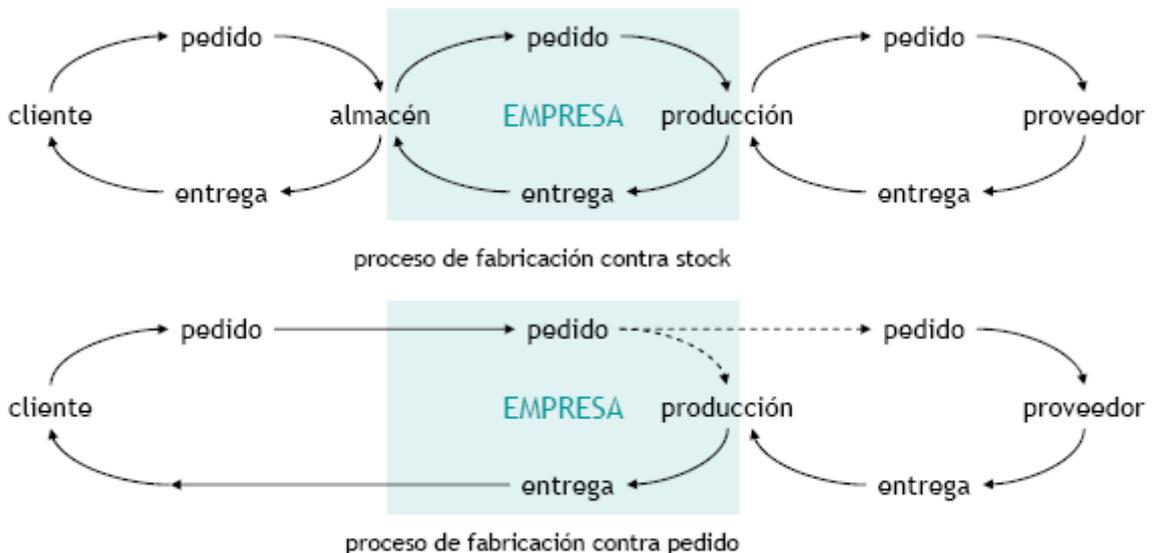


Figura 3.3. Proceso de fabricación contra stock y contra pedido. Fuente: Santos, J. 2007.

Conocer cuál es el tipo de planificación que emplea la empresa permite identificar las herramientas que pueden emplearse para llevar a cabo la planificación.

El modelo de programación lineal presentado en esta Tesis trabaja con un proceso de fabricación contra stock. El modelo incluye un nivel de inventario objetivo que tiende a cumplir al final de cada período, almacenándose la producción y cumpliendo con la demanda según la disponibilidad de inventario que posea el producto demandado. Cabe señalar que el modelo siempre

prioriza el cumplir con los niveles de demanda por sobre cualquier política de inventario o de producción propuesta. Sin embargo, mediante la generación de escenarios que permitan mantener niveles de inventario nulos, puede utilizarse fabricación contra pedido para aquellos productos que ameriten disponer de este tipo de planificación. El modelo es suficientemente flexible como para categorizar los productos según la estrategia de fabricación. Por lo que debe realizarse un análisis para cada producto que permita distinguir aquellos que deban utilizar fabricación contra pedido, de los que requieran fabricación contra stock, determinando para estos últimos los niveles de inventario de seguridad necesarios para garantizar los niveles de servicio objetivo.

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PROGRAMACIÓN LINEAL AL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.

En esta sección se presentan las bases teóricas que respaldan la solución planteada y permiten desarrollar el modelo presentado en este trabajo.

4.1. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL.

Muchas personas clasifican el desarrollo de la **Programación Lineal** (PL) entre los avances científicos más importantes de mediados del siglo XX. En la actualidad es una herramienta común que ha ahorrado miles o millones de dólares a muchas compañías y negocios, incluyendo industrias medianas en distintos países del mundo. El tipo más común de aplicación abarca el problema general de asignar recursos limitados entre actividades de forma óptima. Este problema de asignación puede surgir cuando deba elegirse el nivel de ciertas actividades que compiten por recursos escasos para realizarlas.

La variedad de situaciones a las que se puede aplicar esta descripción es sin duda muy grande, y va desde la asignación de instalaciones productivas a los productos, hasta la asignación de los recursos nacionales a las necesidades de un país; desde la planeación agrícola, hasta el diseño de una terapia de radiación. No obstante, el ingrediente común de todas estas situaciones es la necesidad de asignar recursos a las actividades.

Un modelo de Programación Lineal considera que las variables de decisión tienen un comportamiento lineal. En este sentido, la Programación Lineal es una de las herramientas más utilizadas en la Investigación Operativa debido a que permite una buena aproximación de la realidad seleccionando una solución alternativa que cumpla con los requerimientos modelados. Con frecuencia, seleccionar una alternativa incluye satisfacer varios criterios al mismo tiempo. Se puede ir un paso más adelante y dividir estos criterios en dos categorías: las restricciones y el objetivo. Las restricciones son las condiciones que debe satisfacer una solución que está bajo consideración. Si más de una alternativa satisface todas las restricciones, el objetivo se usa para seleccionar entre todas las alternativas factibles la más conveniente. Cabe señalar que, el comportamiento lineal de las variables de decisión se presenta tanto en la función objetivo como en las restricciones del modelo.

Los Modelos Matemáticos se dividen básicamente en Modelos Deterministas (MD) o Modelos Estocásticos (ME). En el primer caso (MD) se considera que los parámetros asociados al modelo son conocidos con certeza absoluta, a

diferencia de los Modelos Estocásticos, donde la totalidad o un subconjunto de los parámetros tienen una distribución de probabilidad asociada.

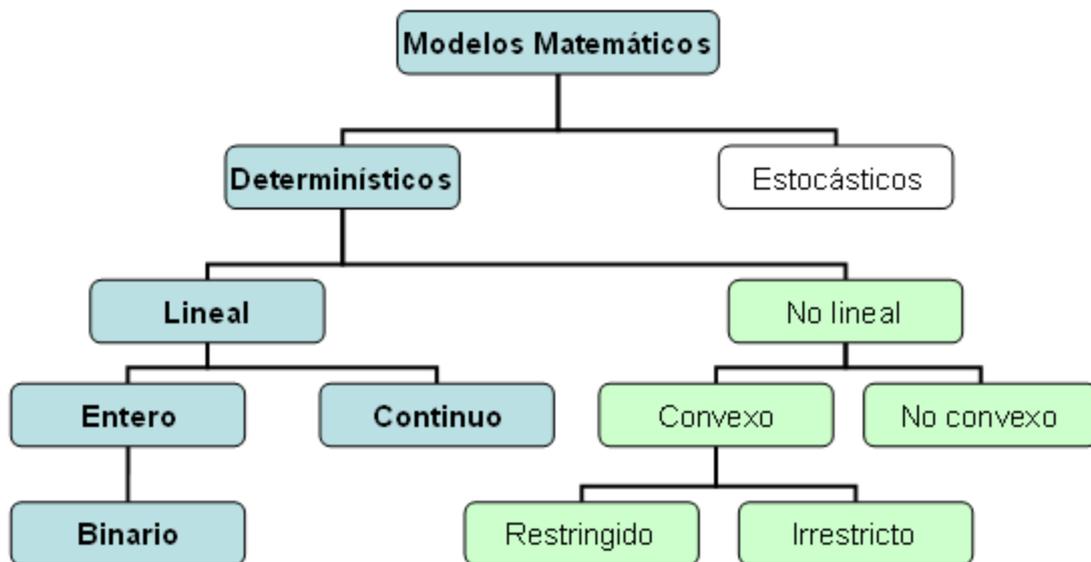


Figura 4.1. Clasificación de modelos matemáticos.

PL es una técnica determinista, no incluye probabilidades y utiliza un modelo matemático para describir el problema. El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales de variables separables. En este caso, la palabra programación no se refiere a programación en computadoras; en esencia es un sinónimo de *planeamiento*. Así, la PL trata el *planeamiento de las actividades para obtener un resultado óptimo, esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada (según el modelo) entre todas las opciones de solución*. Aunque la asignación de recursos a las actividades es la aplicación más frecuente, la PL tiene muchas otras posibilidades. De hecho, cualquier problema cuyo modelo matemático se ajuste al formato general del modelo de PL es un problema de PL.

De esta manera, mediante la resolución de un problema por programación lineal, se resuelve un modelo determinístico continuo. Sin embargo, en caso de resolver un modelo lineal de variables enteras o binarias, se debe utilizar un algoritmo de resolución denominado programación entera o mixta.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL.

La Programación Lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema que puede ser representado mediante un modelo determinístico, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando una función objetivo, también lineal. El procedimiento consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, que denominaremos función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una

serie de restricciones que expresamos mediante un sistema de inecuaciones lineales.

De esta manera, deben cumplirse tres requerimientos a la hora de resolver un modelo de programación lineal:

- **Requerimiento 1. *Función objetivo (F.O):*** Debe haber un objetivo (o meta o blanco) que la optimización desea alcanzar.
- **Requerimiento 2. *Restricciones:*** Debe haber cursos o alternativas de acción o decisiones, uno de los cuáles permite alcanzar el objetivo.
- **Requerimiento 3. *La función objetivo y las restricciones son lineales:*** Deben utilizarse solamente ecuaciones lineales o desigualdades lineales.

4.3. SUPUESTOS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL.

Existe un número de suposiciones realizadas en cada modelo. La utilidad de un modelo está directamente relacionada con la realidad de los supuestos. En el caso del modelo de Programación Lineal los supuestos son:

- ***Supuesto de proporcionalidad:*** Se relaciona con la forma lineal de las funciones. Ya que el objetivo es lineal, la contribución al objetivo de cualquier decisión es proporcional al valor de la variable de decisión.
- ***Supuesto de Aditividad:*** La contribución de una variable de decisión a la función objetivo o al uso de recursos es independiente de los valores que se asignen a otras variables de decisión.
- ***Supuesto de Divisibilidad:*** Es posible tomar una fracción de cualquier variable. En caso de que la suposición de divisibilidad no sea válida, entonces el modelo se ajusta a Programación Lineal Entera.
- ***Supuesto de Certeza:*** La Programación Lineal no permite incertidumbre en los valores. Cabe recordar que la programación lineal es un modelo Determinístico.
- ***Variables reales y no negativas:*** Las variables son números reales mayores o iguales a cero. En caso que se requiera que el valor resultante de las variables sea un número entero, el modelo se ajusta a Programación entera.

Existen limitaciones prácticas para el uso de Programación Lineal. Una se relaciona con los cálculos, ya que debido a la complejidad de algunos problemas se necesita una computadora con capacidad suficiente para resolver modelos con gran cantidad de variables y restricciones. La otra limitación se refiere al costo de formular un problema de PL. El costo de obtener los datos necesarios para formular un modelo de programación lineal puede ser excesivo, por lo que, antes de emprender una aplicación de PL, debe considerarse la disponibilidad y el costo de la información.

4.4. PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA Y MIXTA.

En algunas situaciones que pueden representarse con modelos lineales, nos encontramos con que sólo tienen sentido aquellas soluciones de la región factible en las que todas o algunas de las variables de decisión sean números enteros. Estas situaciones pueden representarse mediante modelos matemáticos ligeramente diferentes de la programación lineal. Si todas las variables de decisión deben ser enteras, tenemos un problema de programación lineal entera. Si sólo algunas variables de decisión deben ser enteras, pudiendo ser reales las demás, se trata de un problema de programación lineal mixta.

En algunos casos, todas o algunas de las variables enteras sólo pueden tomar los valores de 0 o 1. A estas variables se les llama variables binarias. De este modo tenemos tres tipos de variables:

- Variables no enteras o reales
- Variables enteras
- Variables binarias

La posibilidad de utilizar variables enteras o binarias amplía notablemente las posibilidades de modelización matemática. El precio por una mayor versatilidad de la herramienta es el de una mayor complejidad en la resolución del modelo. De esta manera, se han desarrollado metodologías que permiten explorar de manera más eficiente el conjunto de soluciones posibles. Gran número de estas metodologías emplean la lógica del “Branch and Bound”, y están incorporadas a la mayoría de programas informáticos que resuelven modelos lineales [Albert Suñé, Vicenç Fernández, José María Sallán, Joan B. Fonollosa. 2005].

4.4.1. Metodología de resolución: algoritmo branch and bound.

Un primer paso para la resolución de un modelo de programación lineal entera es resolver, mediante el método símplex, el problema lineal asociado. Se trata de un problema lineal con la misma función objetivo y restricciones que el modelo original, pero al que se han relajado la condición de que todas o algunas de las variables de decisión sean enteras. Si la solución así obtenida es entera, habremos encontrado la solución del modelo de programación lineal entera. En caso contrario (el más frecuente), la solución así obtenida es una primera aproximación a la solución del modelo.

Resulta tentador redondear los valores no enteros a enteros en la solución obtenida para el problema lineal asociado. Esto sólo se puede hacer si los valores de las variables son tan grandes que el redondeo no afecta excesivamente al resultado final, pero al hacerlo es posible que:

1. La solución redondeada no sea factible.
2. La solución redondeada no sea óptima.

Por estos motivos existe la necesidad de encontrar un procedimiento que permita, a partir de la solución del problema lineal no entero, ir explorando las soluciones enteras hasta encontrar el óptimo del modelo de programación lineal entera o mixta. Este procedimiento es el algoritmo de “Branch and Bound”. Dicho algoritmo consiste en añadir restricciones al programa lineal asociado hasta encontrar la solución entera óptima. Para ello se procede en dos pasos: ramificación (“Branch”) y acotamiento (“Bound”) [Albert Suñé, Vicenç Fernández, José María Sallán, Joan B. Fonollosa, 2005]. La explicación de dicho método escapa al objetivo de esta Tesis, por lo que no se desarrollará la metodología. Sin embargo, existen numerosas bibliografías que permite explicar el método citado.

4.5. EL PROCESO GERENCIAL DE PLANEAMIENTO UTILIZANDO PROGRAMACIÓN LINEAL.

La programación y planificación de la producción es un problema complejo para ser resuelto mediante PL. El modelo presentado debe reflejar de la mejor manera posible las características del problema real, al mismo tiempo que debe cumplir con los requisitos necesarios para resolver el problema de forma lineal. Cabe recordar que, un problema de planificación y programación requiere de una gran cantidad de variables para su modelización, que usualmente no disponen de un comportamiento lineal y cuya interacción es determinante para encontrar una solución, no solo óptima, sino también práctica.

La utilización de un modelo de programación lineal permite resolver la planificación y el secuenciamiento de maquinas utilizando eficientemente los recursos disponibles, de manera de generar el mayor aporte posible al Operating Profit de la compañía.

Este trabajo demuestra como un problema de programación y planeamiento de la producción, a pesar de su complejidad, puede ser modelizado y resuelto mediante PL. Las secciones que se presentan a continuación reflejan los supuestos y simplificaciones realizados para linealizar las variables involucradas y así alcanzar una solución que cumpla con los objetivos propuestos.

5. DESARROLLO DEL MODELO.

El modelo planteado en esta tesis permite resolver el problema de planificación del proceso productivo en el marco de un flujo como el de la Figura 5.1.



Figura 5.1. Flujo de transformación.

Los recursos son utilizados en el proceso productivo para transformarse en productos terminados (PT) que deberán ser enviados a los mercados en los que se comercialicen para ser almacenados y vendidos. La solución considera la disponibilidad de cada recurso, las restricciones de capacidad del proceso productivo, y el almacenamiento de los productos terminados a fin de atender los requerimientos de los mercados de venta.

5.1. OBJETIVOS DEL MODELO.

En función de los problemas de planificación y programación de la producción tratados en secciones anteriores, el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo que permita solucionar el secuenciamiento y la planificación de una línea de producción, maximizando el beneficio para la compañía sujeto a los lineamientos del plan estratégico establecido por la dirección de la empresa. De esta manera, se presenta una herramienta de soporte para el proceso de planificación y programación de la producción que permite:

- *Maximizar contribución marginal:* Se utiliza el ingreso producto de la comercialización y los costos de producción y distribución variables para establecer el aporte que realiza cada referencia al Operating Profit de la compañía. En función de la contribución y las estrategias de cada producto (penalizaciones), el modelo debe decidir que referencias deben ser fabricadas, estableciendo los volúmenes y máquinas en las que deben ser producidos. De esta manera, se busca:
 - *El secuenciamiento óptimo de máquinas:* el modelo brinda la secuencia de producción que maximiza el beneficio económico para la empresa, teniendo en cuenta:
 - ✓ *Restricciones de disponibilidad de materia prima:* Se restringe la producción según la disponibilidad de

materia prima y las órdenes de compra colocadas al proveedor.

- ✓ *Velocidad de producción y matriz de cambios de grado.*
- ✓ *Proyecciones de demanda.*
- ✓ *Disponibilidad de capacidad de máquina en horas:* La capacidad de producción de una máquina se dispone en horas netas de fabricación disponibles para la producción. Todas las paradas programadas deben excluirse de la capacidad de máquina.
 - *Proyecciones de Inventario:* El modelo permite la evaluación de diferentes políticas de inventario permitiéndole al usuario disponer de un nivel deseado de stock a fin de cada período.
- *Evaluar escenarios (What if?):* Cada uno de los escenarios será desarrollada oportunamente en secciones posteriores. Dichos escenarios permiten medir el impacto de los cambios realizados en el plan estratégico sobre el plan y la secuencia de producción.

5.2. VARIABLES DEL MODELO.

Para correr el modelo es necesario definir los datos y parámetros que establecen las condiciones iniciales de la corrida, y las variables cuyos valores serán los que determinen la solución al problema.

5.2.1. Variables de control.

Las variables que el modelo puede controlar para determinar la solución que maximice el valor del objetivo propuesto son:

- Para cada período, producto y mercado:
 - Cantidad de producto madre reservado para ser reempacado.
 - Cantidad de producto disponible para la venta.
 - Cantidad de producto comprometido para una futura venta.
 - Ventas perdidas.
 - Cantidad de producto en inventario a fin de cada período.

- Demanda incumplida respecto al cumplimiento mínimo sugerido.
- Para cada período, máquina y producto:
 - Posición que ocupa cada producto dentro de la secuencia de producción (Ranking del producto).
 - Producto inicio de secuencia en cada período.
 - Cambio de grado entre cada combinación factible de productos.
- Para cada período, máquina, producto y mercado:
 - Cantidad de producto producido.

5.2.2. Datos.

Los datos necesarios para efectuar una corrida del modelo de planificación y programación de la producción son:

- Para cada período, producto y mercado:
 - Proyecciones de demanda.
 - Sobredemanda (pronósticos por encima de los valores presupuestados).
 - Inventario objetivo (representa la política de stocks).
 - Mercadería en tránsito hacia los mercados.
- Para cada producto y mercado:
 - Inventario inicial.
 - Precio de venta.
 - Costos variables de distribución.
 - Costos de mantenimiento de inventario.
 - Cantidad de períodos que puede demorarse el cumplimiento de la demanda.

- Demanda mínima expresada como porcentaje de la demanda ingresada.
- Para cada período y máquina:
 - Horas disponibles de fabricación
- Para cada máquina y producto:
 - El producto que se encuentra siendo fabricado al momento de ejecutar el modelo.
 - Velocidad de producción.
 - Waste de producción en régimen como porcentaje de la corrida de producción.
 - Matriz de cambio de grado (tiempos de set-up y speed-up)
 - Waste durante el speed-up medido en miles de unidades desechadas.
- Para cada máquina:
 - Productos que pueden ser fabricados.
- Para cada producto:
 - BOM (Bill of Materials).
 - Costo variable de producción
 - Factor de conversión en reempaque (Producto madre / Producto terminado).
- Para cada materia prima:
 - Inventario inicial.
 - Ingresos programados.
 - Lead time de abastecimiento.

- Para cada mercado:
 - Lead time de abastecimiento para los productos terminados.
 - Capacidad de almacenamiento de cada mercado.

5.2.3. Parámetros.

Se entiende por parámetros al establecimiento de las características del escenario que se desea correr. Entre ellos se encuentran:

- Las máquinas que se desea involucrar en la corrida.
- Los periodos que se desea programar.
- Los periodos que se desea planear.
- Los mercados que se desea involucrar en la corrida.
- La duración de la corrida.
- Parámetros de activación de restricciones.

5.3. MODELO DEL PROCESO.

El proceso modelado se divide en 4 etapas:

- Disponibilidad de recursos necesarios para la elaboración del producto.
- Proceso productivo.
- Almacenamiento de producto terminado en cada mercado de venta.
- Venta del producto terminado en cada mercado.

Cada una de las etapas se encuentra vinculada a las otras mediante variables, creando relaciones que el modelo debe resolver para encontrar la solución al problema. En la Figura 5.2 se representa un ejemplo del flujo de transformación para 3 tipos de materia prima, 2 unidades productivas trabajando en paralelo y 4 mercados donde el producto puede ser almacenado y comercializado.

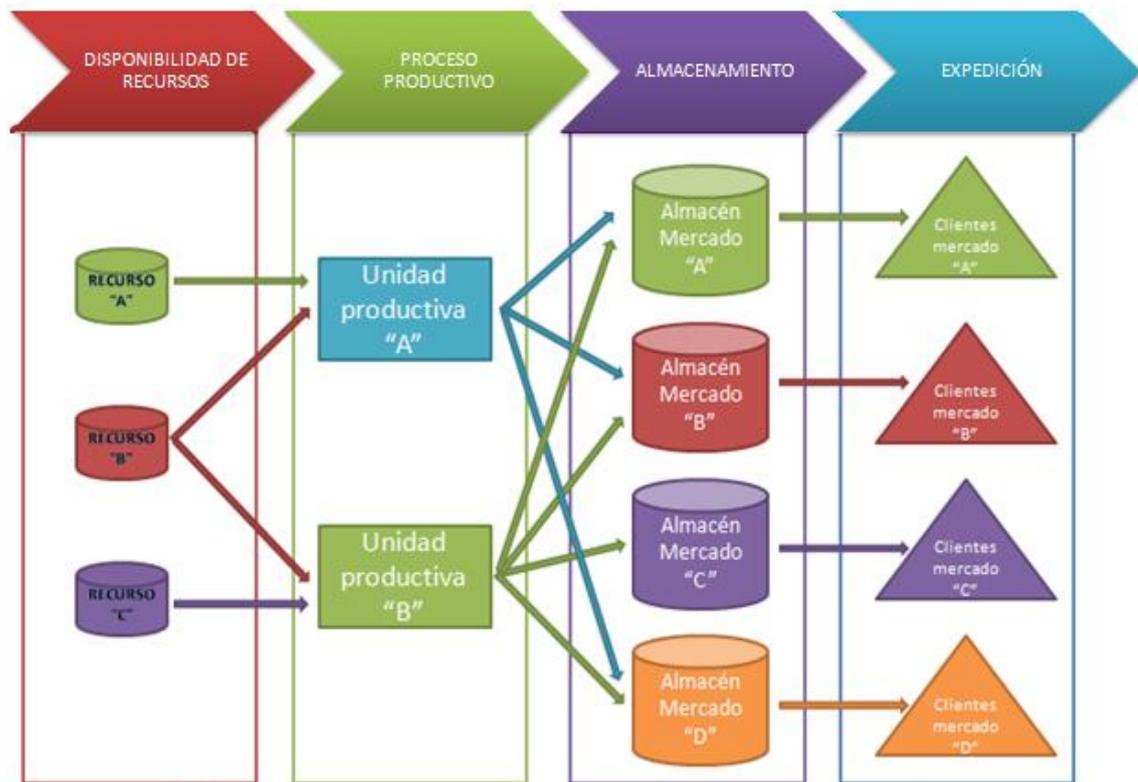


Figura 5.2. Flujo de proceso.

5.3.1. Disponibilidad de recursos.

El modelo resuelve la cantidad de recursos que se utilizarán en la fabricación de cada producto. En caso de que el recurso resultara escaso, el modelo permite establecer la proporción que se asignará a la fabricación de cada producto según las tasas de consumo de cada material y el aporte que realice el producto terminado a la maximización del funcional. Para ello el modelo debe contemplar:

- Los inventarios disponibles del recurso en cuestión, y su evolución en el horizonte de planificación;
- La BOM (Bill Of Materials) del material;
- Los requerimientos de producción de cada producto;

5.3.2. Proceso productivo.

Durante el proceso productivo, el modelo resuelve la cantidad de producto que debe ser obtenido al pie de cada unidad productiva para ser trasladado a cada mercado de comercialización. Cada producto dispone de una o más unidades productivas donde puede ser fabricado, por lo que el modelo establece donde y cuando (secuencia de producción) debe ser producido. De esta forma, se

determina cuales son los productos que deben ser fabricados, en qué cantidad, bajo qué secuencia y a qué mercados deben ser enviados según:

- La capacidad productiva de cada máquina;
- La disponibilidad de horas netas de producción en cada máquina (se excluyen las paradas programadas);
- El waste generado durante un cambio de grado y el desperdicio obtenido durante la corrida;
- El tiempo muerto de producción de cada cambio de grado;
- El lead time de abastecimiento de cada mercado;
- La disponibilidad de recursos;
- La necesidad de reposición de producto en almacén para cada mercado.

Cabe señalar que el proceso productivo para el cual se encuentra elaborado el modelo permite la fabricación de productos en máquinas dispuestas en paralelo. Sin embargo, para el caso de máquinas dispuestas en serie, no se admiten pulmones de producto semielaborado y las mismas deberán ser tratadas como una única máquina funcionando a la velocidad del conjunto.

5.3.3. Almacenamiento de producto terminado.

El modelo decide la cantidad de producto que debe disponer en almacén de manera de cumplir con los niveles de venta propuestos. Para ello debe considerar:

- Las proyecciones de venta de cada producto en cada mercado y el lead time de abastecimiento;
- La política de inventario y los costos de almacenamiento;
- La importancia estratégica de asegurar el abastecimiento de producto terminado, o la posibilidad de demorar el cumplimiento de la entrega;
- Los requerimientos de producto para remanejo.

Cabe señalar que existe un solo almacén de producto terminado para cada mercado, no pudiendo realizarse envíos de producto entre centros. Dichos

tránsitos se analizan por fuera del sistema, actualizando la cantidad de inventario en cada mercado antes de realizar la corrida del modelo.

5.3.4. Expedición de producto terminado.

El modelo propuesto permite resolver la cantidad de producto que puede ser vendido en cada mercado según:

- El aporte al Operating Profit de cada producto terminado;
- Las proyecciones de demanda de cada producto;
- La disponibilidad de producto en inventario;
- La importancia estratégica de cada producto para la empresa.

Cabe señalar que, en cada mercado el producto enviado puede requerir de un reempaque para poder ser comercializado (Ej. cambio de bolsa, etiquetado, rewilleteado, cambio de conteo, combos de productos, etc.). Dichos remanejos resultan en nuevos códigos de producto terminado diferentes a los productos que le dieron origen. En función de la demanda y de la disponibilidad de producto, el modelo decide almacenar producto madre (producto previo al remanejo) o producto terminado listo para su comercialización (producto reempacado).

En ciertos mercados el producto puede venderse remanejado o en la presentación obtenida al pie de máquina (producto madre). De esta forma, en función de los volúmenes de venta proyectados, la importancia estratégica del producto y la contribución marginal, el modelo resuelve si resulta conveniente utilizar el producto madre para el reempaque o venderlo en su presentación original.

5.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS.

Los escenarios permiten:

- Restringir la producción según la disponibilidad de Materia Prima (MP) en planta.
- Excluir de la secuencia los productos seleccionados por el usuario en los períodos deseados.
- Reducir las horas disponibles de producción para planificar paradas de maquina por mantenimiento.

- Elegir el lote mínimo de producción.
- Evaluar secuencias de producción elegidas por el usuario. El modelo permite:
 - Imponer el orden en el que los productos deben ser fabricados para un período en particular, permitiendo que el modelo decida los volúmenes que deben ser producidos;
 - Imponer los volúmenes de producción de cada producto permitiendo que el modelo secuencie;
 - Imponer los volúmenes y la secuencia de producción para los períodos deseados.
- Promover el cumplimiento mínimo de demanda para cada uno de los mercados, sugiriendo que, para las referencias clave, la penalización por incumplir los niveles mínimos de venta sea mayor.
- Obligar el cumplimiento de la totalidad de la demanda para todos los productos que se comercialicen en los mercados seleccionados.
- Incrementar las proyecciones de venta, debido a volúmenes de demanda que no pudieron planificarse, cuantificando el impacto de dichos volúmenes adicionales en la capacidad de planta, la secuencia de producción, los inventarios y el cumplimiento de las ventas.
- Elegir el número máximo de periodos en los cuales el modelo puede demorar el cumplimiento de la entrega.
- Evaluar políticas de inventario mediante el nivel de “Inventario Objetivo”.

5.5. SUPUESTOS MATEMÁTICOS DEL MODELO.

A continuación se enuncian los supuestos sobre los cuales se basa el modelo de programación lineal propuesto:

5.5.1. Supuestos de almacenamiento.

Cada mercado de venta dispone de un único almacén donde se distribuye el producto y se realizan los reempaques requeridos para cumplir con los requisitos de comercialización. La modelización del almacenamiento de producto se llevo a cabo considerando que:

- Los movimientos de almacén ocurren todos a fin de cada período.
- Las ventas de producto se realizan al final de cada período.
- El costo de mantenimiento de inventario se aplica sobre el inventario físico disponible al final de cada período. De esta forma, el modelo tiende a minimizar el inventario disponible respetando la política de stocks que el usuario disponga para cada producto. El establecimiento del período determinará la frecuencia con la que el modelo analiza los niveles proyectados de inventario e intenta alinearlos con la política y los requerimientos de demanda. Rigurosamente un mejor ajuste para establecer los costos de inventario debería ser el stock promedio. Sin embargo, se toma el stock a fin de período dado que estos son suficientemente cortos como generar una buena aproximación al valor real. Se recomienda el uso de períodos semanales.
- La capacidad de almacenamiento de producto terminado se encuentra medida en m^3 , despreciándose el error obtenido al no contemplar la capacidad según las posiciones ocupadas por cada producto en almacén. De esta manera, los m^3 utilizados por cada producto pueden no reflejar la utilización de una cantidad de posiciones enteras.
- Cada mercado dispone de un único centro de distribución. En caso de que exista más de un centro, los mismos deben ser tratados como mercados separados (cada mercado debe disponer de su demanda) o deben reflejarse en el modelo como un único centro equivalente a la suma de ambos.
- No está permitido el traslado de producto entre centros de distribución. Los productos son enviados desde planta hacia cada mercado.

5.5.2. Supuestos de reempaque.

Se entiende por reempaque a la actividad realizada sobre un producto que provoca una transformación de su presentación original. Dicha transformación permite cumplir con los requerimientos de comercialización de cada mercado y con los cambios de presentación solicitados por el equipo de marketing. Dentro de estas actividades pueden citarse:

- Cambios de conteo (agrupamiento de una misma referencia en cantidades acordadas por Marketing para su comercialización);
- Cambios de bolsa;

- Ejecución de combos (agrupamiento de diferentes códigos de producción para la generación de una nueva forma de comercialización del producto);
- Reetiquetado y rewilleteado para promociones.

Dentro del modelo no se analiza el detalle de la planificación de reempaques debido a que esta Tesis se encuentra orientada a resolver la problemática de la planificación desde el punto de vista de la producción. Por ello, el modelo asume que el remanejo de un producto madre a los respectivos productos reempacados, no consume tiempo disponible de fabricación. Los trabajos de reempaque se realizan en los mercados destino correspondientes (in-situ), trasladando el producto a cada mercado en la presentación obtenida al pie de máquina.

Cabe señalar que, a pesar de no planificar el proceso de reempaque, el modelo detecta la necesidad de llevar a cabo dicha actividad y advierte al planificador la cantidad de producto que debe ser destinada a este proceso. Al no disponer de restricciones de capacidad para estos trabajos, el planificador debe asegurarse de disponer de los recursos in-situ para cumplir con los requerimientos de reempaque proyectados por el modelo.

5.5.3. Supuestos de secuenciamiento.

Los supuestos involucrados en el secuenciamiento de máquina consideran que:

- Una máquina siempre está seteada en algún producto.
- Un set-up se inicia y finaliza dentro de un mismo período.
- Una máquina puede seguir produciendo un mismo producto cuando existe una transición entre períodos, no habiendo en este caso un cambio de grado involucrado.
- Los productos pueden ser producidos como máximo una vez en cada máquina dentro de un mismo período.

5.5.4. Supuestos de tratamiento de la curva de arranque y velocidad de régimen.

A la hora de incluir en el modelo los tiempos de Set-up, Speed-up y la velocidad de régimen, deben realizarse algunas simplificaciones que permitan

linealizar el problema para poder representar la realidad a través de un modelo de programación lineal.

A) Velocidad de régimen, tiempos de Set-up y Speed-up.

Se entiende por Set-up al tiempo que demora realizar la puesta a punto de una máquina para dejar de producir un producto y comenzar la producción de otro. Cuando se decide fabricar un producto nuevo en la secuencia, es necesario hacer cambios en las máquinas que generan tiempos muertos de producción. Cabe señalar que, el tiempo necesario para la realización del Set-up depende del tipo de producto precedente en el programa de producción.

Por su parte, se define al Speed-up como el tiempo que la maquina demora en alcanzar, luego de realizado el Set-up, la velocidad de producción en régimen. Al igual que en el Set-up, este tiempo depende del producto precedente en la secuencia debido a que la calibración de la máquina durante el arranque resulta más sencilla para productos similares.

El tiempo de cambio de grado (Set-up + Speed-up) de la máquina es dependiente de factores como:

- *Los tiempos de herramienta:* factor relacionado a las adaptaciones, calibración y número de intervenciones requeridas para llevar a cabo el Set-up según el producto que se encuentre en proceso. El producto anterior en la secuencia va a condicionar el número de cambios que resulta necesario efectuar en la máquina. Una mayor cantidad de adaptaciones dentro de la máquina tiene asociado un costo que debe ser tenido en cuenta en el análisis;
- *El número de intervenciones durante la puesta a punto:* factor relacionado al número de adaptaciones que deben realizarse durante el Speed-up para lograr que el producto alcance la velocidad de producción en régimen. El Speed-up posee, al igual que el Set-up, un costo propio. Dicho costo se ve representado por el desperdicio producido en los ajustes que permiten alcanzar la velocidad de régimen y obtener producto al pie de máquina que cumpla con los niveles de calidad propuestos;
- *La experiencia del operador en el cambio de grado:* factor correspondiente a los procedimientos y experiencia que tenga el equipo de trabajo para efectuar el cambio de grado. Es claro que si no se dispone de un procedimiento estandarizado de intervención, los tiempos de Set-up y Speed-up entre los diferentes equipos presentarán comportamiento aleatorio;

Como puede observarse, algunos de los factores están relacionados con actividades deterministas que pueden ser estandarizadas y que determinarán los tiempos de cambio de grado utilizados en el modelo. En cambio, existen otros factores que involucran actividades que en su esencia son de carácter estocástico y no dependen de la secuencia de programación. Estos últimos son excluidos del análisis de tiempos de cambio por exceder los límites de este trabajo. Dichos factores deben ser minimizados por el personal de operaciones para lograr estandarizar las actividades y eliminar el impacto del factor humano en el cambio.

Luego de finalizado el Set-up y Speed-up, la máquina alcanza la velocidad de régimen. El tiempo durante el cual la máquina se encuentra produciendo a dicha velocidad, se denominará tiempo en régimen. Este tiempo finaliza cuando es necesario realizar un nuevo cambio de grado que permita incorporar otro producto en la secuencia.

La curva de velocidad de máquina estándar se representa en la Figura 5.3.

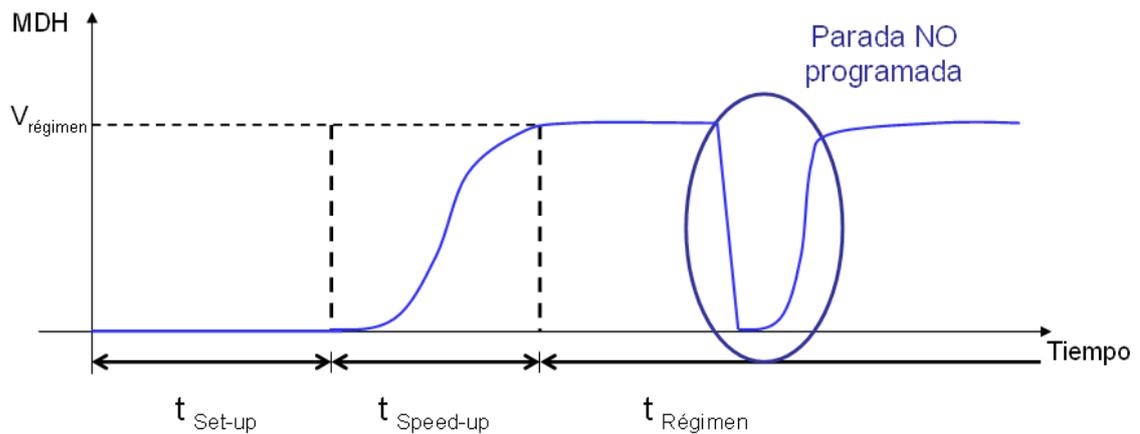


Figura 5.3. Curva de arranque.

Como puede observarse en la Figura 5.3, la velocidad de régimen es aquella que se presenta cuando la máquina se encuentra produciendo sin interrupciones (paradas no programadas). De esta manera, la velocidad en régimen puede calcularse como la cantidad de unidades buenas producidas durante el tiempo neto de fabricación en régimen (tiempo en régimen excluido de paradas no programadas).

Una vez definidos los conceptos de Set-up, Speed-up y velocidad de régimen, es necesario realizar algunas aclaraciones acerca de la manera en la que deben considerarse los datos en el modelo y la forma en la que los mismos interactúan en el proceso de decisión y resolución.

Cabe destacar que el “ $T_{\text{muerto modelo}}$ ” no depende de la cantidad producida, sino de las acciones que debe realizar el personal sobre la máquina para comenzar a producir el producto. Sin embargo, el tiempo de producción depende de la longitud de la corrida de producción. Esta distinción justifica la necesidad de contar con la velocidad de producción como la cantidad de unidades buenas producidas durante el tiempo neto de producción y no durante la totalidad de horas utilizadas de máquina.

C) Velocidad de producción en régimen según el modelo.

Como fue explicado anteriormente, la velocidad de régimen de la máquina surge de la división entre, la cantidad de unidades producidas que cumplan con los requisitos de calidad (producción buena), y el tiempo neto de fabricación en régimen. Sin embargo, dicho tiempo neto no contempla las interrupciones debido a paradas no programadas de la máquina durante la corrida. Estas interrupciones, producidas por desperfectos durante el proceso de fabricación, provocan una disminución de la capacidad teórica de producción y consecuentemente una reducción de la velocidad promedio de la máquina.

De esta forma, para efectuar una aproximación realista del comportamiento de la máquina, se decide utilizar en el modelo una velocidad que se encuentra atenuada por dichas interrupciones (ver Figura 5.5).

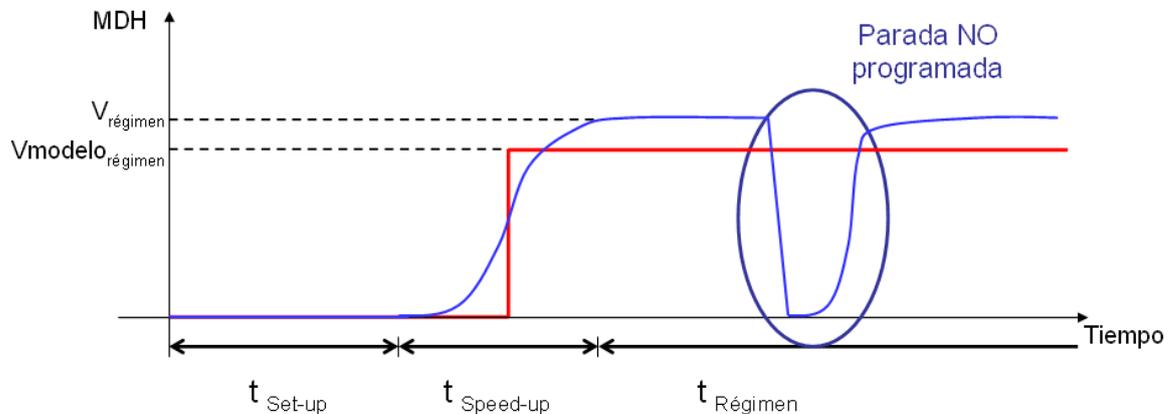


Figura 5.5. Velocidad de régimen.

De esta manera, la velocidad del modelo no se encuentra establecida por la velocidad en régimen de la máquina, sino por aquella velocidad promedio que surja del análisis de diferentes corridas de producción. Esta velocidad debe medirse como, la cantidad de unidades buenas disponibles al pie de la máquina, sobre el tiempo transcurrido desde la finalización del Speed-up hasta el comienzo del siguiente Set-up (tiempo en régimen que incluye las paradas no programadas).

6. CONSECUENCIAS DE LA IMPLEMENTACIÓN.

Los resultados presentados en esta sección surgen de la comparación de los planes entregados por el modelo de planificación propuesto en este trabajo contra los planes actuales de producción llevados a cabo por el planificador de planta. El modelo actualmente se encuentra en estado de prototipo por lo cual no se pueden presentar aun los beneficios de su utilización al cien porciento. Sin embargo, la revisión del proceso de planificación realizada en este trabajo presenta algunos resultados inmediatos que surgen de la utilización del modelo.

Reducción de los inventarios manteniendo el nivel de servicio.

El modelo de programación y planificación de la producción propuesto promueve la reducción de inventario innecesario logrando cumplir con políticas de stock predeterminadas para cada material. Mediante la utilización de este modelo se logra reducir el inventario de producto terminado respecto de los niveles pronosticados en un 4%, evitando a su vez, quiebres previsibles mediante una adecuada planificación. El porcentaje obtenido surge de la comparación de los resultados entregados por la herramienta versus el plan propuesto por el planificador.

A su vez, la herramienta permite vincular las variables implicadas en el proceso de planificación evaluando cada combinación existente. Esto permite generar secuencias con volúmenes producidos acordes a las políticas de inventario dispuestas para cada material, considerando también las demandas dependientes e independientes, la disponibilidad de recursos necesarios para concretar el plan y evaluando las posibles combinaciones (cambios de grado) entre productos para secuenciar los materiales de manera de no perjudicar la productividad de la máquina.

Previo a la utilización del modelo, el planificador realizaba un control mensual de los niveles de stock, detectando los quiebres de producto en lugar de prevenirlos. La evaluación de los niveles de inventario y cumplimiento de los pedidos de los clientes se realizaba cada fin de mes, por lo que los quiebres producidos durante dicho período no podían ser prevenidos fácilmente por el planificador. Mediante este modelo, se incentiva el control de las ventas y de los niveles de stock con mayor periodicidad y de manera detallada. El modelo propuesto ayuda a incentivar este control y evitar quiebres de producto. A su vez, permite anticipar posibles quiebres por falta de capacidad para que desde la dirección se tomen las medidas pertinentes que ayuden a solucionar el problema.

De esta manera, el modelo no solo ayuda a prevenir este tipo de acontecimientos encontrando soluciones a tiempo, sino que incentiva a generar un mayor control para prevenir problemas.

Adaptación a los cambios en los programas de ventas.

Los cambios en los planes de venta de una compañía suelen ser frecuentes debido a la aparición de nuevos competidores, nuevos clientes, cambios regulatorios del mercado, etc. Los planificadores suelen enfrentarse habitualmente a estas situaciones planteando cambios en sus planillas de cálculo que le permitan llevar a cabo modificaciones en el plan. Sin embargo, se requiere de mucho tiempo para evaluar esta situación por el gran número de variables y combinaciones involucradas en el proceso.

El hecho de disponer del modelo de programación, permite una rápida y mejor planificación de la producción a partir de los cambios solicitados por los equipos de MKT y ventas. El sistema replantea el problema bajo el nuevo contexto y señala todos los inconvenientes a atender para cumplir con los cambios solicitados. De esta forma, el modelo permite plantear a las diferentes áreas las posibilidades reales de disponibilidad de producto y al mismo tiempo ajustar el plan a las necesidades reales respecto de las proyecciones iniciales. De esta forma se promueve la adaptación de los cambios en el contexto de la venta al plan de producción de la compañía. Esto simplifica el trabajo del planificador y permite concentrar los esfuerzos en tareas que generen valor.

La utilización del modelo de planificación ayuda a que los miembros de la organización entiendan la importancia de una precisa proyección de las ventas a nivel de producto y con detalle semanal. Inicialmente las proyecciones de venta se realizaban mensualmente, estableciendo los volúmenes de venta por categoría (conjunto de productos de características similares). La utilización del modelo promovió el cambio organizacional incentivando la realización de proyectos que permitan mejorar las proyecciones de venta, concretando reuniones de ajuste de forecast semanal entre los miembros del equipo de ventas, MKT y planeamiento de manera de evaluar durante el mes las posibles correcciones en el forecast. Dichas reuniones permiten ajustar las proyecciones según los cierres esperados de volúmenes, evitando así que se lleven a cabo producciones innecesarias de referencias cuyo forecast no llegaría a cumplirse y poder aumentar los niveles de producción de aquellos productos que puede preverse una sobreventa en el mes. Estas reuniones promueven una mejor comunicación entre departamentos y así logran evitar la generación de pedidos incumplidos e inventario innecesario.

A su vez, al realizarse las modificaciones en el forecast mediante el excedente de demanda en lugar de alterar los niveles proyectados al inicio del mes, se

puede evaluar la precisión de las proyecciones manteniendo un registro histórico de las correcciones.

Mayor visibilidad en la planificación.

La capacidad de ejecutar escenarios planteados por el plan estratégico sobre el modelo, brinda la posibilidad de evaluar de forma rápida y sencilla las acciones que deben tomarse para ajustar la dirección de las actividades según los objetivos de la compañía. De esta manera, el planificador puede evaluar los impactos sobre los programas de producción y actuar en consecuencia ante las posibles dificultades que puedan presentarse. Esto otorga mayor previsibilidad a la hora de planificar y permite utilizar los recursos de manera eficiente. En consecuencia, los planificadores pueden:

- Tomar decisiones con mayor tranquilidad y seguridad;
- Aumentar la confianza y la capacidad de compromiso de las diferentes áreas;
- Intervenir con antelación ante posibles problemas.

El personal dedicado a planificar la producción, además de realizar mejor su trabajo, será más productivo, ya que tardará menos en realizarlo, reduciendo el costo de generación de programas.

Generación de programas de mantenimiento preventivo.

La falta de un apropiado sistema de planificación puede forzar al departamento de mantenimiento a funcionar de manera reactiva. Un plan de mantenimiento bien planeado y bien ejecutado es esencial para asegurar altos niveles de funcionamiento de las máquinas. A menudo, las empresas posponen el mantenimiento y como resultado, se producen fallos continuos en las máquinas que afectan la productividad de las mismas. De esta manera, reduciendo la disponibilidad de horas por períodos dentro del modelo, se puede usar esta herramienta de planificación para coordinar los programas de mantenimiento con los programas de producción, consiguiendo más altos tiempos de actividad de las máquinas, una mejor utilización del personal del departamento de mantenimiento y, por lo tanto, reducir los costos asociados.

Previo a la utilización del modelo, los planificadores eran informados de los mantenimientos sin disponer de un plan que permita contemplar las paradas programadas con facilidad y poder realizar propuestas de programas de mantenimiento. Mediante el modelo propuesto, las paradas preventivas pueden

programarse con anticipación evaluando el momento para realizarla y el impacto en la producción.

Adecuada planificación de la Compra y el seguimiento de las entregas.

En general no se realiza la planificación de las compras con la anticipación debida y no se inicia el ciclo en la fecha oportuna según el Lead Time de cada proveedor. Las consecuencias de ello se reflejan en la realización de muchas compras de emergencia, en general por teléfono, sin cotización, y a veces sin emitir la Orden de Compra, de cantidades estimadas groseramente, y a un costo mucho más alto que el habitual. Al cabo de un tiempo sobran materiales y faltan otros, o no llegan en las fechas en que se necesitan. Tampoco se hace un seguimiento adecuado de las fechas de recepción, lo que podría evitar futuras emergencias. En este estado de desorden no se pueden seleccionar, evaluar y calificar correctamente a los proveedores.

Como opción para disminuir las entregas fuera de término, se debe realizar una planificación adecuada de las compras y de las entregas. El modelo propuesto permite detectar las necesidades de materia prima de forma más previsible, de manera de poder llevar a cabo una mejor negociación con los proveedores y contemplar diferentes alternativas de producción según la disponibilidad en tiempo y forma de las mismas. La utilización del modelo permite que el departamento de compras proporcione a los proveedores mejores programas de abastecimiento, más fiables y con menor cantidad de urgencias y cambios. Así, se pueden conseguir reducciones de costos en los materiales comprados generando también que la producción no se detenga por falta de materia prima.

Mejores relaciones internas de la empresa.

El modelo brinda conceptos claros para las diferentes áreas de la empresa a la hora de evaluar escenarios que impliquen cambios en los planes y secuencias de producción. De esta manera, cada una de las áreas puede observar las repercusiones de su trabajo sobre el proceso de planificación y así comprender las limitaciones existentes y las posibles acciones que permitirán ejecutar los planes propuestos. Mediante este modelo, cada sector conoce los resultados de la ejecución de los planes, evaluando su factibilidad y contando con la misma información para afrontar los posibles cambios. En consecuencia, la interacción entre áreas y el blanqueamiento de la información y de las posibilidades de ejecución de las diferentes estrategias, trae aparejada mejores relaciones internas entre sectores y un aumento de productividad para las diferentes áreas de la empresa.

7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.

Luego de haber resuelto el problema de planificación para el proceso mencionado, se mencionan algunas futuras mejoras no contempladas en esta tesis. Entre ellas se encuentran:

- Realizar las modificaciones pertinentes en el modelo para poder contemplar el stock de producto semielaborado sobre la línea de producción. De esta forma se puede aplicar el modelo a una mayor cantidad de organizaciones cuya producción disponga de inventarios de producto semielaborado.

A continuación se presenta un esquema que pretende ejemplificar la línea de producción mencionada.



Figura 7.1. Línea de producción con stock de semielaborado.

- Incorporar restricciones que permitan la venta del semielaborado. Muchas empresas pueden vender el semielaborado como un producto adicional, por lo que incorporar restricciones de este tipo permite evaluar un mix de venta óptimo y sus repercusiones en la producción.
- Realizar las modificaciones en las restricciones para lograr que el proceso sobre el cual se aplica el modelo permita la incorporación de maquinas en forma paralela abastecidas por una máquina en común. La dificultad de realizar este tipo de líneas de producción con un modelo lineal se encuentra en la relación existente entre las maquinas paralelas y aquella que las abastece. Para ello deben establecerse ciertas consideraciones que permitan, linealizar la dependencia existente entre las velocidades de las máquinas que se encuentran aguas abajo y aquellas aguas arriba cuando no existe un pulmón de semielaborado.

A continuación se presenta un esquema que pretende ejemplificar la línea de producción mencionada.

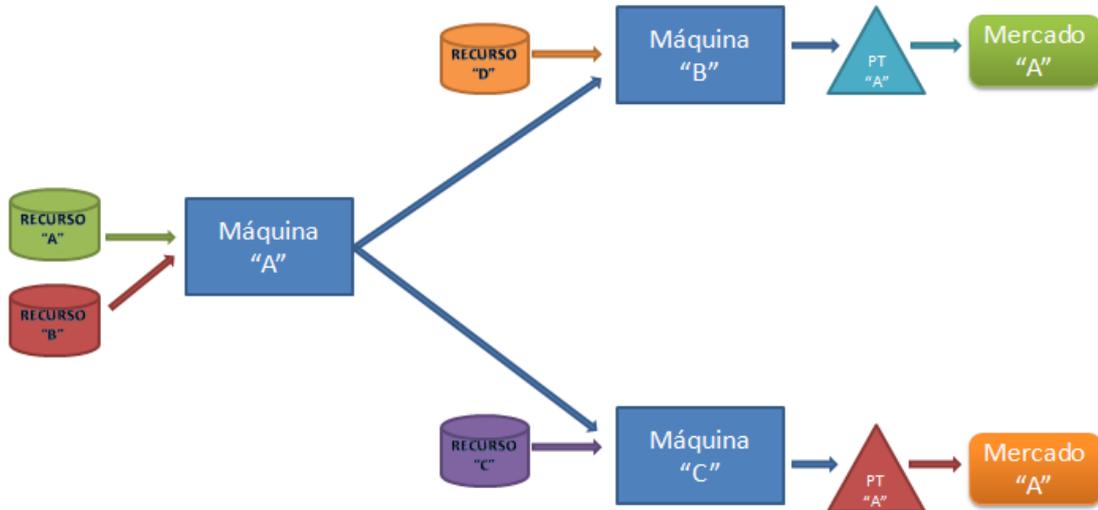


Figura 7.2. Maquinas en paralelo abastecidas por una máquina común.

- Realizar las modificaciones en el modelo que permitan el reproceso de producto defectuoso. En el modelo actual, el producto defectuoso es desechado ya que, para las empresas sobre las cuales está orientado el modelo, no es posible reprocesar el desperdicio.

A continuación se presenta un esquema que pretende ejemplificar la línea de producción mencionada.

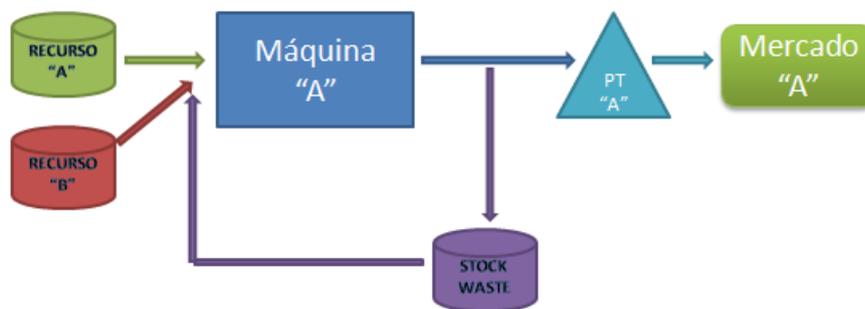


Figura 7.3. Flujo de producción con reprocesos.

8. CONCLUSIONES.

La utilización de un modelo de planificación y programación de la producción permite lograr grandes avances y mejoras dentro de una organización. Al disponer de un modelo que optimice las secuencias de producción y permita evaluar escenarios estratégicos, otorgando resultados de forma rápida y efectiva, considerando políticas de inventario, requerimientos de demanda y de materia prima, no solo se logra mejorar la planificación sino que también se brinda un sustento a las decisiones diarias que debe tomar el planificador. De esta manera, los resultados de la corrida del modelo permiten que cada una de las partes implicadas en la solución, comprenda las acciones que deben tomarse, y como cada una de estas acciones colabora a solucionar el problema.

El modelo de planificación propuesto permite integrar las diferentes áreas de la empresa, logrando que los esfuerzos y los objetivos de cada sector se organicen y converjan en un esfuerzo corporativo que posea la dirección necesaria para lograr la supervivencia de la empresa y su crecimiento. El modelo promueve, que cada una de las áreas implicadas en el proceso de planificación, comprenda el impacto de cada acción en los volúmenes, los inventarios, y la secuencia de producción que deba ejecutarse. De esta manera, la organización no solo aumenta la productividad de sus empleados en cuanto al logro de objetivos organizacionales, sino que también logra mejorar las relaciones entre las diferentes áreas de la organización creando un mejor clima laboral y un mayor compromiso.

A su vez, la evaluación de diferentes escenarios estratégicos dentro del horizonte de planificación permite prevenir acontecimientos indeseados estableciendo rápidamente un curso de acción que no desperdicie recursos. De esta manera, el planificador puede promover el control de la producción y prevenir problemas en lugar de esperar que estos sucedan y actuar cuando ya es demasiado tarde.

Cabe señalar que, para el éxito de la implantación del modelo de planificación propuesto, el conocimiento del negocio y de la planta de producción resulta decisivo. A nivel personal, este trabajo ayudó a comprender la importancia de una apropiada planificación de la producción y a entender el impacto de las diferentes áreas de la empresa sobre los planes y los objetivos propuestos. Para realizar este modelo, se trabajó junto a un equipo interdisciplinario compuesto por los jefes de planificación, compras, ventas, marketing, y análisis de negocios. Tomando los procesos a cargo de cada uno de ellos, se evaluó el impacto sobre el plan y se modelizó el problema hasta lograr la solución

presentada. Este trabajo representó un crecimiento profesional debido a los conocimientos adquiridos al momento de modelar el proceso.

Todas aquellas empresas que se encuentren dispuestas a estudiar los procesos que se llevan a cabo en los diferentes sectores y promuevan una comunicación fluida entre estos, generando modelos que respalden y faciliten las decisiones, contarán con una ventaja competitiva importante respecto de su competencia.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- Santos, J. 2007. Organización de la producción II. Planificación de procesos industriales. Unicopia. Tecnun. Páginas 7 – 15; 77 – 80.
- Albert Suñé, Vicenç Fernández, José María Sallán, Joan B. Fonollosa. 2005. Métodos cuantitativos de organización industrial I. Segunda Edición. Edicions UPC.
- Mercedes E. Narciso Farias, Miquel Angel Piera i Eroles. Entorno para la planificación de la producción de sistemas de fabricación flexibles. Unidad de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Autónoma de Barcelona. Disponible online en:
http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/E_01_S.pdf
- Investigación Operativa. Sitio web de investigación operativa en español. Programación Lineal. Disponible online en:
http://www.investigacionoperativa.com/programacion_lineal.html
- Apuntes de las materias de Investigación de Operaciones, Organización de la Producción II, Proyectos de Inversión, y Simulación del Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA.
- Winston W. 1996. Investigación de Operaciones, Aplicaciones y Algoritmos. Editorial Iberoamérica.
- Autor no especificado. 2003. Fundamentos de Investigación de Operaciones. Investigación de Operaciones. Asignación y Vendedor Viajero. Disponible online en:
http://www.inf.utfsm.cl/~esaez/fio/s2_2003/apuntes/asignacion_s2_2003.pdf