

## Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

**BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA**  
UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
Chía - Cundinamarca

**Cálculo del tamaño óptimo de lote de producción en una línea manufactura de bienes de consumo**

**Investigación para Trabajo de grado**

**Autor**

**JUAN DAVID CARRILLO VEGA**

**Directores**

**CARLOS ALBERTO VEGA MEJÍA, M.Sc.**

**Dr. JAIRO R. MONTOYA TORRES**

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
ESCUELA INTERNACIONAL DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS  
Maestría en Gerencia de Operaciones**

**Chía, Agosto de 2015.**

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción .....	3
2. Antecedentes y definición del problema .....	5
2.1. Presentación del problema.....	5
2.2. Objetivos .....	8
2.3. Hipótesis .....	9
2.4. Justificación y delimitación .....	9
3. Marco de referencia .....	13
3.1. Consideraciones preliminares .....	13
3.2. EOQ, Economic Order Quantity.....	15
3.3. Schedulling, Secuencia en prohramación de la producción .....	18
3.4. Economic Lot-sizing and Scheduling Problem (problema de programación de lote económico) .....	21
4. Análisis de la situación actual: Costo del plan de producción .....	27
5. Solución propuesta empleando el modelo ELSP .....	35
5.1. Metodología propuesta de análisis y resolución.....	35
5.2. Modelo matemático implementado .....	35
5.2.1. Cálculo de tamaño de lote (Lot Sizing).....	42
5.2.2. Cálculo de la secuencia de planeación de la producción (Scheduling) .....	46
6. Resultados y análisis .....	58
7. Conclusiones y recomendaciones.....	62
Referencias bibliográfcas .....	68

# 1. Introducción

Las compañías de manufactura tienen como uno de sus grandes retos el de mantener en todo momento el inventario suficiente y necesario para poder cumplir con las entregas de sus productos en el tiempo adecuado con el fin de garantizar el cubrimiento o la satisfacción de la demanda. De igual manera, el crecimiento acelerado de la competencia en el mercado plantea la necesidad de trabajar de manera permanente en el desarrollo de nuevas estrategias que, de alguna forma, permitan agregar cada vez más valor a los bienes o productos entregados incluyendo opciones particulares como puede ser la personalización o la misma flexibilidad. Es también importante entender de qué manera las necesidades o requerimientos del cliente pueden ejercer una influencia sobre la estrategia de producción, más aún cuando cada día los clientes y el mercado esperan respuestas y entregas en tiempos reducidos, es decir, con inmediatez. Este último elemento puede, en un momento determinado, representar la satisfacción del cliente pero al mismo tiempo, si no se logra garantizar de manera sostenida las entregas en el momento justo, se le puede estar dejando abierta la posibilidad a los compradores de lanzarse a la búsqueda para encontrar un nuevo proveedor que sí esté dispuesto a satisfacer todas sus necesidades, en especial en lo que tiene que ver con la entrega a tiempo del producto.

Así pues, para una compañía de fabricación de bienes donde se manejan volúmenes altos de producción, pero que adicionalmente tiene un comportamiento de la demanda estacional o fácilmente predecible, la estrategia más apropiada para el manejo de inventarios y cumplimiento de pedidos es la política MTS (Make to stock) (Sanchis, Saiz, Castellano, Poler, 2011, p. 85). La característica anterior de la operación permite, como primer paso, el establecer un pronóstico de ventas que luego va a servir de base para desarrollar los planes de producción, con los cuales se debería poder cubrir la demanda, alcanzando una ventaja competitiva al poder cumplir con la estrategia JAT (Justo a tiempo) .

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta la problemática que rodea la operación de la empresa que fue tomada como referencia para la presente investigación, se considera que el caso sigue plenamente las condiciones básicas que enmarca la estrategia MTS, donde se planea la producción de los bienes en los máquinas, con base en unos pronósticos de demanda y no sobre pedidos específicos del mercado, de tal manera que se tenga inventario de todo el portafolio y así poder responder a los clientes en tiempo cero (Rafiei y Rabbani, 2009).

Adicionalmente, se debe mencionar que el alcance trazado para la realización del presente estudio no se ocupa de analizar la forma a través de la cual al interior de la empresa se desarrolle o establezcan las cantidades a ser incluidas en el plan de producción: sin embargo, la información que ofrezca el pronóstico de ventas van a servir como una de las entradas para dimensionar la solución del problema, el cual consiste básicamente en establecer la cantidad final a producir de un conjunto de productos y la secuencia dentro del plan de producción en una compañía de manufactura del sector de bienes de consumo, esto aplicando un modelo matemático

Para finalizar, no se debe dejar de lado que el enfoque para el desarrollo del proyecto estuvo siempre alineado y ajustado de manera directa con los objetivos estratégicos de la organización. No se trata únicamente de cumplir a todo costo con las necesidades o requerimientos de los clientes, se debe considerar también que el proceso de planeación de la producción debe buscar una solución que apunte a que se respete y conserve en todo momento la rentabilidad del negocio.

## **2. Antecedentes y definición del problema**

### **2.1. Presentación del problema**

Actualmente, en el escenario de la empresa que fue tomada como marco de referencia para la investigación, los planes de producción se generan con una periodicidad mensual teniendo como punto de partida el inventario de producto terminado (PT) en bodega para cada una de las referencias, así como la venta promedio histórica según sea el período del año al cual pertenece el mes en curso. Con estos dos elementos, se procede a desarrollar un plan de trabajo el cual determina cuándo y cuánto se debe fabricar de una determinada referencia en el centro de trabajo asignado.

Este procedimiento está enfocado a que las cantidades fabricadas permitan garantizar que siempre se tenga en bodega el inventario suficiente de producto para satisfacer la demanda de los clientes. Esta metodología ha sido válida y efectiva por muchos años; sin embargo, a partir del año 2013 se ha venido presentando con alguna frecuencia faltantes de producto en inventario, que generan incumplimientos al momento de hacer la entrega de producto a los clientes, lo que termina por afectar de forma importante la imagen y por consiguiente la competitividad de la organización en el mercado. La figura 1 muestra la suma total en millares de unidades de producto no despachados a tiempo durante un período continuo de 8 meses de operación, esto como consecuencia de no contar con el suficiente inventario de producto terminado en bodega.

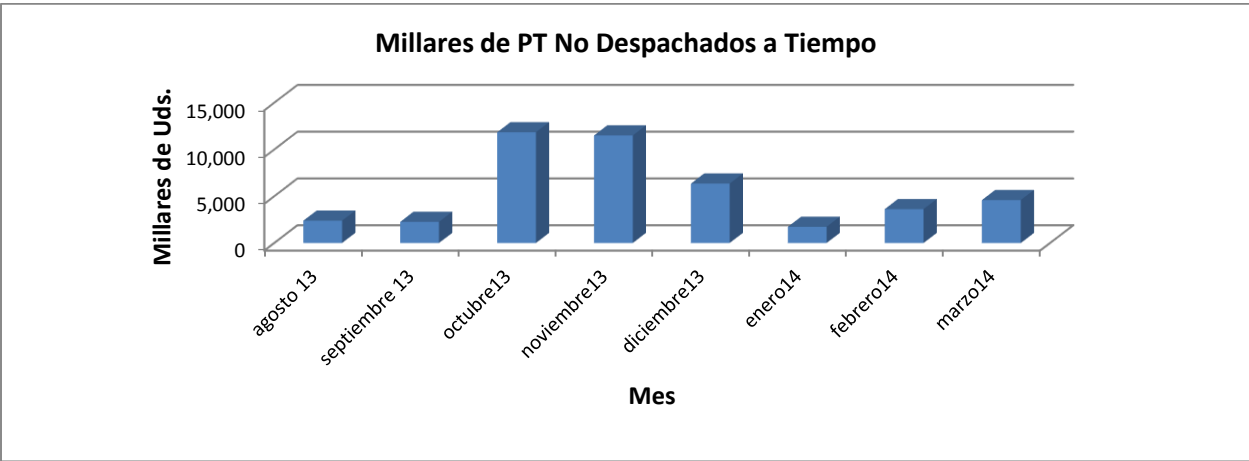


Figura 1. Millares de unidades de producto terminado no despachados a tiempo (fuente: base de datos de la empresa)

La figura anterior tiene un elemento adicional muy importante y es que muestra cómo este faltante en los despachos fue más crítico para los 3 últimos meses del año 2013. Históricamente, la compañía ha experimentado en el mismo trimestre de los años anteriores picos de demanda similares, ratificando la condición de estacionalidad en la demanda que presenta la operación, tal como se puede observar en la Figura 2 donde se muestra cómo durante los años 2010 a 2014 se dio una tendencia de crecimiento en la demanda a través de los meses con un pico máximo promedio durante el último cuarto del año.

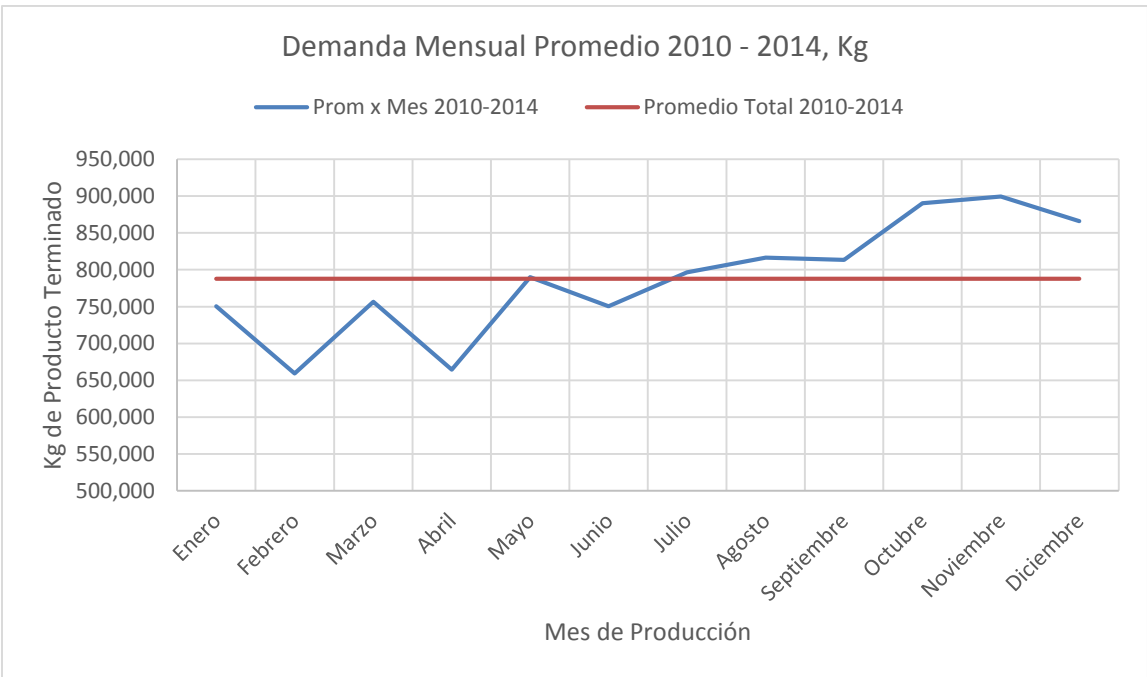


Figura 2, *fuentes*: base de datos de la empresa

Ahora bien, hablando específicamente de la demanda, es importante aclarar que para efectos de la conformación del plan de producción se considera conocida, determinística y constante durante el período de producción. Lo anterior se da gracias al ejercicio de pronósticos que se desarrolla al interior de la organización con base en el comportamiento histórico que ha tenido el mercado para cada producto en cada uno de los períodos de producción del año.

El proceso de hacer pronósticos en el contexto de los negocios es complicado y es propenso a generar errores. No es posible conocer de forma precisa cuantas órdenes se va a recibir o cuantos clientes van a llegar, cada día, mes o año a buscar los productos, pero a pesar de esto, los pronósticos con necesarios para ayudar a la gerencia de la organización para poder tomar decisiones alrededor de los recursos y el dimensionamiento futuro de la operación (Slack y otros, 2010). No es suficiente con saber si la demanda va a crecer o decrecer en un período de tiempo determinado, sin embargo, la velocidad a la cual cambia muy probablemente va a ayudar a la planificación del negocio. (Suplemento Cap. 6, Slack y otros, 2010)

Este ejercicio de pronosticar la demanda para cada producto no se encuentra dentro del alcance trazado para el estudio, el resultado es el que finalmente se usa como punto de partida para confirmar las necesidades a fabricar. Es por eso que. A pesar de que al eje central de la investigación se orientó a establecer el mejor método de inclusión de las ordenes de fabricación en el programa de producción de un centro de trabajo buscando cubrir la demanda, todo esto estratégicamente alineado de tal manera que se dé con los costos más bajos, con lo que adicional se busca controlar posibles pérdidas de productividad y sobre todo costos elevados al momento de ejecutar el programa de producción, se considera que la forma o el método usado para llevar a cabo el pronóstico también puede ser una oportunidad interesante para desarrollar una nueva investigación que termine por fortalecer aún más el proceso de planear la producción al interior de la empresa.



Cabe en este momento mencionar que en la empresa, en muchas oportunidades, el no haber tenido en cuenta el costo al momento de ejecutar un plan de producción ha terminado por generar escenarios en los que se ha conseguido satisfacer la demanda pero, para lograr esto, se ha incurrido en costos muy elevados de preparación de los recursos (*set up*) y de almacenamiento de PT. Esta situación ha afectado de manera importante la competitividad de la empresa que, como todas las compañías, tiene la necesidad de garantizar la permanencia de todos los productos en el mercado, como una de las herramientas para poder repeler los ataques de la competencia al satisfacer sin espera los requerimientos de los clientes, pero siempre manteniendo un buen nivel de competitividad al tener los costos de la operación dentro de las metas establecidas

Ya establecida la problemática encontrada dentro del diseño de los planes de producción, es importante incluir ahora dentro del análisis el hecho de que esta compañía ha basado por años su liderazgo en el mercado sobre la estrategia en costos, esto regido por una política de control permanente del gasto causado en la operación, lo que ha sido su principal ventaja competitiva. Adicional a esto, la calidad de los productos y la amplitud de referencias a través de las cuales se busca entregarle al cliente todo lo que necesita en un solo lugar (*one stop shop*) han hecho que las marcas sean reconocidas nacional e internacionalmente, lo que suma un nuevo elemento y es el que pone a la compañía dentro de la estrategia de operación internacional.

Finalmente, todo este entorno que rodea la operación ofrece de manera permanente muchas amenazas en todos los ámbitos, y en la actualidad está siendo cada vez más crítico, al momento de competir, la entrega oportuna del producto a los clientes, ojalá en algunas ocasiones de forma anticipada. El mercado en la actualidad ofrece al cliente infinidad de opciones de cambio o reemplazo para los productos que no están disponibles para entrega inmediata, es por esto que los clientes cada día que pasa se resisten más a tener que esperar. Adicional a esto, hay una creciente tendencia a que desaparezcan los casos de exclusividad de proveedor gracias a la

globalización del comercio, lo que pone como una necesidad más que como una ventaja, el tener siempre producto listo para entregar.

## **2.2. Objetivos**

### **Objetivo general**

Proponer la aplicación de un modelo matemático que permita calcular el tamaño óptimo de lote para el plan de producción en una compañía de manufactura de productos bienes de consumo masivo, de igual forma que lleve a optimizar los costos de producción y la disponibilidad de producto para despacho en tiempo cero, respetando las restricciones de capacidad de almacenamiento en bodega y que garantice la eficiencia del proceso productivo.

### **Objetivos específicos**

- Realizar un estudio de la literatura académica relacionada con problema ELSP (El problema programación de tamaño económico de lote de producción, por sus siglas en inglés) con el fin de establecer las principales ventajas y desventajas que ofrecen cada uno de ellos para la optimización de los procesos de programación de la producción en las empresas manufactureras.
- Proponer un método formal basado en optimización para el cálculo del tamaño económico de producción aplicable a una empresa de fabricación de productos de consumo masivo basada en la política de producción MTS (make to stock)
- Validar el método de cálculo propuesto a partir de una aplicación real con miras a evaluar su impacto en los indicadores empresariales de costo y disponibilidad de producto terminado para despacho.

### **2.3. Hipótesis**

Se busca contrastar las siguientes hipótesis como respuesta a los objetivos trazados dentro del desarrollo de la presente investigación,

Ho<sub>1</sub>: Es posible encontrar un modelo de programación dentro del denominado ELSP y sus variantes que permita optimizar el proceso actual de programación de una máquina en una compañía de manufactura donde se fabrican bienes de consumo masivo.

H1<sub>1</sub>: NO es posible encontrar un modelo de programación dentro del denominado ELSP y sus variantes que dé una solución factible para optimizar el proceso actual de programación de una máquina en una compañía de manufactura donde se fabrican bienes de consumo masivo.

### **2.4. Justificación y delimitación**

La Gerencia de Operaciones tiene como su principal responsabilidad administrar algunos o todos los recursos de los cuales se compone la operación al interior de las organizaciones que se encargan de producir y/o entregar bienes y servicios (Slack y otros, 2010). Un magíster en Gerencia de Operaciones tiene como su principal objetivo y responsabilidad la de investigar y profundizar en las teorías, instrumentos y/o herramientas metodológicas que puedan ser aplicados para la solución y optimización de procesos dentro de las áreas o departamentos a su cargo en la organización a la que pertenece.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de la presente investigación busca aplicar buena parte de las herramientas dadas por la Maestría en Gerencia de Operaciones con el fin de desarrollar una solución al problema de programación de la producción para una compañía de manufactura que fabrica bienes de consumo masivo. Luego de haber tenido la oportunidad, durante el desarrollo académico de la maestría, de

analizar diferentes situaciones teóricas o de haber estudiado casos reales ya resueltos, se acumuló una importante cantidad de elementos técnicos que permitieron identificar, en esta empresa, la oportunidad para estudiar la forma de resolver un problema real que tiene la operación correspondiente al momento de ejecutar la planeación de la producción. Sobre todo teniendo en cuenta que la presentación de una solución a este problema representa una oportunidad de mejora, principalmente orientada a eliminar una de sus principales debilidades, la cual le está volviendo vulnerable a las continuas amenazas que tiene dentro del mercado al que pertenece.

Es por esto que académicamente resultó retador poder entender la estrategia de la compañía a la cual se le va a desarrollar el modelo de tal manera que la solución propuesta respete y esté alineada con los objetivos estratégicos de su operación. De igual forma, el poder decantar y poner dentro de un modelo matemático la estructura real de la programación de una máquina hasta conseguir valores que puedan ser evaluados y comparados con lo que de manera tradicional se ha hecho en la fábrica, permitió al final consolidar los ejercicios de análisis de resultados, emisión de comentarios y conclusiones, pero esta vez con el objetivo de impactar de forma directa la operación y sus resultados en la parte económica, en la productividad, pero sobre todo buscando no perder competitividad por la no entrega a tiempo de producto a los clientes.

La Gerencia de Operaciones involucra cuatro áreas de acción, inicialmente se encuentra la el establecimiento de una estrategia de operación, luego está el diseño de los procesos, los productos y/o servicios a ofrecer, más adelante vienen las actividades de planificación y el control, para finalmente desarrollar todas las actividades de mejora y optimización (Slack y otros, 2010). La anterior estructura normalmente sólo se aplica hasta las tres primeras etapas en la vida real, es por esto que desde la academia se debe fomentar la aplicación de procesos de mejora continua, pero recurriendo a desarrollos científicos basados en la investigación con el correspondiente soporte técnico y teórico.

Tener entonces la oportunidad de desarrollar una solución real para la industria, haciendo uso de los elementos académicos recolectados a través del desarrollo de la maestría, no sólo va a permitir consolidar todos los elementos teóricos estudiados al aplicarlos en un problema vigente, sino va a abrir la mente de las compañías a nivel nacional en cuanto a las grandes posibilidades que tienen de optimizar y mejorar sus operaciones, sólo con acercarse a la academia donde se tiene debidamente establecidas metodologías de estudio e investigación que pueden llevar a encontrar o desarrollar una solución para las oportunidades de mejora que tengan..

Es por todo lo anterior que se pudo establecer un punto de partida para la realización del presente estudio, el cual tiene su origen principalmente en la necesidad de garantizar la competitividad y permanencia de todos los productos en el mercado de una organización que debe repeler los ataques de la competencia al satisfacer sin espera los requerimientos de los clientes, esto con el agravante de que una de sus principales ventajas competitivas es la alta diversidad de productos que ofrece, lo que implica el tener que contar con todas las referencias al mismo tiempo en stock, ya que normalmente el cumplimiento con el despacho a los clientes está condicionado a que se dé satisfacción por completo demanda puntual de cada cliente. A partir de la descripción del problema presentada anteriormente, este proyecto se centró en investigar dentro de la literatura que ha estudiado el ELSP (Economic Lot-sizing and Scheduling Problem, problema de programación del lote económico) hasta encontrar cómo al menos uno de los modelos estudiados pudiera ser usado total o parcialmente para ser aplicado a la operación de la empresa, esto luego de revisar que la mayor cantidad de los elementos del modelo fueran similares a la realidad de la organización. Una vez identificado este modelo de referencia, se procedió a acotar todas las condiciones y restricciones de tal manera que se logró al final hacer una simulación de la operación y encontrar un resultado que luego fue comparado con la situación real, buscando ratificar la conveniencia o no de que el modelo escogido fuera aplicable a la empresa bajo estudio.

Al final, los resultados obtenidos al desarrollar el proyecto deben permitir establecer una serie de conclusiones y recomendaciones enfocadas a optimizar la operación de la empresa, pero adicional deben mostrar con claridad la fortaleza que tiene la aplicación de los argumentos académicos conseguidos con la Maestría en Gerencia de Operaciones. De igual forma se debe poder conseguir una solución al problema planteado, gracias a la combinación de la experiencia técnica real con la formalidad contenida en la aplicación de metodologías basadas en la ciencia.

### **3. Marco de referencia**

#### **3.1. Consideraciones preliminares**

Para administrar correctamente los recursos al interior de las organizaciones, una de las principales tareas consiste en garantizar la rentabilidad de la organización con procesos eficientes, que tengan sus costos controlados dentro de los límites establecidos por las directivas de la empresa y siempre enfocados a la satisfacción de los clientes. Lo anterior se logra no sólo con procesos y procedimientos debidamente estandarizados, sino con la permanente búsqueda de nuevos avances o investigaciones que permitan mejorar todos aquellos procesos que puedan estar generando ineficiencias o sobre costos en la operación.

Al respecto, el ejercicio interno de análisis de los indicadores no cumplidos dentro de la operación de una compañía, permite identificar cuáles son las actividades que necesitan una revisión y el establecimiento de planes de acción con el fin de mejorar su desempeño. En este caso en particular se ha podido establecer que el modelo usado para crear los planes de producción necesita una herramienta adicional que permita comprobar que los valores obtenidos por el procedimiento tradicional son los correctos o mostrar que pueden ser optimizados en pro de mantener los mejores niveles de eficiencia y productividad del proceso de manufactura.

Con todos los elementos expuestos en los párrafos anteriores, se establece entonces que la forma como se diseñan los planes de producción debe involucrarse directamente en el proceso de tal manera que sirva como una de las herramientas para revisar e identificar las oportunidades de mejora y así contribuir directamente en la reducción de algunos de los costos inmersos en la operación. Frente a este escenario se decide que, para la presente investigación, se tomará como referencia la programación de una máquina en la cual se fabrica una importante cantidad de referencias diferentes en un período de tiempo establecido y a las cuales se les conoce la demanda, la rata de producción y los costos de alistamiento, pero para las

cuales se busca establecer la cantidad y el orden a fabricar en un período de tiempo establecido, de tal manera que se satisfaga la demanda con el menor costo de producción y almacenamiento posible.

Esta decisión, de enfocar el estudio en un solo centro de trabajo, fue posible tomarla teniendo en cuenta que la planta de producción está compuesta por máquinas independientes con características técnicas muy similares, las cuales trabajan en paralelo cada una con un grupo específico de referencias que no se repiten entre sí, pero que en general tienen los mismos parámetros de operación en cuanto a los tiempos de alistamiento (*set up*), la generación de desperdicio (*scrap*), siempre dependiendo de la secuencia en la cual sea programada cada una de las líneas de producción. Una vez se consigue establecer un modelo con el cual se pudo establecer una plan de producción optimizado en costos para uno de los equipos de la planta, este puede ser copiado y aplicado bajo los mismos supuestos y variables al resto de máquinas, con lo cual se podría programar en bloque todas los centros de trabajo de la planta, garantizando en general un mejor resultado en términos de costos y cubrimiento de la demanda. El resultado que se logre obtener podría, más adelante, servir como punto de partida para extender el modelo a otros centros de trabajo dentro de la misma organización.

Una vez expuestas todas las condiciones que rodean la forma de programar que tiene actualmente la empresa, se hace necesario entrar a revisar los componentes teóricos que puedan soportar la toma de la decisión sobre el modelo matemático a implementar con el fin de optimizar, en términos de costos, la creación y ejecución del plan de producción. Para esto se procedió a estudiar los siguientes elementos:

- Cómo calcular el tamaño de lote a fabricar de cada referencia, EOQ, economic Order Quantity.
- Cómo generar el orden en el cual se deben incluir los lotes de producción de los productos en el plan del centro de trabajo.



- El modelo matemático que sea semejante a la realidad de la operación en las condiciones, variables y restricciones, de tal manera que pueda ser tomado como referencia para proponer una solución matemática para la creación del plan de producción.

### **3.2. EOQ, Economic Order Quantity (Cantidad Económica de Producción)**

Como primera medida, se hizo relevante comenzar por entender la forma en que se debería calcular el tamaño de lote a fabricar para cada una de las referencias asignadas a una línea de producción. EOQ (Economic Order Quantity) es un concepto que se viene manejando en el medio de la manufactura por más de un siglo, en todos estos años se ha desarrollado múltiples métodos para establecer el tamaño económico para un lote de producción que minimice los costos de alistamiento y almacenamiento para la orden fabricada. Estos modelos han venido siendo cada vez más avanzados y sus creadores han buscado resolver problemas cada vez más complejos. Uno de estos problemas es el ELSP (Holmbom & Segerstedt, 2014), con el cual se busca establecer una solución factible para el problema de calcular el tamaño económico de lote de producción, así como el de programarlo, esto aplicado a un conjunto de productos que se fabrican en una sola máquina, tal como sucede en el caso que originó esta investigación.

La fórmula y el modelo para la EOQ fue presentado originalmente por Ford W, Harris en 1913 en el artículo "How Many Parts to Make at Once" en "Factory, The Magazine of Management (Erlenkotter, 1990). En este documento Harris menciona los siguientes elementos que deben ser incluidos para calcular el tamaño económico para el lote de producción dentro de un proceso de manufactura, Harris (1913),

- Costo unitario (C), que corresponde al costo final en dinero por cada unidad de producto fabricado.
- Costos de Set Up (S), que corresponde a todo el gasto en el que se incurre al momento de iniciar la fabricación de una referencia, inclusive el gasto administrativo.

- Costos de intereses y Depreciación en Stock (I), que corresponde al toda la logística de ubicación y almacenamiento del producto, que al estar mucho tiempo en bodega pierde valor.
- Movimientos (M), que debe tenerse en cuenta por el costo que implica mover grandes cantidades fabricadas para ser almacenadas.
- Intervalo de fabricación (T), que corresponde al tiempo entre la generación de la orden y la entrega del producto a bodega.
- Finalmente asigna la letra X al tamaño de lote desconocido a calcular.

Con todos esto elementos, pero incluyendo un supuesto del 10% para el costo de depreciación anual, el autor plantea la siguiente función objetivo para el costo total en la cual hace el cálculo por unidad, no por intervalo de tiempo y se incluye el costo de Set Up para la cantidad promedio en Stock,

$$\frac{1}{240M} (CX + S) + \frac{S}{X} + C$$

Para poder establecer el tamaño de lote X que minimiza esta ecuación, se debe hacer un procedimiento matemático especializado, por esa razón Harris quien tenía formación matemática limitada (Erlenkotter, 1990), establece que es suficiente decir que el valor para X que va a dar el valor mínimo para esta ecuación se reduce a la raíz cuadrada de la expresión **240MS** dividida por **C** terminando en la fórmula clásica para la EOQ,

$$\sqrt{\frac{240MS}{C}} = \sqrt{\frac{2 \times 12MS}{0.1 C}}$$

Esta expresión fue finalmente asociada con Wilson R.H quien en 1934 publicó una versión en un artículo del Harvard Bussines Review omitiendo la correspondiente referencia que debía haber citado la autoría de Harris.

De acuerdo con le recopilación hecha por Erlenkotter (1990), en un artículo publicado por Alford (1927) quien fue siempre un seguidor del tema para EOQ y siempre

alineado con el modelo Harris-Wilson, menciona la llamada “Ley del Tamaño Económico de lote” que de alguna manera valida el modelo propuesto por los autores y que establece lo siguiente,

*“La cantidad de producto que puede ser fabricado al más bajo costo unitario, varía directamente con respecto a la raíz cuadrada del costo de alistamiento e inversamente contra la raíz cuadrada de los costos asociados con el interés y el almacenamiento”.*

Recientemente, Holmbom & Segerstedt (2014), describen la fórmula para el cálculo del costo de fabricación por unidad de tiempo con las siguientes variables,

- $d$  = demanda.
- $h$  = costo unitario de almacenamiento para cada producto.
- $A$  = costos de set up por corrida para cada producto, que es fija en cada caso.
- $q$  = Cantidad por lote.

$$Cq(q) = \frac{A}{q} + h \frac{q}{2d}$$

Esta expresión es muy semejante a la de Harris si se reemplaza en su modelo final  $h = 0.1 C$ ,  $d = 12 M$  y  $A = S$ .

Por último estos 2 mismos autores retoman de Grubbstrom (1995) la siguiente expresión para el costo total indicando que fue el resultado de manipular algebraicamente la ecuación quedando de la siguiente forma:

$$Cq(q) = \frac{h}{2dq} \left( q - \sqrt{\frac{2dA}{h}} \right)^2 + \sqrt{\frac{2Ah}{d}}$$

Esta ecuación está conformada por dos partes, la segunda es constante y no depende del tamaño del lote  $q$  a fabricar del producto, esto implica que el mínimo

valor para el costo se obtiene cuando la primera parte es igual a cero y esto sólo se da cuando la expresión dentro del paréntesis es igual a cero. De esta forma se puede llegar a que el mínimo valor lo da la expresión final para EOQ, el cálculo del tamaño de lote más económico que minimiza los costos de almacenamiento y de set up para la corrida de cada producto,

$$EOQ = q = \sqrt{\frac{2dA}{h}}$$

Esta última expresión es de nuevo validada por Pinedo (2005) en el capítulo 7, sección 7.2, la que luego va a servir de base para el desarrollo hecho por este mismo autor y que es citado en el numeral 5.2.1 del documento, con el cual se va a calcular de forma independiente el tamaño de lote para cada uno de los productos que conforman el plan de producción de la máquina bajo análisis en la investigación.

### **3.3. Scheduling, secuencia en programación de la producción.**

Con respecto al tema objeto de este estudio que es la programación de la producción, se encuentra el termino Scheduling, que consiste en la organización y asignación de tiempo al uso de recursos para ejecutar todas las operaciones requeridas para producir las salidas en los tiempos establecidos Montoya Torres (2015), que para este estudio corresponde al cumplimiento de la demanda de bienes de consumo.

Para el caso de los procesos de manufactura, Montoya Torres (2015) propone el siguiente esquema jerárquico para la función de producción (Figura 4)

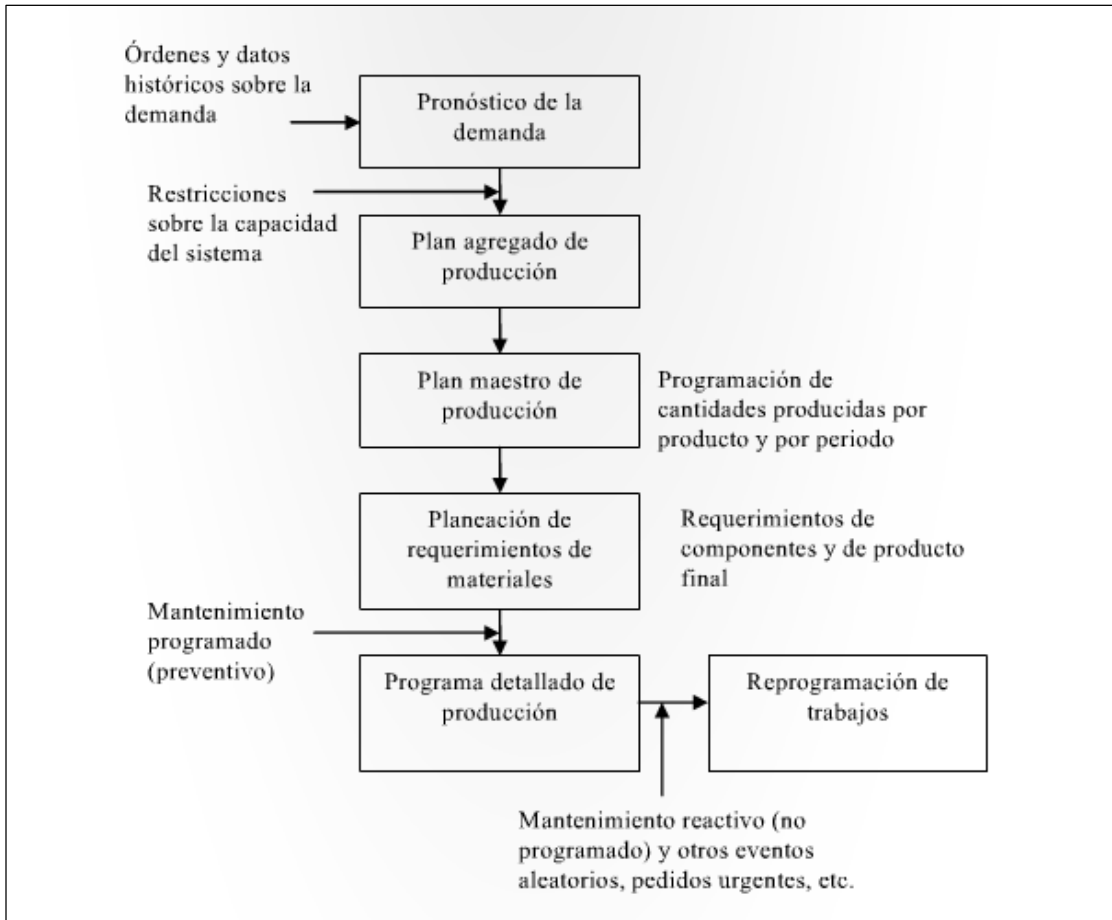


Figura 4. Esquema de jerarquía de decisiones para la programación de tareas, (Tomado de Montoya Torres, 2015)

Tomando como referencia este esquema, se puede establecer que la investigación se desarrolló de forma específica para implementar un modelo que permita crear el Plan Maestro de Producción, en el cual se programan las cantidades que se van a fabricar por producto y por período, tomando como entrada los datos de pronóstico de la demanda que se basan en los históricos que tiene la empresa para los productos fabricados en la máquina bajo estudio. Es importante mencionar que para efectos de la investigación no se va a tener en cuenta las alteraciones que pueda sufrir el plan de producción durante el período por la naturaleza estocástica de los procesos de manufactura, esto teniendo en cuenta que solo se va a llegar hasta la parte de scheduling que forma parte del plan maestro de inicio del período y a que al interior de la organización se busca poder desarrollar un indicador de gestión que cuantifique el cumplimiento de este plan maestro, por lo que se puede establecer la

condición de que sea un proceso determinístico con demanda fija durante el tiempo de ejecución, ambos supuestos son tenidos en cuenta al momento de escoger el modelo matemático a ser usado como referencia.

Más adelante Montoya (2015) plantea una forma de clasificar los problemas implícitos al momento de hacer la programación de una operación, esto con el fin de caracterizarlo para poder establecer el modelo más adecuado para darle solución. Para esto el autor procedió a dividir en tres campos principales la caracterización de las características de un plan de producción, el primero es la configuración del sistema, luego las características y restricciones de las tareas, y por último las medidas de desempeño.

De acuerdo con los elementos definidos en la notación de Graham (Montoya Torres 2015) para determinar el modelo de programación de producción bajo estudio, la configuración del sistema corresponde a una única máquina independiente, con lo cual se establece que con una sola operación se va a poder completar las tareas, pedidos, de los productos asignados a ese centro de trabajo. En cuanto a las restricciones, únicamente se considerarán tiempos de preparación de la máquina (setups) dado que la configuración que tiene la empresa para dar forma a sus planes de producción no presenta ninguna característica especial para alguna de las tareas, corridas de producción por referencia, simplemente todas están disponibles al iniciar el período de tal manera que se pueda dar el orden adecuado para cumplir con los requerimientos de demanda. Por último, para las medidas de desempeño, que se ocupa principalmente de revisar los resultados menos obvios, como son el minimizar los costos o maximizar las ganancias, al momento de evaluar o comparar el funcionamiento de los programas de trabajo, el autor cita los tres criterios más comunes, minimizar el tiempo de duración del programa, minimización de las tareas en proceso y finalmente minimización de las tardanzas o retrasos para completar las tareas, que para efectos de la investigación, no son aún aplicables ya que al ser el primer desarrollo con el que se busca proponer un modelo matemático de solución, no se cuenta aún con posibles soluciones comparables o no se ha calculado aún al

menos uno de los modelos obvios, como es reducir los costos totales, con lo que se podría ya avanzar a la siguiente etapa de cuantificar el desempeño del problema.

Por último queda el entrar a proponer un modelo matemático para establecer el plan de producción, que luego sea la guía para la ejecución de los trabajos respetando las restricciones de uso de los recursos, pero sin calcular el tamaño de las tareas.

### **3.4. ELSP, Economic Lot Scheduling Problem (El problema programación de tamaño económico de lote)**

Luego de entender la base teórica con la cual se podría entrar a calcular el plan de producción para una máquina con un grupo de productos asignados, esto es teniendo el tamaño del lote y luego el orden de ejecución que lleven a cubrir la demanda de los clientes, se tiene el suficiente soporte para entrar a decidir cuál sería una buena opción para resolver el problema de programar la producción de una máquina en un proceso de manufactura.

La literatura se ha ocupado por mucho tiempo en estudiar la mejor forma de establecer el tamaño del lote de un producto a fabricar, siempre bajo diferentes condiciones o restricciones. Resulta interesante comenzar por la propuesta de establecer el tamaño de una corrida bajo la perspectiva de optimizar hasta alcanzar el máximo retorno, definido como la relación del beneficio contra los costos de producción (Eilon, 1959). Desde los años 1950's los investigadores y empresarios ya tenían clara la necesidad de que el plan de producción fuera establecido bajo la idea de asegurar la disponibilidad de todas las referencias de un portafolio multi-producto, esto sobre la base de que la producción debía comenzar antes de que se agotara su existencia.

Siguiendo con la idea de elaborar un plan de producción que evite desabastecimientos y respete la política de costos, se encuentra el planteamiento de Winands, Adan & Van Houtum (2005) quienes proponen las 3 categorías que se mencionan y explican a continuación para enmarcar las variables que deberían o no

ser incluidas para hacer la planeación del proceso de producción multi-producto de una sola máquina. Éstas son:

- 1. Se deben tener en cuenta o no los costos y tiempos de alistamiento.** Para la presente investigación y para el modelo de negocio de la empresa analizada, es fundamental la secuencia que va a ser usada para acomodar los productos dentro del plan de producción, ya que al combinarse con el tamaño de la corrida de cada producto, lote, se va a poder reducir los costos y tiempos de alistamiento que puedan ir en contra de la competitividad de la organización.
- 2. Los productos fabricados son estándar o personalizados.** Esta característica es también importante al momento decidir cuál es el modelo de programación que podría ser implementado, ya que este debe poder ajustarse al tipo de operación y manejo de inventarios que, normalmente para una empresa como la del estudio, puede ser MTO (make to order) y MTS (make to stock), dependiendo del cliente. En este mismo documento se estableció que el negocio base de la investigación opera alrededor de la fabricación de productos estándar; es decir, se trabaja con política de producción e inventarios tipo MTS.
- 3. La demanda es estocástica o determinística.** En un proceso determinístico la forma como se mueve la demanda permite establecer un plan de producción cíclico dentro de un período de tiempo establecido. Adan & Van Houtum (2005). De acuerdo con esto y como parte del proceso de investigación desarrollado para encontrar un modelo matemático con el que se pueda comparar contra el método usado actualmente en la empresa bajo estudio para hacer la programación de la producción, se pudo establecer que era viable considerar la demanda como determinística, esto con la evidencia de que hay estacionalidades marcadas y calculables con una alto porcentaje de certeza a través de un pronóstico de venta y soportado en el movimiento histórico del mercado.



Una vez que se han entendido que estas tres categorías forman parte del modelo de programación que se quiere analizar para la empresa, se acudió al siguiente diagrama de Venn (tomado de Winands, Adan & Van Houtum (2005)) el cual describe los ocho sub-problemas que de una u otra manera se pueden encontrar cuando se estudia el problema de programación en una máquina multi-producto (Figura 3). Este diagrama fue desarrollado con base en la caracterización que describen los tres puntos arriba mencionados, pero adicionalmente deja ver el nivel de complejidad al que se puede llevar un modelo de programación de acuerdo con las variables o restricciones que se decida incluir dentro del análisis.

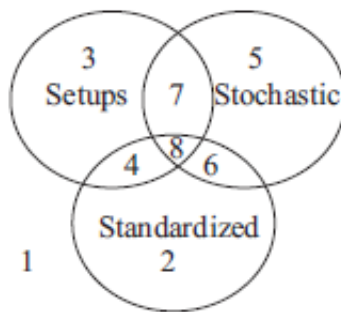


Figura 3. Diagrama de Venn para los Sub problemas de programación de una máquina multi producto (Tomado de: Winands, Adan, & Van Houtum (2005))

Al respecto, para el caso objeto de este estudio se comienza descartando los problemas 5, 6, 7 y 8 ya que están asociados a una demanda estocástica, que no es el caso que se analiza. Luego de tener la demanda determinística como referencia y al incluir la necesidad de tener en cuenta los costos de set up dentro del modelo para un plan de producción que va a ser diseñado únicamente para fabricar productos de línea, estándar, se llega a la conclusión de que el sub problema 4 es suficiente para intentar encontrar un modelo matemático que ofrezca una solución para ser comparada con la solución que actualmente es generada aplicando la metodología arriba expuesta.

Este modelo o problema 4 es conocido como Economic Lot-sizing and Scheduling Problem (ELSP), según Winands, Adan & Van Houtum (2005). Esto teniendo en

cuenta que se trata de programar una máquina multi-producto bajo la interacción entre los costos de *setup* y valores o productos estandarizados de proceso, buscando satisfacer una demanda determinística, considerando que la demanda no satisfecha se pierde o simplemente entra como *backorder* hasta cuando el producto esté disponible en stock para ser entregado, esto sin generar costo adicional por sanción. Para la compañía, el indicador de gestión solamente habla de una demanda no cubierta a tiempo o dentro de los términos de tiempo establecidos, que es de alguna manera lo que permite medir la gestión de la producción en cuanto al cumplimiento de las entregas, por otro lado los departamentos de ventas y/o logística son los responsable de dar manejo a la demanda no satisfecha, llevándola a pérdida o backorder dependiendo de la característica del cliente y a veces hasta del mismo producto que no haya sido despachado a tiempo.

Con base en lo anterior, se llegó a la decisión de que esta investigación sería enfocada en la revisión de la literatura más reciente al rededor del ELSP (Problema de Programación del Lote Económico) con el fin de evaluar si existe la posibilidad de que alguno de estos modelos se aproxime a la realidad de la organización y luego tratar de acotar todas las condiciones y restricciones de tal manera que se pueda hacer al menos una simulación de la operación y encontrar un resultado que indique si el modelo escogido es aplicable o no y qué ventajas o desventajas puede ofrecer su aplicación, comparado con el procedimiento tradicionalmente aplicado en la empresa.

Por último, luego de que se ha llegado a enmarcar el estudio como ELSP se decide incluir un elemento adicional para acotar el problema y es que la capacidad de almacenamiento de producto final no es infinita. De esta forma, al momento de buscar el modelo que pudiera ser aplicado para encontrar una forma diferente de armar el plan de producción, se hizo debe tener en cuenta los costos en los que se incurre al momento de almacenar el producto terminado, lo que necesariamente debería llevar al mejor equilibrio entre los costos de fabricar un tamaño de los lote y

el costo de almacenar lo que se haya producido, respetando la mejor secuencia para la operación.

Una vez se logró establecer que la investigación sería orientada al establecimiento de un modelo matemático que permitiera su aplicación para calcular el plan de producción de una máquina perteneciente a la planta de producción en estudio, se considera indispensable ver un poco de dónde vienen los elementos básicos que componen el ELSP como son el establecimiento de la cantidad más adecuada a producir con el fin de minimizar los costos de almacenamiento y el orden más adecuado para fabricar los productos minimizando los costos de alistamiento, pero siempre buscando satisfacer la demanda de los clientes.

De acuerdo con Boctor (1987) los estudios que por décadas han trabajado en torno al ELSP dejan ver que este problema puede surgir en muchos tipos de situaciones de manufactura como puede ser las operaciones de moldeo y estampado, embotellado y empaçado, formado de metal y líneas de producción de plásticos, líneas de pesaje, producción de papel y muchos otros, lo que generó una expectativa bastante importante para el desarrollo del presente estudio. Esto decantó de una forma más clara la posibilidad de que el ELSP, con una o la combinación de más de una de sus posibles variantes, fuera una opción válida para analizar el problema que sirvió de marco para la investigación, desarrollada en torno a la forma de hacer el cálculo de tamaño óptimo de lote en una compañía de manufactura de bienes de consumo. Finalmente, luego de decidir usar este modelo para calcular el plan de producción, se consideró que la opción más viable para encontrar una solución factible debía ser a través del procedimiento de aplicación de un modelo matemático que en sus características básicas se asimile y sea aplicable para desarrollar la programación de una máquina sencilla, para luego proceder a multiplicar este proceso en todos los centros de trabajo que conforman el total de la operación.

Los elementos críticos para un plan de producción son la secuencia y el tamaño de lote así como su interacción (Winands, Adan & Van Houtum, 2005). Adicional a este

concepto, resultó de gran utilidad aprovechar la propuesta de clasificación para el ELSP llevada a cabo por Vidal & García (2006) como resultado de la revisión hecha a la literatura que ha sido desarrollada en torno del problema de programación de lote económico y que se muestra en la Figura 5.

a.	Según el modo de cálculo del lote:
a.1.	Solución Independiente (Independent Solution)
a.2.	Método del Ciclo Común (Common-Cycle-Approach)
a.3.	Método del Período Básico (Basic-Period-Approach)
a.4.	Método del Período Básico Extendido (Basic-Period-Extended-Approach)
a.5.	Método de Modificación de los Tamaños de Lote (Varying-Lot-Sizes-Approach)
b.	Según la tipología del método de resolución:
b.1.	Analíticos
b.2.	Heurísticos
c.	Según el objeto del problema:
c.1.	Determinar el Tiempo de Ciclo o Frecuencia (Tamaño de Lote)
c.2.	Determinar la Secuencia Productiva
c.3.	Determinar el Tiempo de Ciclo y la Secuencia Productiva
d.	Tipo de Estudio abordado en el problema:
d.1.	Complejidad del Problema
d.2.	Optimalidad del Problema
d.3.	Análisis de Sensibilidad
e.	Realización de aplicaciones numéricas en el desarrollo de la argumentación. Empleo o creación de Benchmark.
f.	Evaluación de diversas heurísticas mediante simulación.
g.	Modificación de parámetros dados.
g.1.	Ratio de Producción
g.2.	Set-up

Figura 5. Clasificación del ELSP (tomado de: Carreras & Sabater, 2006)

La tabla anterior sirvió como referencia para estructurar el camino que se seguiría para la formulación del modelo, quedando inicialmente con las siguientes características:

- El tipo de cálculo de lote que más se ajusta a la compañía es el “Método de Período Básico (Basic-Period-Approach)”, que según los autores, permite tener distintos tamaños de lote para cada uno de los productos, pero insistiendo en que el tiempo de corrida de cada referencia debe ser un múltiplo entero del período básico, que debe ser de la longitud suficiente para acomodar la producción de todos los productos. Para este caso se considera de manera explícita que los tiempos de setup no afectan la secuencia en la que se ordenan los productos dentro del plan de producción.

- El objeto del problema definitivamente debía incluir el determinar el Tiempo de Ciclo y la Secuencia Productiva, entendiendo que es la necesidad principal que generó la realización de la presente investigación, esto de acuerdo con Mokhlesian, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Jolai, F. (2010) quienes resumen que el propósito del ELSP es minimizar los costos de almacenamiento y alistamiento al mismo tiempo que se satisface la demanda de cada producto para cada ciclo productivo, la solución incluye establecer un plan de producción consistentemente repetitivo para todos los productos, acorde con la demanda.
- El tipo de estudio que se abordó fue enfocado básicamente en poder evaluar de forma matemática la posibilidad de optimizar el proceso actual de planeación de la producción para la fábrica de referencia.

#### 4. Análisis de la situación actual, costo del plan de producción

En las secciones anteriores se han mencionado las características del proceso que se aplica para desarrollar la planeación de la producción dentro de la operación usada como referencia y que, de alguna manera, sirvieron como punto de partida para la realización de este estudio. Con el apoyo de la empresa, se procedió a hacer el levantamiento de toda la información real que el modelo define como necesaria para su formulación, los datos recolectados fueron los siguientes,

- Un programa de producción real con las referencias y cantidades fabricadas durante un período específico de la operación, para un centro de trabajo.
- Demanda mensual promedio para cada referencia.
- Velocidad de producción en millares/hora.
- Costo de ajuste de Set Up para cada referencia dependiendo del producto que le antecede en el plan de producción.
- Desperdicio por ajuste de proceso al pasar de una referencia a la siguiente dentro del plan de producción y su costo.
- Costo de almacenamiento por referencia.

A continuación se presentan los valores reales obtenidos del proceso de producción, con los cuales se hizo un primer cálculo del costo total, *set up* más almacenamiento, en el cual se está incurriendo actualmente y que será el valor contra el cual se espera poder contrastar los resultados obtenidos luego de desarrollar el modelo en búsqueda de una solución factible de buena calidad, pero que adicionalmente permita establecer si de esta manera se logra reducir el costo total de ejecutar el plan de producción.

La Tabla 1 consolida los datos que conforman la parametrización de la operación del grupo de productos que son fabricados en el centro de trabajo y que no dependen de la secuencia en la cual se lleve a cabo la producción; es decir, son características inherentes a cada una de las referencias. Éstas son:

- Demanda promedio para cada referencia en unidades por día.
- Velocidad de producción en unidades por día para cada referencia.
- Costo de almacenamiento por unidad de producto terminado

La tabla 2 presenta los valores que cuantifican los cambios de referencia dentro del plan de producción; estos son:

- Tiempo por ajuste de proceso en horas al cambiar de la referencia j a una referencia k,

Tabla 1. Parámetros clave de la operación

Número de producto i	Demanda Millares / Mes	Demanda Unidades / Día $d_i$	Rata de Producción unidades / Día $p_i$	\$ almacenar prd x unidad $h_i$
1	4,427	147,560	750,000	81
2	609	20,289	408,000	200
3	303	10,108	408,000	200
4	479	15,958	306,000	250
5	129	4,295	306,000	273
6	178	5,944	200,000	500
7	605	20,167	408,000	200
8	505	16,838	408,000	200
9	252	8,393	408,000	200
10	130	4,337	306,000	273
11	84	2,814	306,000	250
12	131	4,382	306,000	273
13	78	2,613	306,000	273
14	56	1,863	180,000	375
15	29	975	200,000	500
16	91	3,048	200,000	500
17	50	1,673	120,000	500
18	422	14,080	660,000	86
19	123	4,108	660,000	86
20	304	10,138	408,000	300
21	65	2,166	176,000	500
22	85	2,833	297,000	273
23	308	10,266	300,000	208
24	292	9,743	300,000	208
25	137	4,560	180,000	234
26	87	2,904	108,000	625
27	136	4,532	108,000	750
28	328	10,927	128,000	625
29	40	1,327	120,000	625
30	51	1,700	100,000	625
31	22	733	100,000	625
32	142	4,726	270,000	313
33	208	6,928	270,000	208
34	208	6,928	270,000	208

Fuente: datos adquiridos por el investigador

Tabla 2. Tiempos de setup

Base de tiempos de cambio, horas.																																			
Item N°	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24	p25	p26	p27	p28	p29	p30	p31	p32	p33	p34	
p1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p2	3	0	1	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p3	3	1	0	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p4	3	3	3	0	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p5	3	3	3	1	0	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p6	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p7	3	2	2	3	3	3	0	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p8	3	2	2	3	3	3	1	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p9	3	2	2	3	3	3	1	1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p10	3	3	3	2	2	3	3	3	3	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p11	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	0	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p12	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	0	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p13	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1	0	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p14	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	0	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p15	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	1	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p16	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	1	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p17	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	0	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p18	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p19	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p20	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p21	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p22	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p23	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p24	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p25	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
p26	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3	3	3	3	3	3	3	
p27	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3	3	3	3	3	3	
p28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	2	3	3	3	3	3	
p29	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	0	3	3	3	3	3	
p30	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3	3	3	3	
p31	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3	3	3	3	
p32	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	
p33	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3	3
p34	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	3

Fuente: datos adquiridos por el investigador

- Costo de ajuste de proceso por referencia al pasar de una referencia j a una referencia k, perteneciente al mismo conjunto de productos. Este valor se establece de la siguiente forma:



- Se establece el número de personas que intervienen en el cambio de referencia, sólo personal directamente involucrado en la actividad, que para este caso sólo corresponde a una de las siguientes opciones,

<b>Tipos de Cambio de Referencia</b>	<b>N° Personas</b>
Cambio de Troquel	2
Cambio de Molde	3
Cambio de Color	2

Fuente: datos adquiridos por el investigador

- Esta información combinada con las horas de cambio entre referencias incluidas en la tabla del punto anterior, permite determinar las horas-hombre totales necesarias para la realización del set up de cada referencia.
- Tomando como fuente de información el Departamento de Recursos Humanos perteneciente a la empresa, se pudo calcular que el costo por hora real promedio de los operadores que ejecutan la labor de set up, es de COP \$6,167/hora.
- De esta manera ya es posible tabular el costo asociado a cada uno de los tipos de cambio pertenecientes a la operación de la siguiente forma,

<b>Tipos de Cambio de Referencia</b>	<b>Cop</b>
Cambio de Troquel	\$ 12,333
Cambio de Molde	\$ 18,500
Cambio de Color	\$ 12,333

Fuente: datos adquiridos por el investigador

- Por otro lado, se pudo establecer que cada set up tiene implícito la generación de un desperdicio (*scrap*) en kilogramos de materia prima, correspondiente al tiempo que toma estabilizar el proceso de producción.
- Este valor de *scrap* es estándar y depende directamente del tipo o tipos cambio que estén involucrados en cada *set up*. Los valores de desperdicio fueron consignados en la Tabla 3 y su transformación en pesos se hizo costeadando cada kilogramo generado al valor que tiene la materia prima consumida, que en este caso corresponde a rollos de lámina de poliestireno.

Tabla 3. Matriz de costos por scrap de setup

MATRIZ DE COSTOS POR SCRAP DE SET UP (Miles de Pesos)																																		
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
1	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
2	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
3	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
4	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
5	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
6	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
7	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
8	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
9	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	775	310	0	775	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
10	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
11	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
12	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
13	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	775	310	0	775	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
14	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	0	310	0	0	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
15	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
16	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	775	310	0	775	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
17	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	0	310	0	0	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
18	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
19	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	775	310	0	775	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
20	291	291	0	291	0	291	291	0	355	291	0	0	355	775	0	355	775	291	355	0	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	355	291	291	337
21	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
22	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
23	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
24	291	291	310	291	310	291	291	310	355	291	310	310	355	775	310	355	775	291	355	310	291	291	291	0	291	291	0	291	291	291	355	291	291	0
25	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
26	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
27	291	291	310	291	310	291	291	310	355	291	310	310	355	775	310	355	775	291	355	310	291	291	291	0	291	291	0	291	291	291	355	291	291	0
28	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
29	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
30	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
31	291	291	310	291	310	291	291	310	0	291	310	310	0	775	310	0	775	291	0	310	291	291	291	337	291	291	337	291	291	291	0	291	291	337
32	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
33	0	0	310	0	310	0	0	310	355	0	310	310	355	775	310	355	775	0	355	310	0	0	0	337	0	0	337	0	0	0	355	0	0	337
34	291	291	310	291	310	291	291	310	355	291	310	310	355	775	310	355	775	291	355	310	291	291	291	0	291	291	0	291	291	291	355	291	291	0

Fuente: datos adquiridos por el investigador

- Finalmente el costo total causado en cada cambio de producto, que depende directamente de la secuencia en la cual se aplique el movimiento, se obtiene de la siguiente forma,
  - En la matriz de cambios se asigna, al *set up* ejecutado entre un producto y siguiente, el tipo de cambio de referencia que le

corresponde, quedando directamente asociado el costo en el que se incurre al ejecutar la actividad

- Paso seguido, se calcula y suma el costo que acarrea la ejecución del personal, que se calcula como consecuencia directa de los tiempos de set up,
- Por último se suma con el costo o pérdida que hay de material, scrap, que se genera al hacer cada set up.

Este resultado consolidado se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Costos totales de setup

**MATRIZ DE COSTOS TOTALES POR SET UP, C\$jk, en Cop Miles**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
p1	0	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	30	385	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p2	45	0	325	45	355	45	30	340	385	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	340	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p3	336	306	0	336	45	336	321	30	385	336	45	45	400	820	45	400	820	336	400	30	336	336	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p4	45	45	355	0	325	45	45	355	400	30	340	340	385	805	355	400	820	45	400	355	45	30	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p5	336	336	45	306	0	336	336	45	400	321	30	30	385	805	45	400	820	336	400	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p6	45	45	355	45	355	0	45	355	400	45	355	355	400	820	340	385	805	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p7	45	30	340	45	355	45	0	325	370	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	340	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p8	336	321	30	336	45	336	306	0	370	336	45	45	400	820	45	400	820	336	400	30	336	336	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p9	336	321	340	336	355	336	306	325	0	336	355	355	45	820	355	45	820	336	45	340	336	336	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p10	45	45	355	30	340	45	45	355	400	0	325	325	370	790	355	400	820	45	400	355	45	30	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p11	336	336	45	321	30	336	336	45	400	306	0	15	370	790	45	400	820	336	400	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p12	336	336	45	321	30	336	336	45	400	306	15	0	370	790	45	400	820	336	400	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p13	336	336	355	321	340	336	336	355	45	306	325	325	0	790	355	45	820	336	45	355	336	321	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p14	336	336	355	321	340	336	336	355	45	306	325	325	15	0	355	45	45	336	45	355	336	321	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p15	336	336	45	336	45	321	336	45	400	336	45	45	400	820	0	370	790	336	400	45	321	336	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p16	336	336	355	336	355	321	336	355	45	336	355	355	45	820	325	0	790	336	45	355	321	336	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p17	336	336	355	336	355	321	336	355	45	336	355	355	45	45	325	15	0	336	45	355	321	336	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p18	30	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	0	370	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p19	321	336	355	336	355	336	336	355	45	336	355	355	45	820	355	45	820	306	0	355	336	336	336	382	336	336	382	336	336	336	45	336	336	382
p20	336	321	30	336	45	336	321	30	385	336	45	45	400	820	45	400	820	336	400	0	336	336	336	382	336	336	382	336	336	336	400	336	336	382
p21	45	45	355	45	355	30	45	355	400	45	355	355	400	820	340	385	805	45	400	355	0	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p22	45	45	355	30	340	45	45	355	400	30	340	340	385	805	355	400	820	45	400	355	45	0	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p23	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	0	352	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p24	336	336	355	336	355	336	336	355	400	336	355	355	400	820	355	400	820	336	400	355	336	336	306	0	336	336	45	336	336	336	400	336	336	45
p25	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	0	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p26	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	0	352	45	45	45	400	45	45	382
p27	336	336	355	336	355	336	336	355	400	336	355	355	400	820	355	400	820	336	400	355	336	336	336	45	336	306	0	336	336	336	400	336	336	45
p28	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	0	30	45	400	45	45	382
p29	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	30	0	45	400	45	45	382
p30	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	0	370	45	45	382
p31	336	336	355	336	355	336	336	355	45	336	355	355	45	820	355	45	820	336	45	355	336	336	336	382	336	336	382	336	336	306	0	336	336	382
p32	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	0	45	382
p33	45	45	355	45	355	45	45	355	400	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45	45	400	45	45	382
p34	336	336	355	336	355	336	336	355	400	336	355	355	400	820	355	400	820	336	400	355	336	336	336	45	336	336	45	336	336	400	336	306	0	336

Fuente: datos adquiridos por el investigador

Una vez se ha conseguido costear de forma detallada cada uno de los cambios individuales, según el producto de origen y el que le sigue en la secuencia, se procedió a calcular el gasto total asociado al plan de producción que ha sido establecido usando el modelo que tiene la organización en la actualidad. El resultado se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Costo total de operación con el programa actual en la empresa

Cálculo del Costo Total, Set Up+Almacenamiento, Programa Modelo Actual, Cop												
Ref	MII a fabricar	Días de producción	Cambio horas	Set Up Mec (Cop)	Tipo de Scrap	Costo Scrap (Cop)	Millares x Estibas	Estibas	Ubicaciones x 2.4m	Costo Almacene (Cop)	Costo Almacenamiento (Cop)	% Cubrimiento de la demanda
2	923	1.6	3.0	\$ 45,000	1	\$ 290,654	8	123	25	\$37,500,000	\$ 40,650	151.6%
7	1,095	1.9	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	8	146	30	\$45,000,000	\$ 41,115	180.9%
8	900	1.5	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	8	120	24	\$36,000,000	\$ 40,000	178.2%
3	420	0.7	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	8	56	12	\$ 18,000,000	\$ 42,857	138.5%
12	45	0.1	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	6	8	2	\$ 3,000,000	\$ 66,667	34.2%
5	270	0.6	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	6	49	10	\$ 15,000,000	\$ 55,659	209.2%
4	231	0.5	1.0	\$ 15,000	3	\$ 310,038	6	39	8	\$ 12,000,000	\$ 51,948	48.3%
4	500	1.1	0.0	\$ -	0	\$ -	6	83	17	\$25,500,000	\$ 51,000	104.4%
22	149	0.3	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	6	27	6	\$ 9,000,000	\$ 60,606	174.8%
10	306	0.7	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	6	56	12	\$ 18,000,000	\$ 58,824	235.2%
13	65	0.1	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	6	12	3	\$ 4,500,000	\$ 69,231	82.9%
14	70	0.3	1.0	\$ 15,000	7	\$ 355,377	4	18	4	\$ 6,000,000	\$ 85,714	125.3%
17	100	0.6	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	3	33	7	\$ 10,500,000	\$ 105,000	193.3%
6	90	0.3	2.0	\$ 30,000	8	\$ 774,709	3	30	6	\$ 9,000,000	\$ 100,000	50.5%
15	40	0.1	2.0	\$ 30,000	1	\$ 290,654	3	13	3	\$ 4,500,000	\$ 112,500	136.8%
16	50	0.2	1.0	\$ 15,000	3	\$ 310,038	3	17	4	\$ 6,000,000	\$ 120,000	54.7%
32	115	0.3	3.0	\$ 45,000	7	\$ 355,377	5	24	5	\$ 7,500,000	\$ 65,104	81.2%
33	425	1.1	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	7	59	12	\$ 18,000,000	\$ 42,373	204.4%
34	14	0.0	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	7	2	1	\$ 1,500,000	\$ 104,167	6.9%
30	91	0.6	3.0	\$ 45,000	5	\$ 337,134	2	38	8	\$ 12,000,000	\$ 131,579	178.8%
31	48	0.3	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	2	20	4	\$ 6,000,000	\$ 125,000	218.2%
12	164	0.4	3.0	\$ 45,000	7	\$ 355,377	6	30	6	\$ 9,000,000	\$ 55,046	124.4%
11	104	0.2	1.0	\$ 15,000	0	\$ -	6	17	4	\$ 6,000,000	\$ 57,971	122.6%
8	300	0.5	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	8	40	8	\$ 12,000,000	\$ 40,000	59.4%
20	135	0.2	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	5	27	6	\$ 9,000,000	\$ 66,667	44.4%
6	65	0.2	3.0	\$ 45,000	3	\$ 310,038	3	22	5	\$ 7,500,000	\$ 115,385	36.5%
21	51	0.2	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	3	17	4	\$ 6,000,000	\$ 117,647	78.5%
15	32	0.1	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	3	11	3	\$ 4,500,000	\$ 140,625	109.4%
28	300	1.6	3.0	\$ 45,000	3	\$ 310,038	2	125	25	\$37,500,000	\$ 125,000	91.5%
28	173	0.9	0.0	\$ -	0	\$ -	2	72	15	\$22,500,000	\$ 130,208	52.7%
29	86	0.5	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	2	36	8	\$ 12,000,000	\$ 138,889	217.1%
2	608	1.0	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	8	81	17	\$25,500,000	\$ 41,975	99.8%
7	690	1.2	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	8	92	19	\$28,500,000	\$ 41,304	114.0%
9	135	0.2	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	8	18	4	\$ 6,000,000	\$ 44,444	53.6%
26	98	0.6	3.0	\$ 45,000	7	\$ 355,377	2	41	9	\$ 13,500,000	\$ 137,195	112.9%
27	173	1.1	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	2	86	18	\$27,000,000	\$ 156,250	127.1%
24	216	0.5	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	7	30	6	\$ 9,000,000	\$ 41,667	73.9%
23	346	0.8	0.0	\$ -	5	\$ 337,134	7	48	10	\$ 15,000,000	\$ 43,403	112.2%
25	83	0.3	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	6	13	3	\$ 4,500,000	\$ 54,087	60.8%
1	4,000	3.7	3.0	\$ 45,000	0	\$ -	19	216	44	\$66,000,000	\$ 16,500	90.4%
18	368	0.4	2.0	\$ 30,000	0	\$ -	18	21	5	\$ 7,500,000	\$ 20,408	87.0%
19	210	0.2	1.0	\$ 15,000	1	\$ 290,654	18	12	3	\$ 4,500,000	\$ 21,429	170.4%
		<b>28.2</b>	<b>81.0</b>	<b>\$ 1,215,000</b>		<b>\$ 7,017,172</b>					<b>\$ 3,176,092</b>	<b>23</b>
				<b>Total Actual Cop</b>								
				<b>\$ 11,408,264</b>								

Fuente: datos adquiridos por el investigador

## **5. Solución propuesta empleando el modelo ELSP**

Una vez se ha conseguido cuantificar el costo implícito que tiene la ejecución actual del plan de producción, se procede a establecer uno de los modelos del ELSP que han sido desarrollados por otros autores e investigados en este trabajo, con todas sus posibles variaciones, para ser aplicado a las variables de la situación actual y así avanzar dentro del objetivo de la investigación que buscaba precisamente evaluar si era posible mejorar de forma técnica o matemática el proceso de planeación de la producción, visto desde la garantía de satisfacer la demanda pero conservando la directriz de optimización de costos que enmarca la operación de la compañía.

### **5.1. Metodología propuesta de análisis y resolución**

Antes de aplicar el modelo, es importante explicar la metodología empleada para la resolución formal del problema y así aportar a la consecución del objetivo de esta investigación. La Figura 6 muestra de forma gráfica la metodología utilizada para el desarrollo de todo el proyecto hasta llegar a los resultados y conclusiones expuestos en la parte final del presente documento. A continuación se explican las etapas ejecutadas:

- Como primera medida se investiga en detalle de qué forma se estructuran los planes de producción en la empresa con el objetivo principal de establecer las posible causa raíz que han llevado a tener casos de no cubrimiento de la demanda. De otro lado, se enmarcó la necesidad del proyecto dentro de la dirección estratégica de la organización, esto buscado conectar la responsabilidad que tiene la Gerencia de Operaciones de estar buscando oportunidades de mejora al interior de las empresas, con el fin de mejorar los procesos y aumentar la rentabilidad del negocio, pero siempre con un soporte técnico que avale las decisiones a tomar.

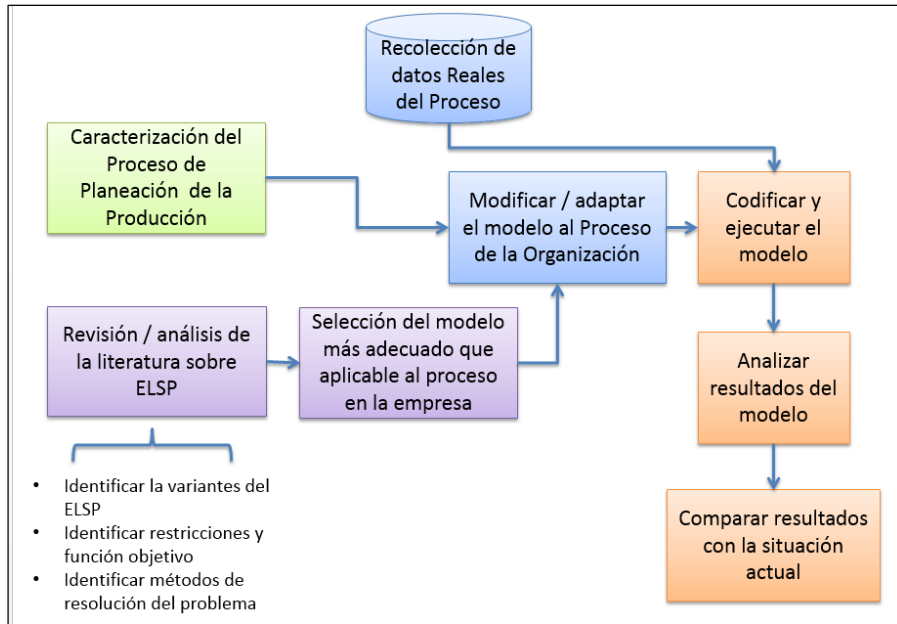


Figura 6. Esquema de trabajo del proyecto de investigación

- De forma paralela, se da el proceso de revisión de la literatura disponible para el ELSP teniendo como foco central de consulta los modelos que hubieran sido desarrollados alrededor de la operación de una línea de producción de bienes de consumo con una demanda determinística con características de estacionalidades definitivamente marcadas, donde se fabriquen referencias estándar. Todo lo anterior estableció claramente el alcance del modelo, entendiendo que es de forma académica una buena descripción de las características que definen el proceso productivo de la empresa de referencia.
- Una vez encontrado un modelo que tuviera muchas de las características de la operación bajo estudio, se decidió ajustarlo para que pudiera ser solucionado haciendo uso de LP Solve v5.2.2.0. Estos ajustes básicamente tienen que ver con garantizar la linealidad de las expresiones matemáticas del modelo (como se apreciará más adelante), pero manteniendo aspectos básicos del modelo matemático que pudieran hacer no válida su aplicación. Para esto se calculó externamente el tamaño de lote dejándolo como una entrada y no una variable del modelo, esto fue posible gracias a características básicas de las políticas de programación de la producción que permitieron trabajar en esta dirección.

- Luego de haber recolectado todos los elementos reales de la operación y habiendo decidido cuál sería la formulación con la cual se intentaría generar un plan de producción que pudiera ser comparado contra la ejecución actual del plan de producción, se procede a codificar y calcular el programa en 2 etapas. La primera con la herramienta Excel para determinar el tamaño del lote haciendo uso de las fórmulas desarrolladas para EOQ y la segunda estableciendo la secuencia de producción luego de haber definido la función objetivo y restricciones, y corriendo la formulación en LPSolve v5.5.2.0, hasta finalmente conseguir una secuencia de producción.
- Para concluir con el proceso, se procede a comparar la solución numérica obtenida para el costo del plan de producción, contra el costo que originalmente se había establecido para el programa de producción ejecutado en máquina, lo que permitió establecer las ventajas de definir un plan de producción usando un modelo matemático, pero adicional permitió identificar oportunidades de mejora dentro de la operación, cumpliendo con esto los objetivos trazados para el desarrollo de la presente investigación.

## 5.2. Modelo matemático implementado

De acuerdo con lo anterior, se decidió tomar como modelo de referencia la propuesta desarrollada para el análisis básico del ELSP de los autores Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010). Esto teniendo en cuenta que las variables, condiciones y supuestos por ellos usados, corresponden en gran medida con los elementos tenidos en cuenta en el Capítulo 4 de este documento para hallar el costo del plan de producción.

A continuación se presenta de forma detallada el modelo de referencia,

### - **Parámetros**

- N      Número de productos
- j      Orden de secuencia
- i      Número de producto

- $d_i$  Rata de demanda del producto  $i$  en unidades por día
- $p_i$  Rata de producción de la referencia  $i$  en unidades por día
- $h_i$  Costos de almacenamiento para el producto  $i$
- $cs_{jk}$  Costos de alistamiento para cambiar del producto  $j$  al producto  $k$
- $s_{jk}$  Tiempo de alistamiento para cambiar del producto  $j$  al producto  $k$

- **Variables**

- $t_c$  Tiempo de ciclo
- $t_j^s$  Momento de inicio (s, start) de producción del producto en la posición  $j$  de secuencia
- $t_j^e$  Momento de finalización (e, end) de producción del producto en la posición  $j$  de secuencia
- $q_j$  Tamaño de lote del producto ubicado en la posición  $j$  de la secuencia
- $t_j^p$  Tiempo de procesamiento del producto (p, producto) en la posición  $j$  de la secuencia.
- $M$  Un número grande

- **Condiciones y supuestos del modelo**

1. Sólo un ítem puede ser fabricado a la vez
2. No se permiten agotados
3. El proceso de ajuste para cada uno de los productos incurre tanto en un costo de alistamiento como en un tiempo de ajuste.
4. Estos valores de tiempo y costo son determinísticos y dependen de la secuencia en la cual se fabriquen los productos.
5. La rata de demanda  $d_i$  y la rata de producción  $p_i$  son conocidas y constantes para todos los ítem cumpliendo que  $d_i \leq p_i$ .
6. Toda la demanda debe ser satisfecha.
7. Los costos de almacenamiento  $h_i$  son determinísticos y constantes.
8. No se tienen en cuenta posibles fallas en la operación dentro del plan.

De acuerdo con Chatfield (2007), el costo por unidad de tiempo para fabricar el producto  $i$ , es de la siguiente forma



$C_i$  = Costos de set up + costos de almacenamiento

$$C_i = \sum_{j=1}^N \frac{d_i c s_{ij} z_{ij}}{q_i} + \frac{h_i (p_i - d_i) d_i q_i}{2 p_i} \quad (1)$$

El modelo es el siguiente:

- **Función Objetivo**

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c s_{ij} z_{ij} + \sum_{i=1}^N \frac{h_i (p_i - d_i) q_i^2}{2 p_i d_i} y_{ij} \quad (2)$$

- **Sujeto a:**

$$\sum_{j=1}^N y_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$q_j = \sum_{i=1}^N p_i (t_j^e - t_j^s) y_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$q_j \geq \sum_{i=1}^N d_i t_c y_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$t_j^s \geq \left( \sum_{i=1}^N s_{ij} z_{ij} + t_{j-1}^e \right) \quad \forall j = 2, \dots, N \quad (7)$$

$$t_1^s \geq \sum_{i=1}^N s_{i1} y_{i1} \quad (8)$$

$$t_n^e \leq t_c \quad (9)$$

$$z_{iu} \leq y_{il} \quad (10)$$

$$z_{iu} \leq y_{u,l+1} \quad (11)$$

$$z_{iu} \geq 1 - M(2 - y_{il} - y_{u,l+1}) \quad (12)$$

$$z_{iu} = \begin{cases} 1 & \text{si producto } u \text{ es fabricado después de producto } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (13)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si producto } i \text{ es fabricado en el orden de secuencia } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (14)$$

- Con la función objetivo (2) se minimizan los costos promedio de alistamiento (*setup*) y almacenamiento de los productos fabricados, esto como resultado de calcular el tamaño óptimo de corrida para cada una de las referencias así como la secuencia en la que deben ser programados dentro de la operación del centro de trabajo en el cual van a ser elaborados.

Cada una de las otras expresiones matemáticas, en orden, buscan lo siguiente,

- Las restricciones (3) y (4) aseguran que cada producto pueda ser asignado a una única ubicación y que cada ubicación en el plan tenga asociado un único producto.
- La restricción (5) indica que el tamaño de lote, la cantidad programada por producto, se debe fabricar dentro del tiempo de producción establecido
- La restricción (6) busca garantizar que el lote fabricado va a satisfacer la demanda durante el ciclo de producción.
- La restricción (7) asegura que el tiempo de inicio de producción debe ser mayor que el momento en el cual finaliza el producto anterior sumando el tiempo de alistamiento.
- La restricción (8) inicializa el ciclo de producción dando tiempo de alistamiento previo a que se inicie con el primer producto.
- La restricción (9) asegura que todos los productos sean fabricados durante cada ciclo de producción, de igual forma garantiza que la finalización de la última referencia se dé antes de que finalice el tiempo total establecido para el ciclo de producción.
- Las restricciones (10) a (12) dan la relación entre  $Z_{iu}$  y  $Y_{iu}$ , en resumen buscan asociar la posición de un producto  $i$  dentro de la secuencia del ciclo

de producción con el producto fabricado inmediatamente anterior a la referencia  $i$ , dando la posibilidad

- Finalmente, las expresiones (13) y (14) definen la naturaleza de las variables de decisión.

Hasta aquí queda definido el alcance del modelo, función objetivo y restricciones propuesto por los autores Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010), quienes en su investigación abordaron también el costo que puede tener el almacenamiento pero dependiente del tiempo, situación que no aplica para el alcance del estudio desarrollado.

Ahora bien, el problema ELSP presenta dos características que dificultan su resolución: (i) el problema es considerado NP-Hard (Chatfield, 2006), lo que quiere decir que a medida que el problema crece en tamaño, también se aumenta la dificultad para encontrar soluciones óptimas; y (ii) la función objetivo del modelo propuesto por Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010) es una expresión no lineal. A diferencia de la condición (i) que no representó problema para los datos recolectados de la empresa como se mostrará en la sección 5.2.2, atender la condición (ii) requirió hacer el cálculo previo del tamaño de lote.

Lo anterior se debe a la consideración que se utilizará LP Solve como herramienta de solución del modelo. El hecho de separar el cálculo de tamaño de lote  $q_j$  del establecimiento de la secuencia de producción, hace que las cantidades a fabricar para cada referencia se conviertan en una entrada del modelo, lo que sirve de alguna forma a que se dé una relajación y así poder llevar a que sea un modelo con expresiones lineales.

El plan de producción original real de la empresa que se tomó para la comparación con el modelo matemático, deja ver claramente el problema que dio origen a la investigación ya que muestra una deficiencia importante en el cubrimiento de la demanda, con el fin de garantizar este primer elemento como prioritario dentro del

plan a desarrollar, se decidió aislar el cálculo de las corridas del modelo de optimización para primero establecer tamaños de lote que llevaran a la empresa a cubrir la necesidad de los clientes y luego sí que el modelo entregara la forma más económica de hacerlo. Esto es posible teniendo en cuenta que la operación no arranca de cero y aunque en el primer mes de aplicación del modelo pueda existir alguna carencia por la secuencia que se obtenga que pueda dejar productos sin inventario algunos días, para el siguiente período la secuenciación y la forma cíclica de la operación van a llevar a no tener carencias en el cubrimiento de la demanda.

De acuerdo con esto, el problema se divide en las 2 siguientes etapas,

### **5.2.1. Cálculo de tamaño de lote (Lot Sizing)**

El cálculo de la cantidad a fabricar para cada referencia depende básicamente de la demanda  $d_i$  de cada referencia a fabricar, la capacidad de producción para cada producto  $i$  que, en este caso visto desde la planta de producción y teniendo en cuenta que la operación es “make to stock”, la demanda no va a ser directamente de los clientes sino la necesidad de re-abastecimiento al inventario de la bodega cubriendo las carencias que se tenga para garantizar la entrega en tiempo cero del producto al mercado, situación que de forma inevitable lleva a que se generen gastos de almacenamiento Pinedo (2005).

Considerando ya de manera directa el escenario propuesto para esta investigación, se tiene una variedad de ítems a ser fabricados en una sola máquina, para los cuales se conoce no sólo la demanda y la capacidad de producción, sino que también se tiene debidamente establecido los costos de *set up* y almacenamiento, los cuales dependen directamente del orden en el que se fabriquen y de la cantidad fabricada a ser llevada a bodega.

Ahora bien, con base en la propuesta de calcular de forma preliminar el tamaño de lote, que luego será tomado como entrada para el problema de secuenciación, se

decide usar para este cálculo el desarrollo propuesto por Pinedo (2005), donde en el capítulo 7, numeral 7.3 Different Types of Items and Rotation Schedules (Productos de diferente tipo con programación rotativa) el autor determina el mejor ciclo de producción para la fabricación de diferentes ítems en un único centro de trabajo y donde cada uno será fabricado sólo una vez dentro de cada ciclo de producción, quedando sólo una variable de decisión para el problema y es la longitud de ciclo  $x$ .

El uso de este modelo obedece principalmente a que se considera que los siguientes elementos expuestos por el autor se ajustan al tipo de operación que se espera poder optimizar:

- Inicialmente el concepto de dependencia de la secuencia puede ser omitido debido a que el plan de producción que se quiere desarrollar no parte de cero sino busca, de alguna manera, dar continuidad al proceso de producción que viene en operación. Lo anterior implica que el cálculo del lote puede asumir que todas las referencias podrían ser la primera en ser fabricada, pero de manera estricta se pudo evidenciar que el empalme entre períodos siempre cumple condiciones de un set up básico, que va a tener el mismo costo para todos los productos, de esta forma, se cumple con la primera condición para poder aplicar la fórmula de costo total.
- Por otro lado, como el objetivo es fabricar una cantidad que demanda internamente la bodega de producto terminado buscando suplir una demanda externa histórica promedio, se pudo establecer que la cantidad que está en carencia es lo que se despachó en el período inmediatamente anterior teniendo en cuenta que se supone haber tenido cubierta la cantidad promedio de venta durante el período precedente. Dicho esto, el inventario para la necesidad inmediata se puede asumir como que se encuentra en cero, de tal manera que se puede aplicar la siguiente expresión para el inventario promedio correspondiente a la cantidad que se está fabricando y que va a servir de base para el cálculo del costo de almacenamiento.

$$\frac{1}{2} \left( d_i x - \frac{d_i^2 x}{p_i} \right)$$

Es importante mencionar que el modelo aplica de igual forma para el análisis debido a que sólo se va a tener en cuenta este costo parcial dentro del cálculo del modelo, entendiendo que el producto que se encuentra en inventario ya causó su gasto por este rubro a medida que fue fabricado en períodos anteriores

El autor procede más adelante a desarrollar la fórmula para el costo total de la corrida sumando para cada referencia el total generado por el *set up* de inicio de corrida y por el almacenamiento del producto que se fabrica, llegando a la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{2} h_i \left( d_i x - \frac{d_i^2 x}{p_i} \right) + \frac{c s_i}{x} \right)$$

Tal como se estableció con anticipación, la variable X es la que va a ser calculada en función de los costos generados con la aplicación del plan de producción, por lo que se aplica una derivada a la fórmula anterior con el objetivo de encontrar su valor óptimo, llegando a la siguiente expresión que calcula la longitud óptima de ciclo,

$$x = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \frac{h_i d_i (p_i - d_i)}{2 p_i} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n c s_i}$$

Para mayor comprensión del paso a paso del EOQ que llevó a la formulación utilizada, el lector puede consultar el capítulo 7, sección 7.3 de Pinedo (2005).

Haciendo uso de la herramienta de cálculo Excel, y tomando los datos contenidos en las tablas incluidas en el Capítulo 4 correspondientes a la demanda  $d_i$ , el costo de

almacenamiento  $h_i$ ,  $p_i$  con la velocidad de producción para cada producto y  $cs_i$ , que es el costo de *set up* por producto, que ya antes se estableció que para este procedimiento sería un mismo valor para todas las referencias, en este caso de COP \$45,000 por producto. La siguiente tabla consolida toda la información y entrega el valor final para  $X$ , quedando hasta este punto del proceso, el establecimiento de la corrida óptima bajo el tipo de ciclo común, que corresponde a una de las principales y más comunes variantes para el ELSP (Vidal & García, 2006):

$$x = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i d_i (p_i - d_i)}{2p_i}\right)^{-1} \sum_{i=1}^n cs_i}$$

$$x = 0.211$$

Una vez se ha establecido la constante de período básico para el grupo de productos a fabricar, que en este caso corresponde a 1 mes, se establece la proporción de tiempo que cada producto toma en máquina al fabricar la cantidad necesaria para cubrir la demanda, este valor se calcula usando los valores de demanda  $d_i$  y la capacidad de producción  $p_i$  aplicando la siguiente fórmula, Pinedo (2005)

$$l_i = \frac{d_i x}{p_i}$$

Más adelante, haciendo uso de este valor de proporción del período que toma cada producto para ser fabricado, se establecen los días que va a tomar en máquina cada referencia,  $g_i$ ,

$$g_i = \frac{30 \cdot l_i}{x}$$

Finalmente las unidades o **tamaño definitivo de lote** para cada producto,  $q_i$  se obtiene de la siguiente forma,

$$q_i = \frac{g_i \cdot p_i}{30}$$

Tabla 6. Resultados para la cantidad económica

Prd (i)	$d_i$	$p_i$	$h_i$	$CS_{ji}$	$d_i x$	$g_i$	$q_i$
1	147,560	750,000	81	45,000	31,195	5.90	148,486
2	20,289	408,000	200	45,000	4,289	1.49	20,416
3	10,108	408,000	200	45,000	2,137	0.74	10,172
4	15,958	306,000	250	45,000	3,374	1.56	16,059
5	4,295	306,000	273	45,000	908	0.42	4,322
6	5,944	200,000	500	45,000	1,257	0.89	5,981
7	20,167	408,000	200	45,000	4,263	1.48	20,294
8	16,838	408,000	200	45,000	3,560	1.24	16,943
9	8,393	408,000	200	45,000	1,774	0.62	8,446
10	4,337	306,000	273	45,000	917	0.43	4,364
11	2,814	306,000	250	45,000	595	0.28	2,832
12	4,382	306,000	273	45,000	926	0.43	4,409
13	2,613	306,000	273	45,000	552	0.26	2,629
14	1,863	180,000	375	45,000	394	0.31	1,874
15	975	200,000	500	45,000	206	0.15	981
16	3,048	200,000	500	45,000	644	0.46	3,067
17	1,673	120,000	500	45,000	354	0.42	1,683
18	14,080	660,000	86	45,000	2,977	0.64	14,168
19	4,108	660,000	86	45,000	868	0.19	4,134
20	10,138	408,000	300	45,000	2,143	0.75	10,202
21	2,166	176,000	500	45,000	458	0.37	2,180
22	2,833	297,000	273	45,000	599	0.29	2,850
23	10,266	300,000	208	45,000	2,170	1.03	10,331
24	9,743	300,000	208	45,000	2,060	0.97	9,804
25	4,560	180,000	234	45,000	964	0.76	4,588
26	2,904	108,000	625	45,000	614	0.81	2,922
27	4,532	108,000	750	45,000	958	1.26	4,560
28	10,927	128,000	625	45,000	2,310	2.56	10,996
29	1,327	120,000	625	45,000	281	0.33	1,335
30	1,700	100,000	625	45,000	359	0.51	1,711
31	733	100,000	625	45,000	155	0.22	738
32	4,726	270,000	313	45,000	999	0.53	4,756
33	6,928	270,000	208	45,000	1,465	0.77	6,971
34	6,927.71	270,000.00	208.33	45,000.00	1,464.55	0.77	6,971

### 5.2.2. Cálculo de la secuencia de planeación de la producción (Scheduling)

Una vez se ha logrado establecer el tamaño de lote para cada producto, se retoma para ser usado como referencia el modelo Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010) que se detalla en las páginas 28, 29 y 30 del presente documento, y se procede a incluir toda la información en LpSolve para tratar de calcular con el uso de esta herramienta una solución y entrar a comparar el costo obtenido contra el calculado para el programa actual.



Es importante mencionar que al calcular el tamaño de los lotes para los productos usando el desarrollo de Pinedo (2005) aplicado en el numeral anterior, se omiten las restricciones 5 y 6 del modelo Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010) que de manera puntual asignaban para cada producto  $i$  un tamaño de lote que garantizara su fabricación dentro del ciclo establecido pero que adicional cubriera la demanda para el período, ambas situaciones ya contempladas y garantizadas con la formulación utilizada en el punto anterior y cuyo resultado se convierte entonces en una entrada para el modelo Mokhlesian, Fatemi Ghomi, & Jolai (2010) que ahora con esta variación, fue ajustado para ser aplicado a la operación de la empresa. La no aplicación de las restricciones arriba citadas, implica que el modelo tampoco va a hacer uso de las siguientes variables, que de manera específica establecían por tiempo el momento de inicio y finalización del tamaño de lote calculado,

- $t_c$  Tiempo de ciclo
- $t_j^s$  Momento de inicio (s, start) de producción del producto en la posición  $j$  de secuencia
- $t_j^e$  Momento de finalización (e, end) de producción del producto en la posición  $j$  de secuencia
- $q_j$  Tamaño de lote del producto ubicado en la posición  $j$  de la secuencia
- $t_j^p$  Tiempo de procesamiento del producto (p, producto) en la posición  $j$  de la secuencia.

El siguiente fue el programa compilado en el software de cálculo,

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP\_34\_Final\_mod

File Edit Search Action View Options Help

Source Matrix Options Result

```

1 set I;
2 set J;
3 set K;
4 set L;
5 param n;
6
7 param D {i in I}; /*conjunto de demandas x producto x dia*/
8 param P {i in I}; /*conjunto de velocidades de producción unidades x dia*/
9 param H {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
10 param Q {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
11 param CSij {i in I,j in J}; /*conjunto de costo de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
12 param Sij {i in I,j in J}; /*conjunto de tiempos de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
13 param Tc; /*Duración del ciclo básico de producción entre corridas de un producto*/
14
15 var Zij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
16 var Yij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
17 var Ziu {i in I,u in I} binary; /*asigna 1 si u se fabrica despues de I, 0 en caso contrario*/
18 var Tjs "sec"{j in J};
19 var Tje "sec"{j in J};
20
21
22 minimize costototal: sum{i in I,j in J}(CSij[i,j]*Zij[i,j])+
23                 sum{i in I, j in J}((H[i]*(P[i]-D[i])*(Q[i]*Q[i]))*Yij[i,j]/(2*P[i]*D[i]));
24
25 s.t. unicaposicion {j in J}:sum{i in I} Yij[i,j]=1;
26 s.t. unicaposicion {i in I}:sum{j in J} Yij[i,j]=1;
27 /*s.t. Loteentempodado{ j in J}:Q[j]=sum{I in I}P[i]*(Tje[j]-tjs[j])*Yij[i,j];*/
28 /*s.t. cubredemanda{j in J}:Q[j]>=sum{i in I}D[i]*To*Yij[I,j];*/
29
30 s.t. tiempoinicio {k in K, j in J}:Tjs[k]>=sum{i in I}(Sij[i,j]*Zij[i,j])+Tje[k-1];
31 s.t. iniciociclo {j in J}:Tjs[1]>=sum{i in I}Sij[i,1]*Yij[i,1];
32 s.t. finultimo{i in I}:Tje[n]<=Tc;
33 s.t. consec {i in I, u in I, 1 in J}:Ziu[i,u]<=Yij[i,1];
34 s.t. con_sec_sig{i in I, u in I, 1 in L}:Ziu[i,u]<=Yij[u,1+1];
35 s.t. secsegura{i in I, u in I, 1 in L}:Ziu[i,u]>=1-40000000*(2-Yij[i,1]-Yij[u,1+1]);
36

```

Log Messages

```

MEMO: lp_solve version 5.5.2.0 for 32 bit OS, with 64 bit REAL variables.
In the total iteration count 1945, 1408 (72.4%) were bound flips.
There were 2 refactorizations, 0 triggered by time and 0 by density.
... on average 268.5 major pivots per refactorization.
The largest [LUSOL v2.2.1.0] fact(B) had 126730 NZ entries, 1.0x largest basis.
The maximum B&B level was 1, 0.0x MIP order, 1 at the optimal solution.
The constraint matrix inf-norm is 4e+007, with a dynamic range of 4e+007.
Time to load data was 2.448 seconds, presolve used 0.148 seconds,
... 5.923 seconds in simplex solver, in total 8.519 seconds.

```

22:23 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.02

Figura 7. Presentación del modelo en LpSolve

```

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP_34_Final_IMagenes word.mod
File Edit Search Action View Options Help
Source Matrix Options Result
37 data;
38 set I:= p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15 p16 p17 p18 p19 p20 p21 p22 p23 p24 p25 p26
39 p27 p28 p29 p30 p31 p32 p33 p34;
40 set J:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34;
41 set K:= 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34;
42 set L:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33;
43 param D:=
44 p1      147560.4 p2      20288.9 p3      10108.2 p4      15958.4 p5      4294.6
45 p6      5944.1 p7      20167.4 p8      11178.8 p9      8393.3 p10     4336.9
46 p11     2814.2 p12     4381.7 p13     2612.5 p14     1862.7 p15     974.7
47 p16     3047.9 p17     1672.9 p18     14080.0 p19     4108.2 p20     10138.3
48 p21     2166.0 p22     2832.5 p23     10266.1 p24     9742.9 p25     4559.9
49 p26     2904.0 p27     4531.6 p28     10927.0 p29     1326.9 p30     1700.4
50 p31     733.3 p32     4726.3 p33     6927.7 p34     6927.7;
51
52
53 param P:=
54 p1      750000.0 p2      408000.0 p3      408000.0 p4      306000.0
55 p5      306000.0 p6      200000.0 p7      408000.0 p8      408000.0
56 p9      408000.0 p10     306000.0 p11     306000.0 p12     306000.0
57 p13     306000.0 p14     180000.0 p15     200000.0 p16     200000.0
58 p17     120000.0 p18     660000.0 p19     660000.0 p20     408000.0
59 p21     176000.0 p22     297000.0 p23     300000.0 p24     300000.0
60 p25     180000.0 p26     108000.0 p27     108000.0 p28     128000.0
61 p29     120000.0 p30     100000.0 p31     100000.0 p32     270000.0
62 p33     270000.0 p34     270000.0;
63
64
65 param H:=
66 p1      81.1 p2      200.0 p3      200.0 p4      250.0 p5      272.7
67 p6      500.0 p7      200.0 p8      200.0 p9      200.0 p10     272.7
68 p11     250.0 p12     272.7 p13     272.7 p14     375.0 p15     500.0
69 p16     500.0 p17     500.0 p18     85.7 p19     85.7 p20     300.0
70 p21     500.0 p22     272.7 p23     208.3 p24     208.3 p25     234.4
71 p26     625.0 p27     750.0 p28     625.0 p29     625.0 p30     625.0
72 p31     625.0 p32     312.5 p33     208.3 p34     208.3;
73
74 param CSij:1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34:=
75
76 p1      0      45      355      45      355      45      45      355      400
77 45      355      355      400      820      355      400      820      30      385
78 355     45      45      45      382      45      45      382      45      45
79 45      400      45      45      382
80 p2      45      0      325      45      355      45      30      340      385
81 45      355      355      400      820      355      400      820      45      400
82 340     45      45      45      382      45      45      382      45      45
83 45      400      45      45      382
84 p3      336     306      0      336      45      336      321      30      385
85 336     45      45      400      820      45      400      820      336      400

```

1:39 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.04

Figura 8. Datos ingresados al modelo – parte 1

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP\_34\_Final\_IMagenes word.mod

File Edit Search Action View Options Help

Source Matrix Options Result

86	30	336	336	336	382	336	336	382	336	336
87	336	400	336	336	382					
88	p4	45	45	355	0	325	45	45	355	400
89	30	340	340	385	805	355	400	820	45	400
90	355	45	30	45	382	45	45	382	45	45
91	45	400	45	45	382					
92	p5	336	336	45	306	0	336	336	45	400
93	321	30	30	385	805	45	400	820	336	400
94	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336
95	336	400	336	336	382					
96	p6	45	45	355	45	355	0	45	355	400
97	45	355	355	400	820	340	385	805	45	400
98	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45
99	45	400	45	45	382					
100	p7	45	30	340	45	355	45	0	325	370
101	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400
102	340	45	45	45	382	45	45	382	45	45
103	45	400	45	45	382					
104	p8	336	321	30	336	45	336	306	0	370
105	336	45	45	400	820	45	400	820	336	400
106	30	336	336	336	382	336	336	382	336	336
107	336	400	336	336	382					
108	p9	336	321	340	336	355	336	306	325	0
109	336	355	355	45	820	355	45	820	336	45
110	340	336	336	336	382	336	336	382	336	336
111	336	45	336	336	382					
112	p10	45	45	355	30	340	45	45	355	400
113	0	325	325	370	790	355	400	820	45	400
114	355	45	30	45	382	45	45	382	45	45
115	45	400	45	45	382					
116	p11	336	336	45	321	30	336	336	45	400
117	306	0	15	370	790	45	400	820	336	400
118	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336
119	336	400	336	336	382					
120	p12	336	336	45	321	30	336	336	45	400
121	306	15	0	370	790	45	400	820	336	400
122	45	336	321	336	382	336	336	382	336	336
123	336	400	336	336	382					
124	p13	336	336	355	321	340	336	336	355	45
125	306	325	325	0	790	355	45	820	336	45
126	355	336	321	336	382	336	336	382	336	336
127	336	45	336	336	382					
128	p14	336	336	355	321	340	336	336	355	45
129	306	325	325	15	0	355	45	45	336	45
130	355	336	321	336	382	336	336	382	336	336
131	336	45	336	336	382					
132	p15	336	336	45	336	45	321	336	45	400
133	336	45	45	400	820	0	370	790	336	400
134	45	321	336	336	382	336	336	382	336	336

1:39 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.04

Figura 9 Datos ingresados al modelo – parte 2

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP\_34\_Final\_Imágenes word.mod

File Edit Search Action View Options Help

Source Matrix Options Result

135	336	400	336	336	382					
136	p16	336	336	355	336	355	321	336	355	45
137	336	355	355	45	820	325	0	790	336	45
138	355	321	336	336	382	336	336	382	336	336
139	336	45	336	336	382					
140	p17	336	336	355	336	355	321	336	355	45
141	336	355	355	45	45	325	15	0	336	45
142	355	321	336	336	382	336	336	382	336	336
143	336	45	336	336	382					
144	p18	30	45	355	45	355	45	45	355	400
145	45	355	355	400	820	355	400	820	0	370
146	355	45	45	45	382	45	45	382	45	45
147	45	400	45	45	382					
148	p19	321	336	355	336	355	336	336	355	45
149	336	355	355	45	820	355	45	820	306	0
150	355	336	336	336	382	336	336	382	336	336
151	336	45	336	336	382					
152	p20	336	321	30	336	45	336	321	30	385
153	336	45	45	400	820	45	400	820	336	400
154	0	336	336	336	382	336	336	382	336	336
155	336	400	336	336	382					
156	p21	45	45	355	45	355	30	45	355	400
157	45	355	355	400	820	340	385	805	45	400
158	355	0	45	45	382	45	45	382	45	45
159	45	400	45	45	382					
160	p22	45	45	355	30	340	45	45	355	400
161	30	340	340	385	805	355	400	820	45	400
162	355	45	0	45	382	45	45	382	45	45
163	45	400	45	45	382					
164	p23	45	45	355	45	355	45	45	355	400
165	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400
166	355	45	45	0	352	45	45	382	45	45
167	45	400	45	45	382					
168	p24	336	336	355	336	355	336	336	355	400
169	336	355	355	400	820	355	400	820	336	400
170	355	336	336	306	0	336	336	45	336	336
171	336	400	336	336	45					
172	p25	45	45	355	45	355	45	45	355	400
173	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400
174	355	45	45	45	382	0	45	382	45	45
175	45	400	45	45	382					
176	p26	45	45	355	45	355	45	45	355	400
177	45	355	355	400	820	355	400	820	45	400
178	355	45	45	45	382	45	0	352	45	45
179	45	400	45	45	382					
180	p27	336	336	355	336	355	336	336	355	400
181	336	355	355	400	820	355	400	820	336	400
182	355	336	336	336	45	336	306	0	336	336
183	336	400	336	336	45					

9:117    ITE: 1944    IPS: 324    INV: 6    NOD: 0    TME: 6.04

Figura 10 Datos ingresados al modelo – parte 3

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP\_34\_Final\_Imágenes word.mod

File Edit Search Action View Options Help

Source Matrix Options Result

```

184 p28 45 45 355 45 355 45 45 355 400
185 45 355 355 400 820 355 400 820 45 400
186 355 45 45 45 382 45 45 382 0 30
187 45 400 45 45 382
188 p29 45 45 355 45 355 45 45 355 400
189 45 355 355 400 820 355 400 820 45 400
190 355 45 45 45 382 45 45 382 30 0
191 45 400 45 45 382
192 p30 45 45 355 45 355 45 45 355 400
193 45 355 355 400 820 355 400 820 45 400
194 355 45 45 45 382 45 45 382 45 45
195 0 370 45 45 382
196 p31 336 336 355 336 355 336 336 355 45
197 336 355 355 45 820 355 45 820 336 45
198 355 336 336 336 382 336 336 382 336 336
199 306 0 336 336 382
200 p32 45 45 355 45 355 45 45 355 400
201 45 355 355 400 820 355 400 820 45 400
202 355 45 45 45 382 45 45 382 45 45
203 45 400 0 45 382
204 p33 45 45 355 45 355 45 45 355 400
205 45 355 355 400 820 355 400 820 45 400
206 355 45 45 45 382 45 45 382 45 45
207 45 400 45 0 352
208 p34 336 336 355 336 355 336 336 355 400
209 336 355 355 400 820 355 400 820 336 400
210 355 336 336 336 45 336 336 45 336 336
211 336 400 336 306 0;
212
213 param sij:1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34:=
214
215 p1 0 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
216 3 3 3 3 3 2 2 3 3 3 3 3 3
217 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
218 p2 3 0 1 3 3 3 2 2 2 3 3 3 3
219 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3
220 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
221 p3 3 1 0 3 3 3 2 2 2 3 3 3 3
222 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3
223 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
224 p4 3 3 3 0 1 3 3 3 3 3 2 2 2
225 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3
226 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
227 p5 3 3 3 3 1 0 3 3 3 3 3 2 2 2
228 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3
229 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
230 p6 3 3 3 3 3 3 0 3 3 3 3 3 3
231 3 3 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3
232 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

```

15:161 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.04

Figura 11 Datos ingresados al modelo – parte 4

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP\_34\_Final\_IMagenes word.mod

File Edit Search Action View Options Help

Source Matrix Options Result

235	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			
236	p8	3	2	2	3	3	3	1	0	1	3	3	3
237	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3
238	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
239	p9	3	2	2	3	3	3	1	1	0	3	3	3
240	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3
241	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
242	p10	3	3	3	2	2	3	3	3	3	0	1	1
243	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
244	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
245	p11	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	0	1
246	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
247	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
248	p12	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	0
249	1	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
250	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
251	p13	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1
252	0	1	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
253	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
254	p14	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1
255	1	0	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
256	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
257	p15	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
258	3	3	0	1	1	3	3	3	2	3	3	3	3
259	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
260	p16	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
261	3	3	1	0	1	3	3	3	2	3	3	3	3
262	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
263	p17	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
264	3	3	1	1	0	3	3	3	2	3	3	3	3
265	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
266	p18	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
267	3	3	3	3	3	0	1	3	3	3	3	3	3
268	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
269	p19	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
270	3	3	3	3	3	1	0	3	3	3	3	3	3
271	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
272	p20	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3
273	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3
274	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
275	p21	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
276	3	3	2	2	2	3	3	3	0	3	3	3	3
277	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
278	p22	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2
279	2	2	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3
280	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
281	p23	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
282	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	1	3
283	3	3	3	3	3	3	3	3	3				

6:219 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.04

Figura 12 Datos ingresados al modelo – parte 5

```

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP_34_Final_IMágenes word.mod
File Edit Search Action View Options Help
Source Matrix Options Result
286 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
287 p25 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
288 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 0
289 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
290 p26 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
291 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
292 0 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
293 p27 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
294 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
295 1 0 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
296 p28 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
297 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
298 3 3 0 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3
299 p29 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
300 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
301 3 3 2 0 3 3 3 3 3 3 3 3 3
302 p30 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
303 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
304 3 3 3 3 0 1 3 3 3 3 3 3 3
305 p31 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
306 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
307 3 3 3 3 1 0 3 3 3 3 3 3 3
308 p32 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
309 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
310 3 3 3 3 3 3 0 3 3 3 3 3 3
311 p33 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
312 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
313 3 3 3 3 3 3 3 0 1 3 3 3 3
314 p34 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
315 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
316 3 3 3 3 3 3 3 1 0;
317
318
319 param Q:=
320 p1 31194.9 p2 4289.2 p3 2136.9 p4 3373.7 p5 907.9 p6 1256.6
321 p7 4263.5 p8 3559.5 p9 1774.4 p10 916.8 p11 594.9 p12 926.3
322 p13 552.3 p14 393.8 p15 206.1 p16 644.3 p17 353.7 p18 2976.6
323 p19 868.5 p20 2143.3 p21 457.9 p22 598.8 p23 2170.3 p24 2059.7
324 p25 964.0 p26 613.9 p27 958.0 p28 2310.0 p29 280.5 p30 359.5
325 p31 155.0 p32 999.2 p33 1464.5 p34 1464.5;
326
327 param Tc:= 30;
328 param n:=34;
329
330
331 end;
332
333
334
6:264 ITE: 1944 IPS: 324 INV: 6 NOD: 0 TME: 6.04

```

Figura 13 Datos ingresados al modelo – parte 6



Con el fin de determinar la viabilidad de que la herramienta escogida pudiera procesar y calcular una solución al modelo, se decide hacer una primera corrida aplicada sólo a las 5 primeras referencia del listado total de productos a fabricar en el centro de trabajo. El programa y resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Número de productos, 5
- Pantallas de compilación exitosa (ver Figura 14)



```

C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\LpSolveIDE.exe
set_XLI: Successfully loaded 'xli_MathProg'
Reading model section from C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\tmpfile...
Reading data section from C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\tmpfile...
72 lines were read
Generating costototal...
Generating unicaposicion...
Generating unicoproducto...
Generating tiempoinicio...
Generating iniciociclo...
Generating finultimo...
Generating consec...
Generating con_sec_sig...
Generating secsegura...
Model has been successfully generated

Model name: '' - run #1
Objective: Minimize(costototal)

SUBMITTED
Model size:      365 constraints,      80 variables,      950 non-zeros.
Sets:           0 GUB,                0 SOS.

Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2.
The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.

Relaxed solution      455331.787195 after      29 iter is B&B base.
Feasible solution    455331.787195 after      29 iter,      0 nodes (gap
0.0%)
Optimal solution     455331.787195 after      29 iter,      0 nodes (gap
0.0%).

Excellent numeric accuracy !!*!! = 0

MEMO: lp_solve version 5.5.2.0 for 32 bit OS, with 64 bit REAL variables.
In the total iteration count 29, 8 (27.6%) were bound flips.
There were 0 refactorizations, 0 triggered by time and 0 by density.
... on average 21.0 major pivots per refactorization.
The largest LUSOL v2.2.1.01 fact(B) had 366 NZ entries, 1.0x largest basi
s.
The maximum B&B level was 1, 0.0x MIP order, 1 at the optimal solution.
The constraint matrix inf-norm is 4e+007, with a dynamic range of 4e+007.
Time to load data was 0.048 seconds, presolve used 0.007 seconds,
... 0.013 seconds in simplex solver, in total 0.068 seconds.

```

Figura 14. Pantalla de compilación del modelo para 5 productos

- Pantalla de resultados (ver Figura 15)

The screenshot shows the LPSolve IDE interface. The top window displays the GAMS model code, and the bottom window shows the solver's output log.

```

1 set I;
2 set J;
3 set K;
4 set L;
5 param n;
6 param D {i in I}; /*conjunto de demandas x producto x dia*/
7 param P {i in I}; /*conjunto de velocidades de producción unidades x dia*/
8 param H {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
9 param Q {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
10 param CSij {i in I,j in J}; /*conjunto de costo de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
11 param Sij {i in I,j in J}; /*conjunto de tiempos de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
12 param Tc; /*Duración del ciclo básico de producción entre corridas de un producto*/
13 var Zij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
14 var Yij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
15 var Ziu {i in I,u in I} binary; /*asigna 1 si u se fabrica despues de I, 0 en caso contrario*/
16 var Tjs "sec"{j in J};
17 var Tje "sec"{j in J};
18
19 minimize costototal: sum{i in I,j in J}(CSij[i,j]*Zij[i,j])+
20                      sum{i in I, j in J}((H[i]*(P[i]-D[i])*(Q[i]*Q[i]))*Yij[i,j]/(2*P[i]*D[i]));
21
22 s.t. unicaposicion {j in J}:sum{i in I} Yij[i,j]=1;
23 s.t. unicoproducto {i in I}:sum{j in J} Yij[i,j]=1;
24 s.t. tiempoinicio {k in K, j in J}:Tjs[k]>=sum{i in I}(Sij[i,j]*Zij[i,j])+Tje[k-1];
25 s.t. iniciociclo {j in J}:Tjs[1]>=sum{i in I}Sij[i,1]*Yij[i,1];
26 s.t. finultimo{i in I}:Tje[n]<=Tc;
27 s.t. consec {i in I, u in I, l in J}:Ziu[i,u]<=Yij[i,1];
28 s.t. con_sec_sig{i in I, u in I, l in L}:Ziu[i,u]<=Yij[u,l+1];
29 s.t. secsegura{i in I, u in I, l in L}:Ziu[i,u]>=1-4000000*(2-Yij[i,1]-Yij[u,l+1]);

```

```

Log Messages
Model name: '' - run #1
Objective: Minimize(costototal)

SUBMITTED
Model size:      365 constraints,      80 variables,      950 non-zeros.
Sets:           0 GUB,                0 SOS.

Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2.
The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.

Relaxed solution      455331.787195 after      29 iter is B&B base.

Feasible solution     455331.787195 after      29 iter,          0 nodes (gap 0.0%)

Optimal solution      455331.787195 after      29 iter,          0 nodes (gap 0.0%).
Excellent numeric accuracy ||*|| = 0

```

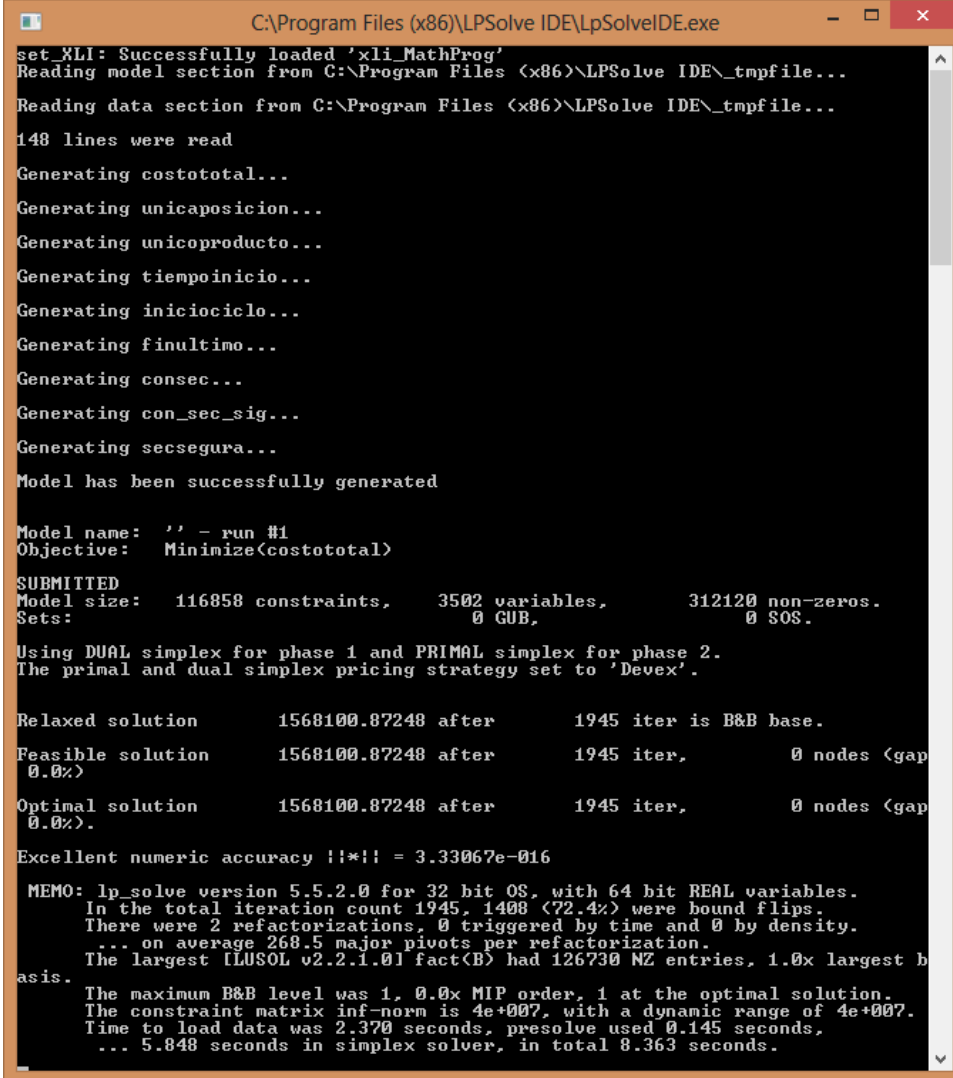
22:20    ITE: 28    INV: 2    NOD: 0    TME: 0.01

Figura 15. Pantalla de resultados para 5 productos

Todos estos resultados obtenidos permitieron evidenciar que el modelo escogido y el software de cálculo se ajustan entre sí para poder proceder a encontrar una nueva posibilidad para el desarrollo del plan de producción en la empresa.

Más adelante se establece ir aumentando de manera gradual el número de referencias para ser llevadas al programa y seguir evaluando el encontrar una solución factible al problema, de esta manera se podría tener claridad el momento en que la herramienta de cálculo ya no fuera lo suficientemente robusta para procesar toda la información, debido a la complejidad computacional del problema. El modelo logró correr con los 34 productos que conforman el plan de producción inicial del centro de trabajo escogido para el estudio, obteniendo los siguientes resultados:

- Número de productos: 34, total del plan de producción para un mes.
- Pantallas de compilación exitosa (ver Figura 16)



```

C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\LpSolveIDE.exe
set_XLI: Successfully loaded 'xli_MathProg'
Reading model section from C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\_tmpfile...
Reading data section from C:\Program Files (x86)\LPSolve IDE\_tmpfile...
148 lines were read
Generating costototal...
Generating unicaposicion...
Generating unicoproducto...
Generating tiempoinicio...
Generating iniciociclo...
Generating finultimo...
Generating consec...
Generating con_sec_sig...
Generating secsegura...
Model has been successfully generated

Model name: '' - run #1
Objective: Minimize(costototal)

SUBMITTED
Model size: 116858 constraints, 3502 variables, 312120 non-zeros.
Sets: 0 GUB, 0 SOS.

Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2.
The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.

Relaxed solution 1568100.87248 after 1945 iter is B&B base.
Feasible solution 1568100.87248 after 1945 iter, 0 nodes (gap 0.0%)
Optimal solution 1568100.87248 after 1945 iter, 0 nodes (gap 0.0%).

Excellent numeric accuracy !!*!! = 3.33067e-016

MEMO: lp_solve version 5.5.2.0 for 32 bit OS, with 64 bit REAL variables.
In the total iteration count 1945, 1408 (72.4%) were bound flips.
There were 2 refactorizations, 0 triggered by time and 0 by density.
... on average 268.5 major pivots per refactorization.
The largest [LUSOL v2.2.1.0] fact(B) had 126730 NZ entries, 1.0x largest b
asis.
The maximum B&B level was 1, 0.0x MIP order, 1 at the optimal solution.
The constraint matrix inf-norm is 4e+007, with a dynamic range of 4e+007.
Time to load data was 2.370 seconds, presolve used 0.145 seconds,
... 5.848 seconds in simplex solver, in total 8.363 seconds.

```

Figura 16. Pantalla de compilación del modelo para los 34 productos

- Pantallas de resultados (ver Figura 17)

The screenshot shows the LPSolve IDE window with the following content:

```

LPSolve IDE - 5.5.2.0 - J:\Juan David Carrillo\JDC\Info Técnica\Familia\Maestría\Tesis\ELSP\Finales\ELSP_34_Final_mod
File Edit Search Action View Options Help
Source Matrix Options Result

1 set I;
2 set J;
3 set K;
4 set L;
5 param n;
6 param D {i in I}; /*conjunto de demandas x producto x dia*/
7 param P {i in I}; /*conjunto de velocidades de producción unidades x dia*/
8 param H {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
9 param Q {i in I}; /*conjunto de costo de almacenamiento, cop/millar*/
10 param CSij {i in I,j in J}; /*conjunto de costo de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
11 param Sij {i in I,j in J}; /*conjunto de tiempos de setup para cambiar de un producto j a un producto k*/
12 param Tc; /*Duración del ciclo básico de producción entre corridas de un producto*/
13 var Zij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
14 var Yij {i in I,j in J} binary; /*asigna 1 si i se fabrica en la posición j, 0 en caso contrario*/
15 var Ziu {i in I,u in I} binary; /*asigna 1 si u se fabrica despues de I, 0 en caso contrario*/
16 var Tjs "sec"{j in J};
17 var Tje "sec"{j in J};
18
19 minimize costototal: sum{i in I,j in J}(CSij[i,j]*Zij[i,j])+
20                          sum{i in I, j in J}((H[i]*(P[i]-D[i])*(Q[i]*Q[i]))*Yij[i,j]/(2*P[i]*D[i]));
21
22 s.t. unicaposicion {j in J}:sum{i in I} Yij[i,j]=1;
23 s.t. unicoproducto {i in I}:sum{j in J} Yij[i,j]=1;
24 s.t. tiempoinicio {k in K, j in J}:Tjs[k]>=sum{i in I}(Sij[i,j]*Zij[i,j])+Tje[k-1];
25 s.t. iniciociclo {j in J}:Tjs[1]>=sum{i in I}Sij[i,1]*Yij[i,1];
26 s.t. finultimo{i in I}:Tje[n]<=Tc;
27 s.t. consec {i in I, u in I, l in J}:Ziu[i,u]<=Yij[i,l];
28 s.t. con_sec_sig{i in I, u in I, l in L}:Ziu[i,u]<=Yij[u,l+1];
29 s.t. secsegura{i in I, u in I, l in L}:Ziu[i,u]>=1-4000000*(2-Yij[i,l]-Yij[u,l+1]);
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

```

The Log window shows the following output:

```

Log Messages
Model name: '' - run #1
Objective: Minimize(costototal)

SUBMITTED
Model size: 116858 constraints, 3502 variables, 312120 non-zeros.
Sets: 0 GUB, 0 SOS.

Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2.
The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.

Relaxed solution 1568100.87248 after 1945 iter is B&B base.

Feasible solution 1568100.87248 after 1945 iter, 0 nodes (gap 0.0%)

Optimal solution 1568100.87248 after 1945 iter, 0 nodes (gap 0.0%).
Excellent numeric accuracy ||*|| = 3.33067e-016

MEMO: lp solve version 5.5.2.0 for 32 bit OS, with 64 bit REAL variables.

```

At the bottom of the window, the following statistics are displayed:

```

29:21 ITE: 1944 IPS: 194 INV: 6 NOD: 0 TME: 9.95

```

Figura 17. Pantalla de resultados para los 34 productos

## 6. Resultados y análisis

A continuación se presenta de forma consolidada los resultados numéricos obtenidos a través de todo el proceso de investigación,

- Tabla de posición asignada ( $j$ ) a cada producto ( $i$ ) dada por el modelo,

Yij[i,j]	Posición (j)																																				
Producto(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34			
1																												1									
2																																	1				
3																																					
4																																					
5																											1										
6																												1									
7																													1								
8																																					
9																																					
10																																					
11																																					
12																																					
13																																					
14																																					
15																																					
16																																					
17																																					
18																																					
19																																					
20																																					
21																																					
22																																					
23																																					
24																																					
25																																					
26																																					
27																																					
28																																					
29																																					
30																																					
31																																					
32																																					
33																																					
34																																					

Figura 18. Posiciones en el programa de producción obtenidas con el modelo propuesto

- Con base en el tamaño de lote calculado y este orden de producción generado por el modelo, se procede a ordenar el plan de producción y a hacer el cálculo final del programa bajo los mismos parámetros de cálculo y siguiendo la misma estructura aplicada, en el punto 4 de este documento, al tipo de plan de producción que actualmente es usado en la organización, obteniendo el siguiente resultado,

Tabla 8. Costos de producción calculados a partir de la secuencia obtenida con el modelo propuesto

Cálculo del Costo Total, Set Up+Almacenamiento, Programa Modelo Generado en ELSP, Cop													
Pos	# Prd	Mil a fabricar	Dias de producción	Cambio horas	Set Up Mec (Cop)	Tipo de Scrap	Costo Scrap (Cop)	Millares x Estiba	Estibas	Ubicaciones x 2.4m	Costo Almace (Cop)	Costo Almacenamiento Prd Cop	% Cubrimiento de la demanda
1	32	143	0.5	3.0	45,000	0	0	19	8	2	3,000,000	21,026	100.6%
2	27	137	1.3	3.0	45,000	1	290,654	8	18	4	6,000,000	43,859	100.6%
3	25	138	0.8	3.0	45,000	5	337,134	8	18	4	6,000,000	43,588	100.6%
4	30	51	0.5	3.0	45,000	0	0	6	9	2	3,000,000	58,443	100.6%
5	33	209	0.8	3.0	45,000	0	0	6	38	8	12,000,000	57,379	100.6%
6	34	209	0.8	1.0	15,000	1	290,654	3	70	14	21,000,000	100,414	100.6%
7	26	88	0.8	3.0	45,000	5	337,134	8	12	3	4,500,000	51,331	100.6%
8	24	294	1.0	3.0	45,000	1	290,654	8	39	8	12,000,000	40,800	100.6%
9	23	310	1.0	1.0	15,000	5	337,134	8	41	9	13,500,000	43,560	100.6%
10	22	86	0.3	3.0	45,000	0	0	6	16	4	6,000,000	70,169	100.6%
11	21	65	0.4	3.0	45,000	0	0	6	11	3	4,500,000	68,822	100.6%
12	28	330	2.6	3.0	45,000	0	0	6	60	12	18,000,000	54,568	100.6%
13	17	51	0.4	3.0	45,000	1	290,654	6	9	2	3,000,000	59,403	100.6%
14	20	306	0.7	3.0	45,000	8	774,709	4	77	16	24,000,000	78,417	100.6%
15	29	40	0.3	3.0	45,000	3	310,038	3	13	3	4,500,000	112,343	100.6%
16	14	56	0.3	3.0	45,000	1	290,654	3	19	4	6,000,000	106,704	100.6%
17	16	92	0.5	3.0	45,000	0	0	3	31	7	10,500,000	114,117	100.6%
18	12	132	0.4	3.0	45,000	7	355,377	18	8	2	3,000,000	22,680	100.6%
19	9	253	0.6	3.0	45,000	1	290,654	18	14	3	4,500,000	17,760	100.6%
20	10	131	0.4	3.0	45,000	7	355,377	5	26	6	9,000,000	68,743	100.6%
21	8	508	1.2	3.0	45,000	1	290,654	3	169	34	51,000,000	100,336	100.6%
22	31	22	0.2	3.0	45,000	1	290,654	6	4	1	1,500,000	67,757	100.6%
23	15	29	0.1	3.0	45,000	7	355,377	7	4	1	1,500,000	50,977	100.6%
24	18	425	0.6	3.0	45,000	3	310,038	7	59	12	18,000,000	42,348	100.6%
25	13	79	0.3	3.0	45,000	1	290,654	6	12	3	4,500,000	57,058	100.6%
26	5	130	0.4	2.0	30,000	7	355,377	2	54	11	16,500,000	127,270	100.6%
27	6	179	0.9	3.0	45,000	3	310,038	2	90	18	27,000,000	150,467	100.6%
28	1	4,455	5.9	3.0	45,000	0	0	2	1,856	372	558,000,000	125,264	100.6%
29	4	482	1.6	3.0	45,000	0	0	2	201	41	61,500,000	127,658	100.6%
30	3	305	0.7	3.0	45,000	1	290,654	2	127	26	39,000,000	127,807	100.6%
31	2	612	1.5	1.0	15,000	3	310,038	2	255	52	78,000,000	127,350	100.6%
32	7	609	1.5	2.0	30,000	0	0	5	127	26	39,000,000	64,059	100.6%
33	19	124	0.2	3.0	45,000	1	290,654	7	17	4	6,000,000	48,380	100.6%
34	11	85	0.3	3.0	45,000	7	355,377	7	12	3	4,500,000	52,969	100.6%
			30	94	1,410,000		8,000,336					2,503,824	
					Total Modelo Cop								
					11,914,161								

A partir de los resultados obtenidos, se pueden realizar los siguientes análisis:

- El programa original representa un costo de Cop \$11,408,264 y está compuesto por lo siguiente,

Cop \$1,215,000 (10.7% del total), correspondientes al costo de set up mecánico

Cop \$7,017,172 (61.5% del total), correspondientes al desperdicio generado y que depende de manera específica de la secuencia en la cual se fabrican los productos.

Cop \$3,176,092 (27.8% del total), correspondientes al costo que representa el almacenamiento del producto fabricado con el plan de producción.

- El programa generado a través del modelo representa un costo de Cop \$11,727,495 y está compuesto por lo siguiente,

- Cop \$1,410,000 (12% del total), correspondientes al costo de set up mecánico

- Cop \$8,000,336 (68% del total), correspondientes al desperdicio generado y que depende de manera específica de la secuencia en la cual se fabrican los productos.

- Cop \$2,317,159 (20% del total), correspondientes al costo que representa el almacenamiento del producto fabricado con el plan de producción.

- Los valores anteriores permiten observar lo siguiente:

- El programa generado por el modelo representa para la organización un incremento en el costo operacional del 2.8%, que corresponden a Cop \$319,231.

- De manera detallada, cada uno de los rubros que conforman este gasto presenta la siguiente variación con respecto al plan de producción inicial:

- El costo de hacer el setup, o cambio mecánico de la línea de producción, tiene un incremento del 16%, esto debido a que se hace más cambios completos que incluyen el molde y el color a diferencia del plan de referencia que tenía menos cambios completos y más cambios de cavidades entre referencias similares, este aumento corresponde a Cop \$195,000.

El scrap generado en el plan del modelo es un 14% más costoso que el generado con el programa base, representado en Cop \$983,164, esto de igual forma está ligado al incremento en el cambio completo de referencias y

de color mencionado en el punto anterior debido a que exige mayores ajustes de variables de proceso y actividades de descontaminación en el equipo de producción.

Finalmente, el costo de almacenamiento presenta una reducción del 27% al ser comparado contra el gasto que se acusa con el programa original, esto corresponde a un ahorro de Cop \$858,933.

- Surge en este momento un elemento adicional de análisis y es el cumplimiento de la demanda, en la tabla que consolida el costo que tiene correr el centro de trabajo bajo el esquema del programa de producción original se puede observar que solo 23 de las 34 referencias, 67.6% cumplen con la cantidad establecida por la demanda, de paso algunas superan ampliamente el valor de la necesidad inmediata reportada por el cliente de la planta de producción, que en este caso es la bodega. Caso contrario sucede con el plan generado por el modelo matemáticamente, en este se puede ver que todas las referencias superan la necesidad establecida por la demanda, pero en general casi de una forma muy estricta superándola por una pequeña cantidad, casi de seguridad, que en porcentaje es muy baja y que de manera directa explica por qué el costo de almacenamiento tiene una reducción importante en su costo cuando se calculan los lotes de producción usando el modelo desarrollado por Pinedo (2006) y no solo con base en el cálculo directo por promedio histórico de consumo.



## 7. Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones,

- Primeramente, vista desde el origen por la falta de cumplimiento con la demanda que llevaron al establecimiento de los objetivos trazados para la realización del presente estudio, se concluye que en efecto fue posible encontrar un modelo matemático que permite optimizar la forma de programar un centro de trabajo dentro del proceso de producción de la compañía que sirvió como referencia para el proyecto, de tal manera que hay una evidencia matemática que permite pensar en que se puede llegar a garantizar la satisfacción de la demanda, cumpliendo con esto el avanzar dentro de los caminos estratégicos de la organización que quiere consolidar su liderazgo en el mercado a través de la consolidación de los clientes a quienes no se les debe permitir el buscar nuevas opciones de suministro como una forma de suplir carencias generadas por la no entrega de producto en tiempo cero, que debe ser la principal característica de una compañía que tenga como modelo de producción el “make to stock”.
- Retomando el tema de la estrategia de negocio planeado por la empresa, se puede concluir también que, a pesar de haberse presentado un incremento neto en el costo de la operación correspondiente al 2.8%, lo que podría representar una posible afectación económica pero adicional una posible pérdida de eficiencia en la operación del equipo, se considera que por el contrario debe ser vista como una oportunidad de mejora, esto teniendo en cuenta que adicional al hecho de que el modelo permite atacar de manera directa una amenaza, como es la de repeler los ataques de la competencia al querer hacerse al mercado aprovechando deficiencias en las entregas cuando no se cumple con la demanda, que al ser un factor no controlado, puede hacer que se pierda mucho terreno frente a los clientes. En este caso, el estudio permite que al interior de la empresa se comience a trabajar para identificar algún tipo de debilidad u oportunidad de

mejora en la eficiencia de los procesos, que son elementos controlados y que al actuar sobre ellos se debería poder reducir o controlar el impacto que sobre el costo presenta la propuesta desarrollada, por ejemplo, usando metodologías tipo SMED (Single Minute Exchange of Die), que fue desarrollada con el objetivo de impactar de forma dramática los tiempos de ajuste de proceso entre trabajos dentro de un equipo de producción ([www.leanproduction.com/smed.html](http://www.leanproduction.com/smed.html)). Este punto debe tomarse como una recomendación arrojada por el estudio, donde se puede entender que buena parte de la competitividad que da la flexibilidad está soportada en poder hacer muchas referencias de manera oportuna, permitiendo hacer entregas con inmediatez sin impactar los costos de almacenamiento o el algún caso llegar a arriesgar la operación por tener limitaciones de espacio para producto por estar haciendo sobre stock, para esto se debe tener en la operación las actividades de cambio de referencia debidamente estandarizadas y con un sistema como este se debe poder obtener los siguientes beneficios:

- Bajos costos de manufactura, cambios más rápidos implican menos tiempos de parada de máquina.
- Lotes de producción más pequeños, cambios más rápidos y eficientes permite hacer más cambios en menos tiempo.
- Optimización en la respuesta a la demanda de los clientes, lotes más pequeños permiten tener una alta flexibilidad al momento de planear la producción.
- Bajos niveles de inventario, lotes pequeños implica inventarios más bajos con la correspondiente reducción de gato de almacenamiento y control de capital de trabajo parado.
- Optimización en los arranques de línea, la estandarización mejora la eficiencia de los ajustes y reduce la generación de material no conforme, scrap.

El último elemento citado en las mejoras que puede ofrecer un modelo SMED, toma mayor importancia en el caso usado como referencia al evidenciar que el desperdicio generado durante los procesos de cambio de referencia y ajuste de proceso,

representa más del 60% del gasto total, tanto en el programa original como en el que se pudo establecer con el modelo desarrollado. Lo anterior termina por reforzar la posibilidad que ofrece este estudio en cuanto a que de manera científica y haciendo uso de algún modelo matemático, como el de Mokhlesian, Fatemi Ghomi & Jolai (2010), se puede llegar a optimizar la forma de programar un centro de trabajo y aunque inicialmente pareciera tener un costo más alto, con esta formulación matemática no tan avanzada, se logró demostrar que hay otras formas de calcular el tamaño del lote y la secuencia de producción, que adicional permiten identificar mejoras en los procesos para no solo conseguir garantizar la satisfacción de la demanda, adicional bajar los costos de almacenamiento y muy seguramente, con procesos más eficientes, llevar a la compañía a niveles más altos de competitividad.

Por otro lado, una vez obtenido el modelo matemático con el cual se logra establecer el plan maestro de producción, que corresponde a la tercera etapa del “Esquema de jerarquía de decisiones para la programación de tareas” propuesto por Montoya (2015), Figura 4 del numeral 3.3 del documento, queda únicamente por ejecutar las otras 3 etapas siguientes que corresponden a la Planeación de los requerimientos de materiales, el Programa detallado de producción, incluidos los mantenimientos preventivos de la línea, así como la posible Reprogramación de trabajos, esta última como resultado de los pedidos imprevistos o paradas no programadas que suceden en manufactura e impiden ejecutar el plan maestro al pie de la letra. Todas estas tareas tienen actualmente un proceso debidamente establecido y caracterizado al interior de la organización. Inicialmente el departamento de planeación es quien debe ejecutar los pasos hasta llegar al plan maestro, paso seguido, este programa es enviado directamente a la planta de producción, al menos una semana antes de iniciar el período, que en este caso es mensual, de tal manera que se proceda con el alistamiento o revisión de los siguientes elementos que son necesarios para ejecutar el plan desarrollado,

- Mano de obra, establecer y programar el personal necesario para la operación del equipo, incluye el programa de turnos dependiendo de la carga que vaya a tener cada línea de producción.
- Revisión del inventario y del estado de reaprovisionamiento para la Materia prima y Materiales de empaque que se necesite, de acuerdo con las fórmulas maestras, para la fabricación de cada una de las referencias, en el momento justo en el que entra en máquina de acuerdo con el plan maestro establecido.
- Revisión del árbol de mantenimiento preventivo y predictivo, con lo cual se retroalimenta, en caso de ser necesario, al departamento de planeación para que se incluyan las horas que por Plan Maestro de Mantenimiento, deba ser interrumpido el proceso productivo para ser intervenido y así garantizar su confiabilidad, que de manera directa influye en el cumplimiento de Plan Maestro de producción que fue desarrollado bajo los parámetros teóricos de operación.
- Para cerrar este tema, corresponde ahora mencionar puntualmente la forma como se baja a piso de producción el plan ya completamente definido. El área de planeación envía al jefe de producción el documento con el cual quedaron definitivamente las cantidades y orden específico a fabricar en cada centro de trabajo, información que va a servir de igual forma para que el departamento de logística establezca su plan de despacho, de acuerdo con la entrada de producto a la bodega y con las ventas reales que vayan entrando durante el período.

Ahora bien, teniendo en cuenta todas las implicaciones que tiene dentro de la estrategia de la organización el correcto establecimiento de los planes de producción, vale la pena incluir dentro de las sugerencias emitidas hacia la organización el siguiente texto extraído de Motoya (2015),

*“...El requerimiento clave de cualquier sistema para programación de operaciones consiste en que éste debe*

*convertirse en una herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones” sigue más adelante, “. El sistema debe ser utilizado en contexto dinámico de tal forma que apoye en tiempo real el proceso decisional..... se requiere un vínculo directo con la base de datos empresarial, la cual debe ser actualizada en tiempo real”.*

Con esto se busca enfatizar en la importancia que tiene el poder ver el programa de producción no como resultado final del proceso de planeación y como una camisa de fuerza para la operación, por el contrario, bien administrada la información que este arroje al ser ejecutado, transformado o actualizado según los requerimientos del mercado, debe ser un punto de partida para seguir detectando oportunidades de mejora al interior de la operación.

Una nueva conclusión que puede aportar la presente investigación, corresponde a la importancia que representa actualmente para la economía nacional el trabajar para lograr acercamientos de la industria a la investigación y a los métodos científicos para encontrar oportunidades de mejora o posibles soluciones a ineficiencias que pueda estar sufriendo alguna organización, que esté afectando su competitividad. Este caso evidencia como un proceso interno de una empresa, que se encuentra debidamente estandarizado, puede ser mejorado a través de la implementación de uno o varios modelos matemáticos que puedan ser ajustados a sus condiciones particulares, eliminando posibles debilidades o amenazas que hubieran podido llevarle a una pérdida importante de competitividad.

Por último se puede concluir que la gerencia de operaciones y producción necesita estar de manera permanente liderando la investigación y la exploración de nuevas formas de hacer las cosas, el estado actual del mercado y de los negocios exigen que día tras día sea imprescindible el tratar de identificar oportunidades de mejora que eviten a las organizaciones quedarse fuera del juego por quedarse operando para siempre con las habilidades que en algún momento fueron una ventaja

competitiva pero que con el tiempo se convirtieron en una característica básica del oficio diario.

Es por esto que, a pesar de que la empresa tomada como referencia ha tenido a través del tiempo el liderazgo en el mercado por diferentes ventajas competitivas, como lo fueron en su momento la estrategia en costos o la estrategia de diferenciación por la calidad con base en sellos internacionales certificados, estas ya perdieron vigencia por ser un requisito básico para todas las organizaciones, por lo que se debe seguir evolucionando ahora en la estrategia de servicio al cliente y flexibilidad, para lo cual se vuelve fundamental contar con un muy modelo de planeación de la producción, que vaya alineado con la dirección estratégica de la organización.

## Referencias bibliográficas

Bernal C. A. (2010). Metodología de la Investigación. *Editorial Pearson Educación, Colombia*

Benjaafar, S., & Sheikhzadeh, M. (1997). Scheduling policies, batch sizes, and manufacturing lead times. *IIE transactions*, 29(2), 159-166.

Boctor\*, F. F., & Poulin, P. (2005). Heuristics for the N-product, M-stage, economic lot sizing and scheduling problem with dynamic demand. *International journal of production research*, 43(13), 2809-2828.

Boctor, F. F. (1987). The G-group heuristic for single machine lot scheduling. *International Journal of Production Research*, 25(3), 363-379.

Bertrand, J. W. M. (1985). Multiproduct optimal batch sizes with in-process inventories and multi work centers. *IIE Transactions*, 17(2), 157-163.

Carreras, P. I. V., García-Sabater, J. P., Marín-García, J. A., & García-Sabater, J. J. (2008). ELSP variants: a review. In *II International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management* (pp. 1215-1225).

Carreras, P. I. V., & Sabater, J. P. G. (2006). El Problema de la Programación del Lote Económico (ELSP): Una revisión de la literatura. In *X Congreso de Ingeniería de Organización*.

Chatfield, D. C. (2007). The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach. *Computers & Operations Research*, 34(10), 2865-2881.

Drexl, A., & Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling—survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99(2), 221-235.

Eilon, S. (1959). Economic batch-size determination for multi-product scheduling. *OR*, 217-227

Erlenkotter, D. (1990). Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. *Operations Research*, 38(6), 937-946.

Gutiérrez, O. P. (2009). Un enfoque multicriterio para la toma de decisiones en la gestión de inventarios. *Cuadernos de Admón. Pontificia Universidad Javeriana*, 22(38), 169-187.

Harris, F.W., 1913.How many parts to make at once. *Fact. Mag. Manag.*10(2), 135–136(152). .

Holmbom, M., & Segerstedt, A. (2014). Economic Order Quantities in production: From Harris to Economic Lot Scheduling Problems. *International Journal of Production Economics*, 155, 82-90.

Mirabi, M. (2011). A hybrid simulated annealing for the single-machine capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup times and costs and dynamic release of jobs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9-12), 1109-1119.

Mokhlesian, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Jolai, F. (2010). Economic lot scheduling problem with consideration of money time value. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1(2), 121-138.

Montoya Torres, Jairo Rafael (2015). Logística de producción: modelos y métodos de programación de operaciones, Cap 1.

Pinedo, M. (2005) Planning and scheduling in manufacturing and services. New York: Springer.

Raza, A. S., & Akgunduz, A. (2008). A comparative study of heuristic algorithms on economic lot scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 94-109.

Sanchís, R., Saiz, E., Castellano, E., & Poler, R. (2012). Estrategias de cumplimentación de pedidos en el sector de fabricación de bienes de equipo. Un estudio empírico. *Dirección y Organización*, (45), 84-90.

Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2010). *Operations management*. Pearson Education.

Winands, E. M. M., Adan, I. J. B. F., & Van Houtum, G. J. (2005). *The stochastic economic lot scheduling problem: a survey*. Beta, Research School for Operations Management and Logistics.