



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**COORDINACIÓN DE TRABAJO DE GRADO**

***TRABAJO DE GRADO***

Propuesta para la programación de la producción de la empresa ARQUITECTURA MÓVIL S.A.S.

**Laura Oviedo Pardo**  
**María Alejandra Pérez Rondón**  
Autores de la Propuesta

**Ing. Carlos Alberto Vega Mejía, MSc.**  
Profesor Guía

Bogotá D.C., Colombia  
Septiembre de 2012

### **Carta de Aprobación**

El Trabajo de grado con título “Propuesta para la programación de la producción de la empresa Arquitectura Móvil ARMO S.A.S”, desarrollado por las estudiantes Laura Oviedo Pardo y María Alejandra Pérez Rondón, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial, para optar el Título de Ingeniero Industrial, fue aprobado por:

#### **Director**

Ing. Carlos Alberto Vega Mejía MSc

#### **Jurado 1**

Ing. Eliana María Gonzalez Neira MSc

#### **Jurado 2**

Ing. María Paula Ramirez MSc

*La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.*

## Tabla de Contenido

Introducción .....	8
1. Planteamiento del Problema .....	8
1.1 Aspectos generales de Arquitectura Móvil S.A.S. ....	10
1.2 Descripción del proceso de producción actual .....	10
1.3 Situación Actual.....	13
2. Justificación del Proyecto.....	15
3. Marco Teórico y Conceptual .....	16
3.1 Marco Conceptual .....	16
3.2 Marco Teórico .....	17
3.2.1 Investigación de operaciones.....	17
3.2.2 Programación Lineal.....	18
3.2.3 Programación Entera.....	18
3.2.4 Scheduling .....	19
2.2.4.1. Notación de Graham .....	19
3.2.5 Flow Shop .....	20
3.2.6Makespan .....	20
3.2.7MRP (Material RequirementsPlanning) .....	20
3.2.8BOM (Bill Of Material).....	20
4. Objetivos .....	20
4.1 Objetivo general.....	20
4.2 Objetivos Específicos.....	21
5. Estudio de Procesos .....	21
5.1. Documentación de procesos.....	21
5.1.1. Diagrama Causa Efecto.....	21
5.1.2. Diagrama de Operaciones .....	24
5.1.3. Producto Estrella .....	26
5.1.4. BOM (Bill Of Material).....	28
6. Modelo Flow Shop Anidado .....	30
6.1. Planteamiento .....	30

6.1.1.	Metodología .....	30
6.2.	Formulación.....	31
6.2.1.	Flow Shop: Cubierta .....	31
6.2.2.	Modelo Anidado.....	34
6.3.	Modelo Anidado para ARMO S.A.S .....	37
6.3.1.	Resultados .....	40
7.	MRP (Material RequirementsPlanning) .....	44
7.1.	Análisis del MRP (Material RequirementsPlanning) .....	56
8.	Análisis Costo Beneficio .....	57
8.1.	Escenario Normal .....	58
8.2.	Escenario de mayores ventas.....	59
9.	Conclusiones.....	60
10.	Recomendaciones .....	60
11.	Referencias.....	62
11.1.	Bibliográficas .....	62
11.2.	Entrevista con expertos.....	62
11.3.	Cibergráficas.....	62

## Índice de Tablas

Tabla 1. Variación porcentual costos de inventario producto en proceso (Fuente: Balance General dispuesto en el Anexo 2 Balance y P&G ARMO 2011) .....	15
Tabla 2. Código de Colores.....	299
Tabla 3. Ventas mensuales ARMO S.A.S 2010 .....	388
Tabla 4. Ventas mensuales ARMO S.A.S 2011.....	38
Tabla 5. Matriz $H_{il}$ .....	39
Tabla 6. Máquinas.....	39
Tabla 7. Resultados $x_{1,j,k,13}$ .....	40
Tabla 8. Resultados $s_{ijl}$ .....	40
Tabla 9. Resultados $c_{ijl}$ .....	40
Tabla 10. Valores de la Función Objetivo en el Escenario Normal.....	41
Tabla 11. Valores de la Función Objetivo en el escenario de mayores ventas.....	42
Tabla 12. Resultados $s_{ijl}$ en el escenario de mayores ventas.....	42
Tabla 13. Resultados $c_{ijl}$ en el escenario de mayores ventas.....	43
Tabla 14. Resultados $s_{ijl}$ en el escenario de menores ventas.....	43
Tabla 15. Resultados $c_{ijl}$ en el escenario de menores ventas.....	43
Tabla 16. Valores de la Función Objetivo en el escenario de menores ventas.....	43
Tabla 17. Plantilla MRP.....	44
Tabla 18. Estructura de Materiales. ....	36
Tabla 19. Incremento de Producción.....	58

## Índice de Gráficas

Gráfica 1. Gráfica de Torta Ventas 2010. ....	19
Gráfica 2. Gráfica de Torta Ventas 2011. ....	27
Gráfica 3. Gráfica de Torta Ventas 2012.....	20
Gráfica 4. Ventas Modulo para petroleras (2010 y 2011).....	28

## Índice de Diagramas

Diagrama 1. Diagrama de bloques actual. ....	12
Diagrama 2. Diagrama Causa Efecto. ....	23
Diagrama 3. Diagrama de Operaciones.....	25
Diagrama 4. Diagrama de Gantt Operaciones.....	Anexo 5
Diagrama 5. Diagrama de Gantt por máquina.....	Anexo 6

## Lista de Anexos

Anexo 1- Ficha técnica de productos.

Anexo 2- Balance y P&G ARMO 2011.

Anexo 3 - BOM (Bill Of Material).

Anexo 4 – Modelo de Flow Shop Anidado

Anexo 5 - Diagrama de Gantt Operaciones.

Anexo 6 - Diagrama de Gantt por máquina.

Anexo 7 – Tablas de Resultados.

Anexo 8 – Cálculo Costo Beneficio.

## Introducción

Para cualquier empresa productora es de vital importancia tener completo control y conocimiento del proceso productivo, pues éste es el que genera los ingresos de la empresa, cumpliendo con su razón social. La programación de la producción hace parte integral del éxito de una empresa, ya que da solución a problemas tales como las grandes cantidades de inventario, los altos niveles de producto en proceso y los largos tiempos de Lead Time. De la programación de la producción depende también variable como los tiempos, las cantidades, la disponibilidad y uso de los recursos, entre otras variables a tener en cuenta para el funcionamiento óptimo de una organización. Con una buena programación de la producción se reducen tiempos, demoras, desperdicio de materiales y mano de obra subutilizada, logrando así una considerable reducción de costos y en consecuencia un aumento de las utilidades. [Bowers & Agarwal, 1993]

En el presente trabajo se propone un modelo de programación de la producción para optimizar el proceso productivo de Arquitectura Móvil S.A.S. (ARMO), una compañía especializada en la producción, venta y alquiler de módulos portátiles. Los accionistas y gerentes de esta compañía han notado dificultades en el proceso productivo y de abastecimiento, lo cual ha impactado las ganancias obtenidas en periodos anteriores.

Este documento parte de una breve presentación de la compañía, en donde se pone en conocimiento la problemática de la compañía y otros aspectos considerados relevantes para la descripción de la situación actual de ARMO. Una vez identificada la problemática, se encuentra la justificación del proyecto desde el ámbito financiero, académico y personal. Enseguida se encuentran conceptos y teorías, las cuales son base para el desarrollo del proyecto. Después de estos conceptos se definen los objetivos.

A partir de este punto empieza el desarrollo de los objetivos iniciando con el estudio de procesos, el cual está compuesto de los diagramas que se consideran relevantes y sus respectivos análisis. Seguido del planteamiento, formulación y resultados del modelo de programación de la producción propuesto. La planeación de requerimientos de materiales y el análisis costo beneficio se encuentran a continuación del modelo. Por último, se encuentran las conclusiones y recomendaciones del Trabajo de Grado.

### 1. Planteamiento del Problema

Según estadísticas del DANE sobre el índice de crecimiento del número de pequeñas empresas, en el año 2005 en Colombia existían 3402 pequeñas empresas con un índice de crecimiento de 2,7% anual y el total de establecimientos industriales para este año era de 7524 según el informe anual. Esto quiere decir que para el año 2005 aproximadamente el 45% de la industria estaba conformada por pequeñas empresas. Debido a esto, el sector de las PYME (Pequeña y Mediana

empresa) es importante pues representa un porcentaje considerable dentro de la economía colombiana, además de generar empleo y progreso para el país.

“Colombia es un país cuya economía se soporta en empresas de pequeña escala. Las Pymes, conjuntamente con las microempresas, representan al menos el 90 por ciento del parque empresarial nacional y generan el 73 por ciento del empleo y el 53 por ciento de la producción bruta de los sectores industrial, comercial y de servicios.”<sup>1</sup>

“Las cifras de numerosos países exitosos son concluyentes: el notable desempeño de las economías del sudeste asiático en las últimas décadas, por ejemplo, se apoyó firmemente en las pequeñas y medianas empresas, las mismas en las cuales se basó el logro de las altas tasas de crecimiento del PIB y de las exportaciones, el aumento del empleo, la mejor distribución del ingreso, así como el estímulo al ahorro y la inversión. En estos países, todos grandes exportadores en la actualidad, más del 60 por ciento de sus ventas al exterior se origina precisamente en las Pymes.”<sup>2</sup>

Por esto es fundamental concentrarse en el buen funcionamiento de este tipo de empresas.

En algunos casos, las MIPYME son manejadas por personas que no poseen los conocimientos necesarios para gestionar el debido desarrollo y funcionamiento de una organización o no tienen los recursos para contratar personal con conocimiento en estas áreas. Esto hace que se presenten deficiencias en la estructura productiva y operativa. Estas deficiencias se evidencian en el desperdicio de recursos, incumplimiento a los clientes, sub utilización de capacidad instalada y desabastecimiento, entre otras. Lo que conlleva a que los ingresos generados no sean óptimos y en muchos casos la empresa presente pérdidas económicas.

Una posible solución a este problema es el uso de un modelo programación de la producción, el cual tenga en cuenta el proceso de abastecimiento, el proceso de producción, y la utilización de los recursos, basándose en el pronóstico de la demanda. Teniendo en cuenta la incertidumbre sobre el cálculo de los costos operativos y de capacidad, se puede minimizar el costo relacionado con el nivel de inventarios, al mismo tiempo que la posibilidad de obtener un valor impreciso de los costos. De esta manera, se reduce el riesgo a obtener mayores costos y se logra tener control sobre variables influyentes en el resultado del proceso, tales como material requerido, tiempos de proceso, tiempos de entrega, recursos utilizados, entre otros [Reay-Chen Wanga, 2004].

Al respecto, Arquitectura Móvil (ARMO) S.A.S. es una pequeña empresa que presenta una problemática similar a la descrita hasta ahora. Esta empresa está conformada por 11 personas, con un total de activos de \$566.006.000 (COP). Tiene como objeto social la construcción, venta, alquiler y mantenimiento de todo tipo de campamentos móviles, propios o de terceros.

---

<sup>1</sup> [Rodríguez, 2003]

<sup>2</sup> Ibíd

## 1.1 Aspectos generales de Arquitectura Móvil S.A.S.

Arquitectura Móvil S.A.S. (ARMO) fue creada en el año 2004 por su actual Gerente General y Comercial, el arquitecto Jorge Enrique Lleras Matamoros, y es una empresa especializada en la construcción de módulos portátiles para venta o alquiler.

“ARMO es un sistema modular para creación de espacios de trabajo tipo campamento u oficina que permite migraciones rápidas y seguras, sin sacrificio de tiempo laboral.”<sup>3</sup>

Inicialmente incursionó en el sector de la construcción produciendo salas de ventas y campamentos. Cuatro años después debutó en el sector energético produciendo módulos especializados y personalizados según los requerimientos específicos del cliente. Actualmente diseña y produce módulos como enfermerías, baños, vestíbulos, oficinas o dormitorios para varias empresas de estos sectores (ver Anexo 1- Ficha técnica de productos).

Arquitectura Móvil es una empresa familiar, dirigida por tres hermanos: el arquitecto Jorge Enrique Lleras Matamoros, quien está encargado de la gerencia general y comercial; su hermano, el también arquitecto Álvaro Lleras, quien tiene a su cargo la dirección de la producción; y a cargo de la gerencia administrativa está su hermana, la odontóloga Marcela Lleras. Como es una sociedad de acciones simplificadas (S.A.S.) tiene cuatro accionistas. Los porcentajes de acciones de cada miembro son 55%, 35%, 5% y 5%, respectivamente.

## 1.2 Descripción del proceso de producción actual

Lo que se describe a continuación se observa gráficamente en el siguiente diagrama, el texto en paréntesis hace referencia a las operaciones correspondientes al Diagrama 1. Diagrama de Bloques.

El proceso de producción inicia con la recepción del Skid que es la estructura que va a soportar el módulo. Luego se mide (medir 1), se corta (cortar 1) y se pinta

(pintar 1) el riel, sobre el cual se encajarán los paneles y el piso, de acuerdo con las especificaciones requeridas por el cliente. Después, se suelda el riel al skid (soldar 1) y se perfora (perforar 1) para instalar el piso del módulo (instalar 1). Enseguida se coloca el acabado del piso (acabar).

A continuación, se miden (medir 2), cortan (cortar 3) y perforan (Perforar 2) las columnas. Luego, se sueldan al riel (soldar 2) y por último se pintan (pintar 3). La siguiente operación es cortar los muros (cortar 2), enhebrarlos a los tornillos (enhebrar) y encajarlos (encajar) en las columnas y el

---

<sup>3</sup> [Arquitectura Móvil (ARMO)]

riel. Después se instalan las puertas y ventanas en los muros (instalar 2). Posteriormente, se ponen las vigas (Poner) en la estructura para crear una base sobre la cual se colocará la cubierta más adelante; además, se instala la red eléctrica (instalar 3).

Finalmente, se mide (medir 3), se corta (cortar 4) y se perfora (perforar 3) la estructura en donde posteriormente se pondrán los paneles del techo. Luego se cortan (cortar 5) y se instalan (instalar 4) dichos paneles en la estructura, enseguida se perfora la estructura (perforar 4), para concluir atornillándola (atornillar) a las columnas.

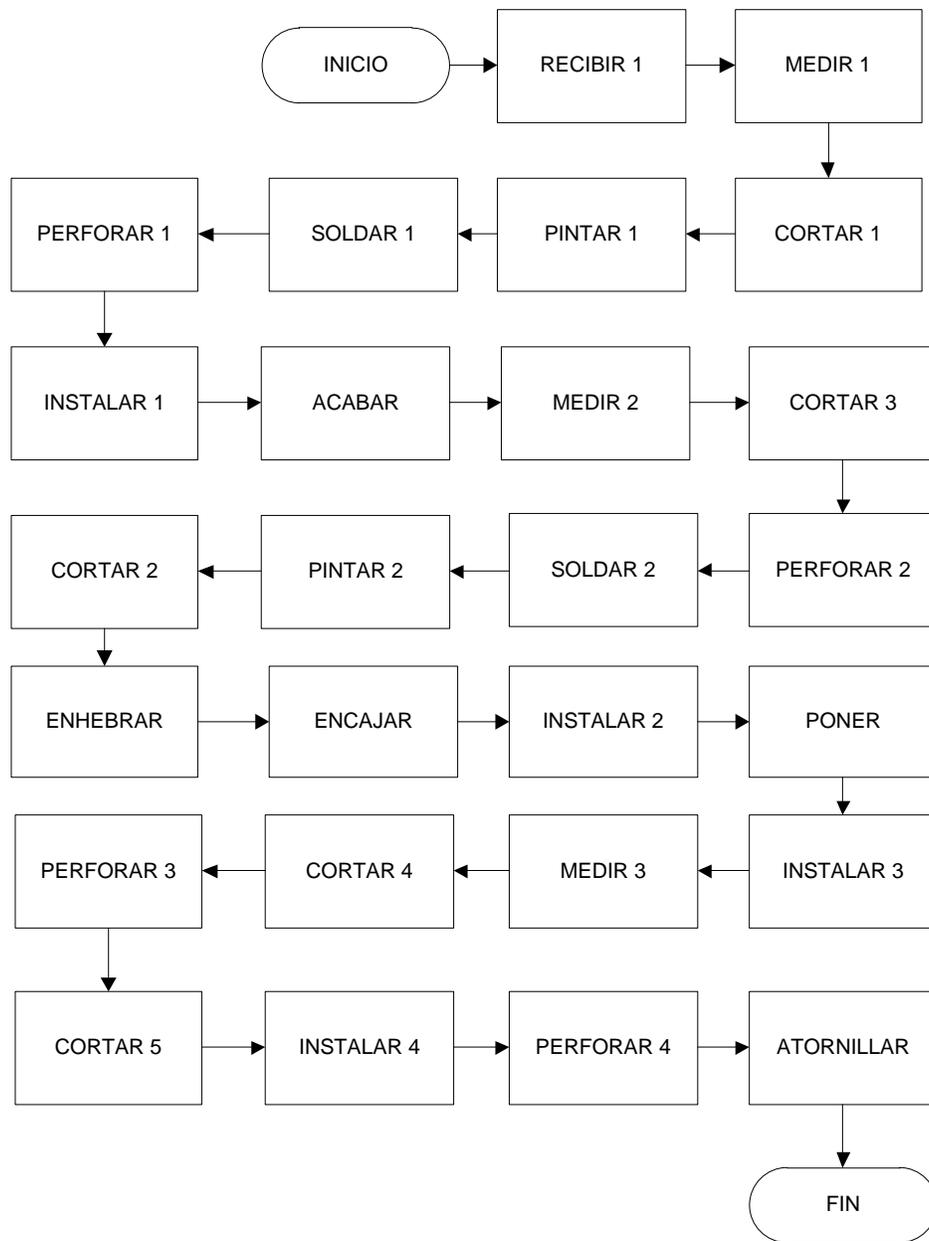


Diagrama 1. Diagrama de bloques actual.

### 1.3 Situación Actual

Aunque el tiempo que los gerentes llevan desempeñando sus labores les ha brindado experiencia en el campo y en la ejecución de sus actividades, no cuentan con algunos conocimientos de importancia para el buen funcionamiento de la compañía. Se ven deficiencias en la selección de proveedores, pues no se les hace una evaluación que garantice los mejores precios, calidad y opciones de pago para la compañía. Por otro lado el costeo del producto no es claro, pues no se tienen claramente definidos los requerimientos de material, esto hace que el cálculo de las ganancias y la determinación de precios de venta se dificulten. Estos inconvenientes fueron dados a conocer por el Gerente General.

Asimismo, la calidad de empresa familiar hace que ciertos protocolos necesarios sean dejados de lado. Por ejemplo, al cerrar una venta el Gerente Comercial diligencia un formato en MS Excel con las especificaciones técnicas requeridas por el cliente; este formato debería ser recibido posteriormente por el gerente de producción para iniciar el diseño y cuantificar los requerimientos de materia prima. En lugar de seguir este procedimiento, las especificaciones son dadas telefónicamente ocasionando pérdidas de información que en algunos casos trae como consecuencia la elaboración de productos que no cumplen los requerimientos del cliente, según la información suministrada por el Gerente de Producción.

Cuando la empresa empezó a posicionarse en el mercado y a aumentar su portafolio de clientes, fue necesario conseguir una planta más grande para poder cubrir la demanda. A finales del año 2008 se arrendó un lote de mayores dimensiones para llevar a cabo el cambio de planta; este cambio culminó en Enero del 2012. Aún hace falta mejorar las condiciones de terreno y adecuación de planta.

El Gerente General y los demás integrantes de la junta directiva de Arquitectura Móvil S.A.S. son conscientes de las deficiencias administrativas que se presentan actualmente y han sido asesorados por profesionales, quienes han elaborado plantillas y formatos dinámicos para la consignación de información importante. Sin embargo, estos no son usados con la disciplina necesaria por lo que no se han presentado resultados visibles o cuantificables.

Con respecto al cambio de planta, en el año 2009 un estudiante de la Pontificia Universidad Javeriana realizó una asesoría técnica en la asignatura Proyecto Social Universitario, en la que elaboró la distribución de la nueva planta. Desafortunadamente, el lote para el que se realiza el estudio no es el que actualmente hace las veces de planta de ARMO S.A.S.

Además, teniendo en cuenta que los módulos elaborados en ARMO son totalmente especializados por lo que ha resultado muy difícil para el gerente de producción determinar los requerimientos de materia prima; ya que el comprador de un módulo de ARMO puede pedirlo con el número de ventanas y puertas que desee. También se da la opción de dotar el módulo con camas, baños, cocina, televisores, equipos de oficina y demás implementos que requiera. Los costos relacionados con estos pedidos especiales no se encuentran debidamente definidos, así como las cantidades de

materia prima necesaria, pues cada módulo es único y no se conoce con certeza cuánto material se va a usar. Esto ha ocasionado que algunas veces sea necesario realizar compras inmediatas aumentando los costos y el tiempo de producción.

Con base en lo anterior vale la pena preguntarse *¿Podría plantearse un modelo de programación de la producción que ayude a incrementar las utilidades de Arquitectura Móvil S.A.S.?¿Qué consideraciones se deberían tener en cuenta para la buena aplicación de éste?*

## 2. Justificación del Proyecto

Debido a la falta de orden y control en los procesos administrativos y de producción, ARMO se ha visto en la obligación de incurrir en gastos innecesarios por re-procesos, desabastecimiento, altas tasas de interés en endeudamientos, incumplimiento a clientes, problemas de liquidez y sistema deficiente de cobro de cartera. Esto a su vez ha generado que los ingresos de la compañía no sean los esperados por los accionistas y que además no se esté utilizando de manera eficiente la capacidad instalada.

Este proyecto busca aprovechar al máximo la capacidad instalada de la nueva planta y disminuir los costos actuales de inventario de producto en proceso. Los cuales aumentan porcentualmente como se muestra en la siguiente tabla.

	31/12/2010	31/01/2011	28/02/2011	31/03/2011	30/04/2011	31/05/2011	30/06/2011	31/07/2011	30/08/2011	30/09/2011	31/10/2011	30/11/2011
Materiales	\$ 31.964.342	\$ 27.691.745	\$ 24.841.149	\$ 44.028.554	\$ 46.656.625	\$ 101.947.945	\$ 51.652.721	\$ 40.351.715	\$ 78.658.298	\$ 57.939.145	\$ 73.026.538	\$ 73.915.168
Variación Porcentual		-13%	-10%	77%	6%	119%	-49%	-22%	95%	-26%	26%	1%
Producto en proceso	\$ 75.916.570	\$ 103.358.163	\$ 91.514.922	\$ 87.204.217	\$ 84.917.807	\$ 84.917.807	\$ 205.993.237	\$ 253.773.663	\$ 187.329.274	\$ 311.627.664	\$ 493.528.074	\$ 524.815.728
Variación Porcentual		36%	-11%	-5%	-3%	0%	143%	23%	-26%	66%	58%	6%

**Tabla 1.** Variación porcentual costos de inventario producto en proceso (Fuente: Balance General dispuesto en el Anexo 2 Balance y P&G ARMO 2011)

Como ya se ha mencionado antes, un modelo de programación de la producción permite el control sobre estas variables y su implementación en esta compañía se esperaría trajera una mejora en los ingresos, mayor aprovechamiento de los recursos y más control sobre la producción; logrando la fidelización del cliente mediante la atención oportuna a sus necesidades, cumpliendo con los estándares de calidad de la empresa y, lo más importante, el aumento en la generación de valor de la organización.

La mayoría de casos y ejercicios estudiados durante el pregrado son ideales o sencillos; el desarrollo de este proyecto permitirá profundizar ciertos conocimientos adquiridos y aterrizarlos a la vida real. Por ejemplo, temas relacionados con tiempos de producción, procesos de abastecimiento, costos de producción, materiales requeridos, recursos utilizados, capacidad instalada, entre otras variables. Así como también la adquisición de nuevos conocimientos que no hacen parte del núcleo básico de la carrera.

La elaboración de este proyecto presenta un escenario ideal para la implementación de las herramientas matemáticas adquiridas en el énfasis de Métodos cuantitativos, logrando así comprensión no sólo de su modelamiento, sino también de sus aplicaciones, de las posibles restricciones y de las ventajas de usar ciertos modelos en casos reales.

### 3. Marco Teórico y Conceptual

#### 3.1 Marco Conceptual

“Scheduling es un proceso de toma de decisiones usado en muchas industrias manufactureras y de servicios. Se encarga de la asignación de recursos a tareas en un periodo dado de tiempo; su fin es optimizar uno o más objetivos”.<sup>4</sup>

Programación lineal: “es una herramienta para resolver problemas de optimización”<sup>5</sup>. “Programación lineal es un concepto que se utiliza para describir una clase general de problemas de optimización. El objetivo es determinar valores de  $n$  variables reales no negativas para maximizar o minimizar una función lineal de dichas variables, sujeta a  $m$  restricciones lineales de las mismas variables.”<sup>6</sup>

Variables de decisión: “en cualquier problema de programación lineal, las variables de decisión tienen que representar completamente las decisiones que tomar”<sup>7</sup>

Función objetivo: “En cualquier problema de programación lineal, la persona que toma la decisión quiere maximizar (generalmente el ingreso o las ganancias) o minimizar (por lo general los costos) alguna función de las variables de decisión. La función que hay que maximizar o minimizar se llama la función objetivo.”<sup>8</sup>

Restricciones: ecuaciones lineales o desigualdades lineales que limitan los valores de las variables de decisión.

Región factible: “es el conjunto de todos los puntos que satisfacen las restricciones del problema de programación lineal”<sup>9</sup>.

Diagrama de Pescado: “ El método consiste en definir la ocurrencia de un evento no deseable o problema, es decir, el efecto, como la “cabeza del pescado” y después identificar los factores que contribuyen, es decir las causas, como el “esqueleto del pescado” que sale del hueso posterior de la cabeza”<sup>10</sup>

Diagrama de Proceso de la Operación: “El diagrama de proceso de la operación muestra la secuencia cronológica de todas las operaciones, inspecciones, holguras y materiales que se usan en el proceso de manufactura o de negocios, desde la llegada de la materia prima hasta el empaque del producto terminado. La gráfica describe la entrada de todas las componentes y

---

<sup>4</sup>[Pinedo, 2008]

<sup>5</sup>[Winston, 1994]

<sup>6</sup>[Nahmias, 2007]

<sup>7</sup>[Winston, 1994]

<sup>8</sup>Ibíd.

<sup>9</sup>Ibíd.

<sup>10</sup>[Niebel & Freivalds, 2001]

subensambles al ensamble principal. (...) El diagrama de proceso de la operación terminado ayuda al analista a visualizar el método actual, con todos sus detalles, para que pueda desarrollar procedimientos nuevos y mejores. Muestra el efecto que tendrá un cambio en una operación dada sobre las operaciones precedentes y subsecuentes.”<sup>11</sup>

Producto Estrella: “Se caracteriza por tener un alto nivel de ventas y ser muy conocidos. Son los que están de moda.”<sup>12</sup>

Análisis Costo Beneficio: “Se basa en un principio muy simple: compara los beneficios y los costos de un proyecto particular y si los primeros exceden a los segundos entrega un elemento de juicio inicial que indica su aceptabilidad. Si, por el contrario, los costos superan a los beneficios, el proyecto debe ser en principio rechazado.”<sup>13</sup>

“Un diagrama de Gantt es un gráfico lineal, en el cual se refleja por medio de unas barras horizontales, la duración de las distintas actividades reflejadas en el mismo. Es un calendario de actividades en el que se reflejan el comienzo y el final previstos.”<sup>14</sup>

## 3.2 Marco Teórico

### 3.2.1 Investigación de operaciones

La investigación de operaciones nace durante la Segunda Guerra Mundial como la aplicación de las matemáticas y el método científico a las operaciones militares. Hoy en día se define como “un planteamiento científico a la toma de decisiones, que busca determinar cómo diseñar y operar mejor un sistema, normalmente bajo condiciones que requieren la asignación de escasos recursos”<sup>15</sup>

Para resolver un problema en una organización haciendo uso de la investigación de operaciones, se parte de la formulación de éste; en donde se definen los objetivos y las partes de la organización que se deben estudiar. El siguiente paso es observar el sistema, es decir, recolectar datos. Con estos datos se formula un modelo matemático que dé solución al problema de la organización; existen varias técnicas para esta formulación. A continuación se verifica el modelo y su adaptabilidad a la realidad. Puede existir más de un modelo por lo que se debe elegir el modelo que mejor se adapte a la realidad y los objetivos de la organización. Una vez el modelo es validado por los encargados de la toma de decisiones de la organización, se da inicio a la implementación y evaluación de éste.

---

<sup>11</sup>[Niebel & Freivalds, 2001]

<sup>12</sup>[Sancho Frías, 2011]

<sup>13</sup>[Cohen & Franco, 2006]

<sup>14</sup>[Zaragoza Martínez, 2009]

<sup>15</sup>[Winston, 1994]

### 3.2.2 Programación Lineal

Un método para resolver problemas de optimización es la programación lineal conformada por variables de decisión, restricciones y función objetivo (definidas anteriormente). Para un problema bidimensional, se puede utilizar el método gráfico en donde se trazan las restricciones, se determina la región factible y se halla una solución óptima para el problema de programación lineal. La programación lineal puede ser utilizada para resolver problemas establecimiento de horarios de trabajo, de presupuesto, de dietas, de mezclas, en procesos de producción, inventarios, entre otros.

Existen varios programas que se pueden utilizar para resolver este tipo de problemas tales como LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer), GAMS, LPSolve, entre otros.

### 3.2.3 Programación Entera

En un problema de programación lineal en el cual algunas, o todas las variables tienen que ser números enteros no negativos se utiliza la programación entera. Si sólo algunas de las variables deben ser números enteros no negativos es un problema de programación entera mixta; mientras que si deben ser todas enteras, es un problema de programación entera pura. Algunos ejemplos de problemas de Programación Entera son casos de programación de máquinas, el problema del agente viajero, recubrimiento de conjuntos, localización de planta, entre otros.

En este tipo de problemas frecuentemente se presentan dos restricciones de la forma  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$  y  $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$  y es necesario que se cumpla al menos una de éstas, conocidas como restricciones "o bien". Si en el lado derecho de la desigualdad se multiplica por un número  $M$  (un número muy grande) por una variable binaria, se garantiza el cumplimiento de al menos una de las dos restricciones. Así:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My, g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1 - y)$$

También puede presentarse la necesidad de asegurarse si el cumplimiento de una restricción  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$  implica el cumplimiento de  $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ , conocido como restricciones "si- entonces". En este caso se incluyen las siguientes restricciones  $-g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My, f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1 - y)$ .

Para resolver este tipo de problemas existen varios métodos, por ejemplo el método de ramificar y acotar. "En la práctica, la mayoría de los problemas de programación entera se resuelven mediante el uso de la técnica de ramificar y acotar. Los métodos de ramificar y acotar encuentran la solución óptima para un problema de programación entera mediante la enumeración eficiente de los puntos de la región factible de un subproblema."<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup>[Winston, 1994]

### 3.2.4 Scheduling

Scheduling o la Programación de la Producción asigna recursos, por ejemplo, maquinaria y mano de obra, a tareas como operaciones las cuales deben tener niveles de prioridad y tiempos de entrega; con el fin de optimizar uno o más objetivos, como: minimizar tiempos, disminuir operaciones y maximizar utilización de recursos.

Existen varios “ambientes” (*environments*) de maquinaria por ejemplo: una máquina (*single machine*), en donde, como su nombre lo indica hay una sola máquina; máquinas idénticas en paralelo, donde existen  $m$  máquinas y el trabajo  $j$  requiere de una sola operación, la cual se puede realizar en cualquiera de las  $m$  máquinas; flow shop, donde existen  $m$  máquinas y cada trabajo debe ser realizado en cada una de las  $m$  máquinas siguiendo la misma ruta; y job shop, donde cada trabajo tiene una ruta determinada y debe “visitar” cada máquina al menos una vez.

Hay tres tipos de Schedule: “non-delay Schedule”, ninguna máquina se queda sin utilizar cuando una operación espera a ser procesada; “active Schedule”, no se detiene el procesamiento de los trabajos y no es posible construir otro “plan” (Schedule) diferente así se cambie el orden de procesamiento y; “semi-active schedule”, ninguna operación puede ser terminada antes sin cambiar el orden de procesamiento en alguna máquina.[Pinedo, 2008]

#### 2.2.4.1. Notación de Graham

Un problema de Scheduling se describe mediante una tripleta  $\alpha, \beta, \gamma$ , donde el Campo  $\alpha$  describe el entorno de la máquina y contiene sólo una entrada; el Campo  $\beta$  proporciona detalles de las características de procesamiento y restricciones y puede no tener entradas, una entrada o múltiples entradas; y el Campo  $\gamma$  describe el criterio de optimización (función objetivo) y con frecuencia contiene una sola entrada.

Para un Flow Shop con  $m$  máquinas en serie (Fm) la notación es  $Fm|p_{ij} = p_j|\sum w_j C_j$  donde  $p_{ij}$  es el tiempo de procesamiento del trabajo  $j$  en todas las máquinas  $m$  y es igual a  $p_j$  ya que es proporcional. El objetivo es minimizar la suma ponderada de los tiempos de terminación.

En un Job shop con  $m$  máquinas la notación se ve de la siguiente manera:  $Jm||C_{max}$  donde el objetivo es minimizar el makespan ( $C_{max}$ ).

Un problema de una sola máquina (Single Machine) se denota  $1|r_j, prmp|\sum w_j C_j$  donde  $r_j$  es la fecha de inicio de procesamiento del trabajo  $j$ .  $prmp$  significa que permite detener el procesamiento del trabajo. El objetivo es minimizar la suma ponderada de los tiempos de terminación.[Pinedo, 2008].

### 3.2.5 Flow Shop

En un ambiente Flow Shop hay  $m$  máquinas en serie, cada trabajo debe ser procesado en cada una de las  $m$  máquinas y, adicionalmente, todos los trabajos deben seguir la misma ruta. Después de terminar en una máquina el trabajo pasa a la cola en la siguiente máquina. Usualmente todas las colas se comportan PEPS (Primero en Entrar Primero en Salir). Si el flow shop estudiado se comporta PEPS se refiere a una permutación y el campo  $\beta$  incluye la entrada  $prmu$  (permutación: el orden en el que los trabajos se procesan en la primera máquina se mantiene en todo el sistema. [Pinedo, 2008].

### 3.2.6 Makespan

El Makespan, se define como  $Max(C_1, \dots, C_n)$  donde  $C_i$  es el tiempo de fin de la operación  $i$ , es equivalente al tiempo de terminación del último trabajo cuando éste deja el sistema. Un Makespan mínimo usualmente implica una buena utilización de la(s) máquina(s). [Pinedo, 2008]

### 3.2.7 MRP (Material Requirements Planning)

“La planificación de la necesidad de materiales (MRP del inglés Material Requirements Planning) reconoce la relación entre la demanda del producto final y la de los componentes que se usan para fabricarlo. Esta relación se usa a continuación para calcular la cantidad que se debe producir de cada producto final, componente y su ensamble durante cada periodo.”<sup>17</sup>

### 3.2.8 BOM (Bill Of Material)

“La lista de materiales (BOM por sus siglas en inglés Bill Of Material) enumera los componentes, su descripción y la cantidad de cada uno necesaria para hacer una unidad de un producto.”<sup>18</sup>

## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo general

Proponer y validar un modelo de Programación de la Producción basado en programación lineal, que se ajuste a las necesidades particulares de la Empresa ARMO S.A.S. para mejorar el proceso de producción optimizando tiempos y recursos, generando la disminución de costos de producción y en consecuencia aumentando las utilidades de la compañía.

---

<sup>17</sup>[Winston, 1994]

<sup>18</sup>[Heizer & Render, 2004]

## 4.2 Objetivos Específicos

1. Definir y documentar los procesos de ARMO S.A.S. identificando las variables de mayor impacto para analizar y jerarquizar las situaciones susceptibles a mejora que impacten de forma directa la generación de valor de la empresa.
2. Formular, validar y desarrollar la propuesta de un modelo de programación de la producción para ARMO S.A.S. que permita mejorar el proceso de abastecimiento y de producción.
3. Realizar un análisis costo beneficio para determinar los costos actuales de producción, compararlos con los propuestos y así cuantificar los beneficios de la propuesta.

## 5. Estudio de Procesos

En este numeral se encuentran los diagramas considerados relevantes para el estudio de procesos de ARMO S.A.S.

### 5.1. Documentación de procesos

Para elaborar un modelo de programación de la producción que se ajuste a la situación real de la compañía, es imperativo analizar y estudiar el proceso productivo, realizar un levantamiento de tiempos y recolección de datos históricos, por ejemplo, cifras de ventas, y construir los diagramas que, se consideren, aporten información relevante.

Los diagramas considerados dentro de este trabajo son:

- Diagrama causa efecto.
- Diagrama de Operaciones.
- Diagrama de Bloques.
- Producto Estrella

#### 5.1.1. Diagrama Causa Efecto

Este diagrama permite analizar que situaciones ocasionan los sobre costos en la producción, en seis categorías que son: Mano de Obra, Maquinaria, Método, Medio Ambiente, Materiales y Medición. Una vez se identifican las causas del problema se procede a plantear soluciones. (Ver Diagrama 2).

Para la elaboración de este diagrama se analiza a profundidad cada una de las categorías en búsqueda de las causas más relevantes para los sobrecostos de producción. Las visitas a la compañía hacen la identificación de las causas de Medio Ambiente, Mano de Obra y Maquinaria

más sencilla, pues saltan a la vista oportunidades en estas categorías. En cuanto a las demás categorías, las causas se hallan en la información suministrada por la compañía.

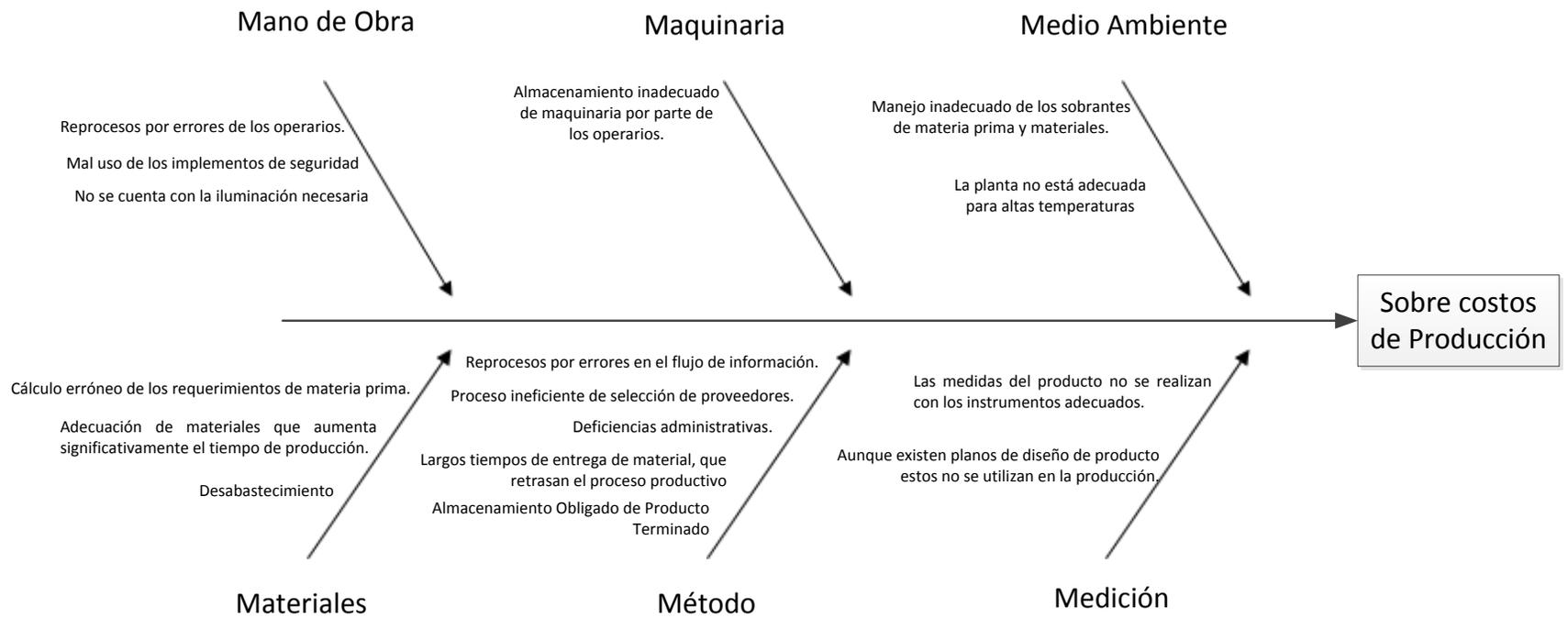


Diagrama 2. Diagrama Causa Efecto.

#### 5.1.1.1. Análisis del Diagrama Causa Efecto

En la categoría “Método” se encuentra el mayor número de causas en donde se evidencia una clara oportunidad de mejora en el proceso productivo que impacta el sistema administrativo. Lo que se busca en este trabajo es disminuir este impacto realizando una programación de la producción óptima que genere mayor control y facilite la administración del proceso; teniendo en cuenta también requerimientos de materiales disminuyendo las causas que se encuentran en la categoría “Materiales”.

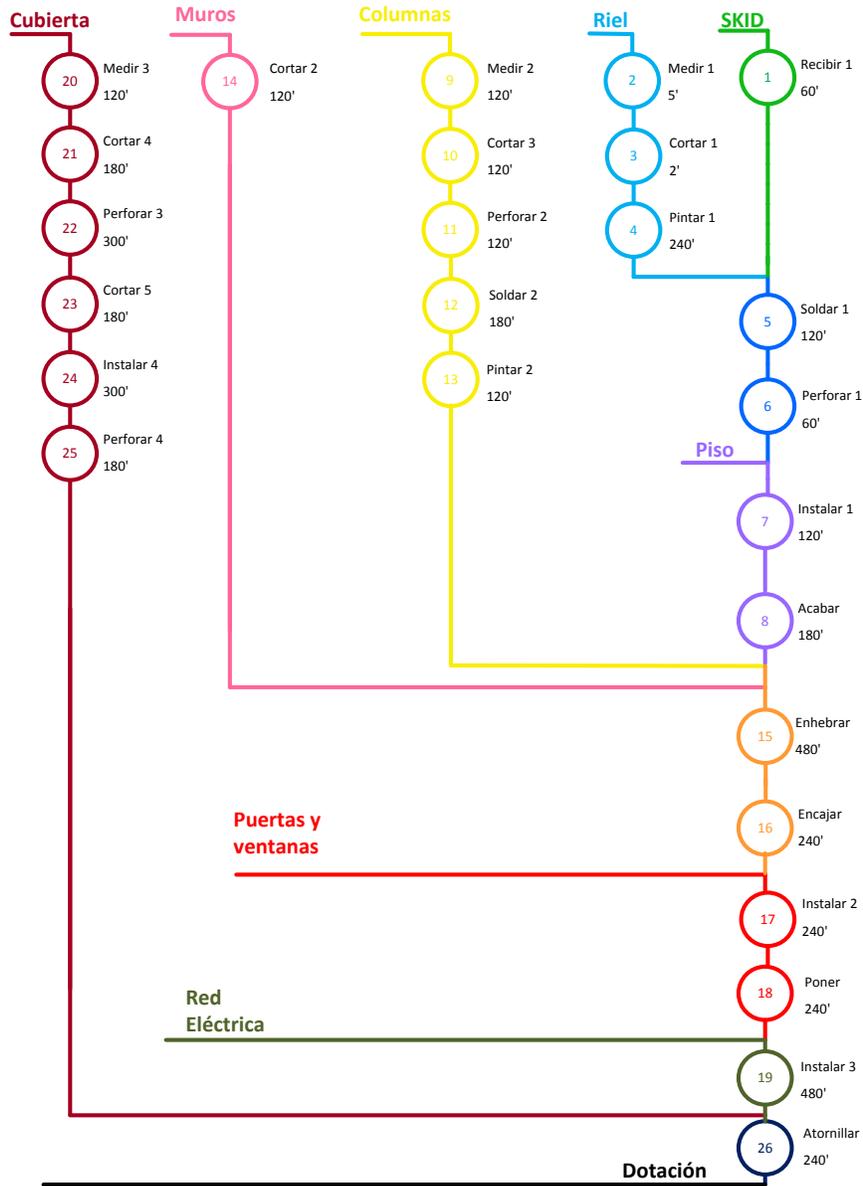
Como se había mencionado anteriormente, se encontraba programado un cambio de planta el cual culminó durante la realización de este trabajo; por lo tanto, se espera que este diagrama evolucione favorablemente una vez se adapte la planta a lo que se tiene planeado y en consecuencia disminuyan las causas de las otras categorías por ejemplo “Medio Ambiente”.

#### 5.1.2. Diagrama de Operaciones

Este diagrama brinda una visión global del proceso productivo, abarcando tiempos de operación, orden de procesamiento, entrada y salida de materiales, precedencia y simultaneidad en la ejecución de operaciones.

Los tiempos mostrados en el diagrama se encuentran en minutos, y fueron suministrados por la compañía. (Ver Diagrama 3).

ARMO S.A.S  
Diagrama de operaciones del proceso de fabricación de  
Módulos Portátiles.



RESUMEN		Diagramó: Laura Oviedo, María Pérez	Código de colores	
Símbolo	Número			
○	26	Aprobó:	—	Cubierta
□	0		—	Muros
◻	0		—	Columnas
	Total	Fecha: 1 de Febrero de 2012	—	Riel
			—	Skid

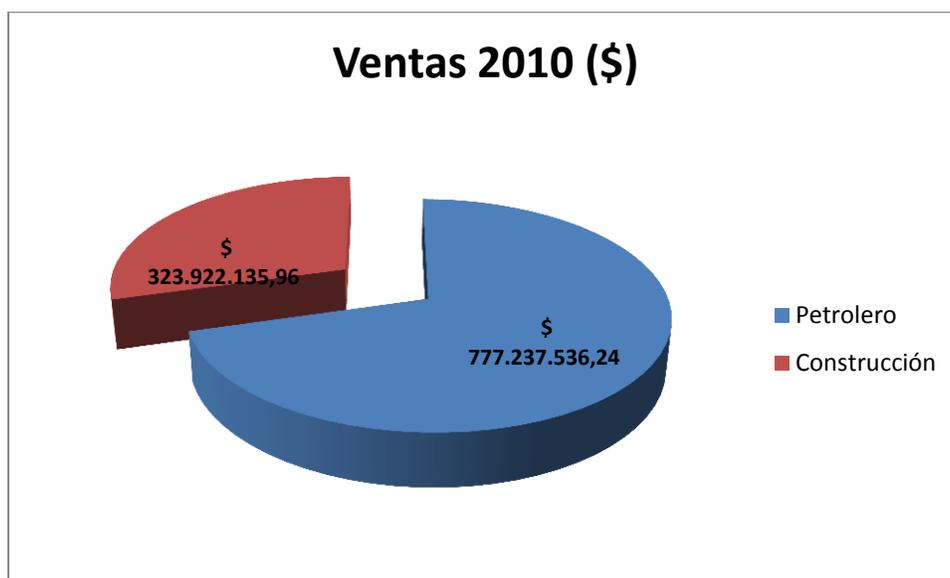
Diagrama 3. Diagrama de Operaciones.

### 5.1.2.1. Análisis Diagrama de Operaciones

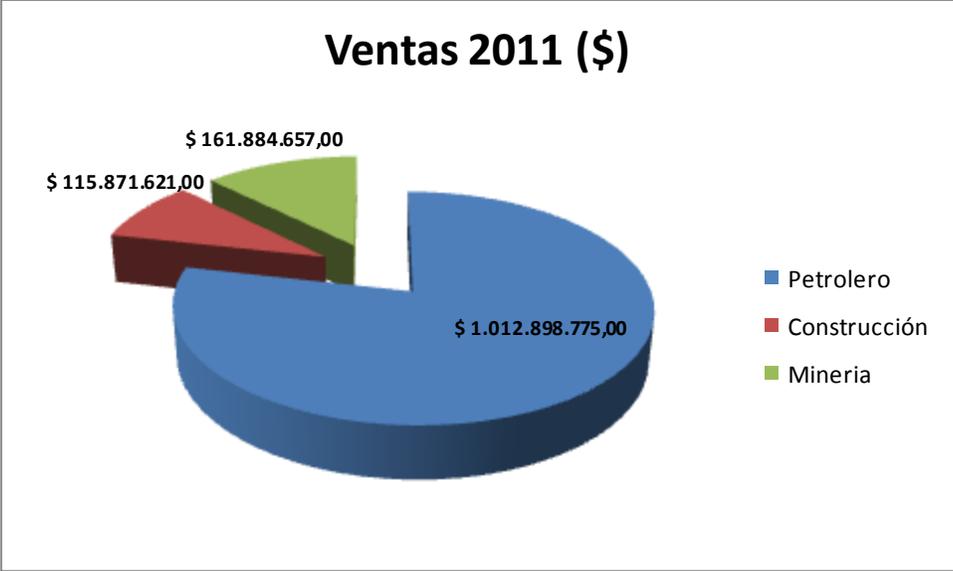
Al analizar el diagrama de operaciones se evidencia que cada pieza del módulo se ajusta a un flow shop; ya que, todas las piezas del mismo tipo deben pasar por absolutamente todas las operaciones en el mismo orden (dentro de un mismo Flow Shop).

### 5.1.3. Producto Estrella

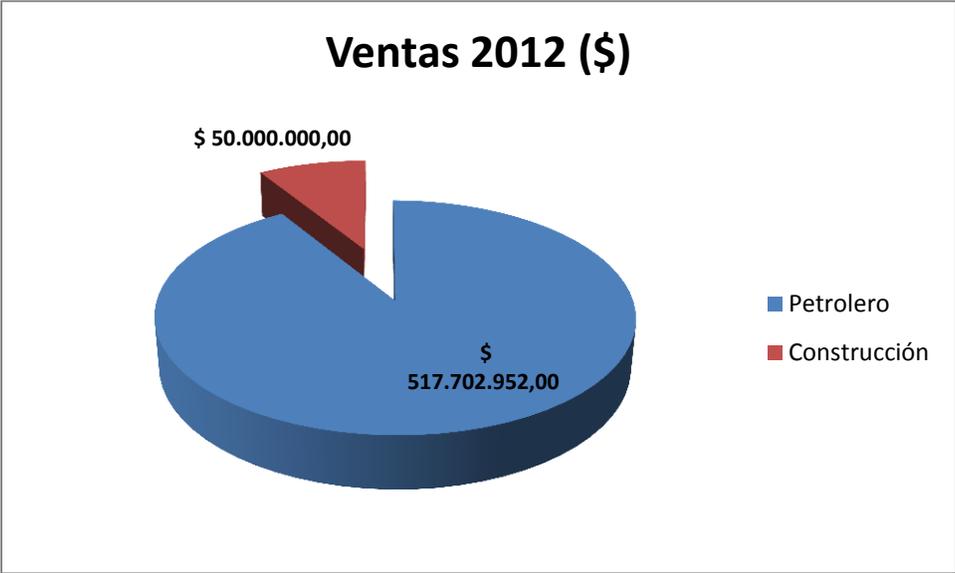
El producto estrella se determina comparando el monto correspondiente a las ventas de los 3 últimos años (2010, 2011, 2012) mediante las gráficas 1, 2 y 3. Como se muestra en estas gráficas el producto estrella de ARMO S.A.S es el módulo para petroleras.



Gráfica 1. Gráfica de Torta Ventas 2010.



Gráfica 2. Gráfica de Torta Ventas 2011.

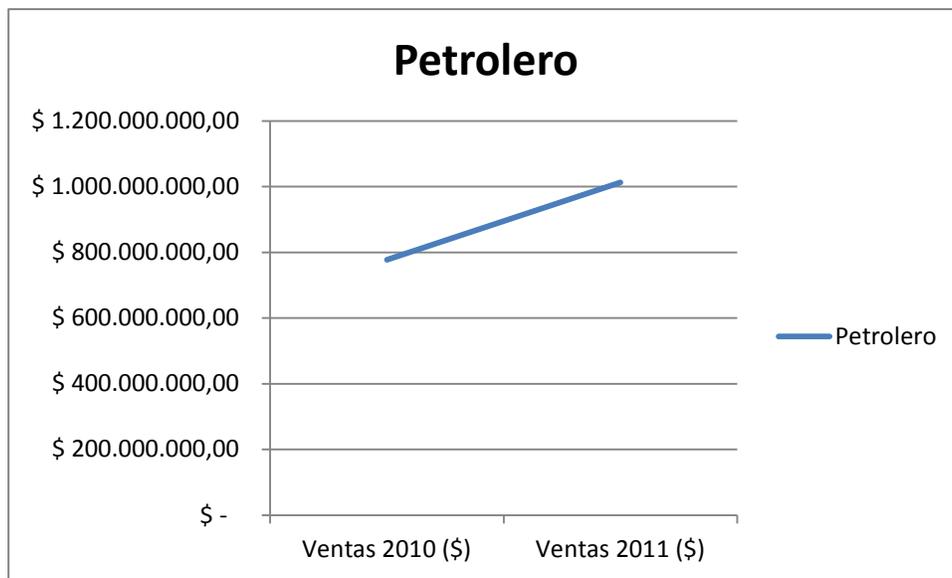


Gráfica 3. Gráfica de Torta Ventas 2012.

### 5.1.3.1. Análisis del Producto Estrella

Los módulos diseñados para petroleras se incluyen en el portafolio en el año 2010 y como se evidencia en la Gráfica 4, desde entonces sus ventas tienen una tendencia creciente. En 2010 los módulos para petroleras representaban el 71% de las ventas, y en lo corrido de 2012 representan el 91%. Adicionalmente, este producto tiene el mayor margen de utilidad: el 40%, por lo que representa las mayores ganancias para la compañía.

Con base en los anteriores argumentos se puede afirmar que se debe trabajar para mejorar el proceso de producción de este módulo, ya que genera el mayor impacto sobre las utilidades.



Gráfica 4. Ventas Modulo para petroleras (2010 y 2011).

### 5.1.4. BOM (Bill Of Material)

Con la lista de materiales se puede conocer en detalle los materiales y las cantidades necesarias para producir un módulo de petrolera de 5,5\*2,5 metros, como se evidencia en el Anexo 3.

Ventana 0,7\*0,8 aluminio  
vidrio 3+3 laminado  
**(2,16,5,1) 5**

El número que acompaña la codificación (5) es la cantidad requerida para los 5 módulos analizados. Los números que se encuentran en paréntesis en cada recuadro, son la codificación de la lista. La codificación usada en el BOM consiste en:

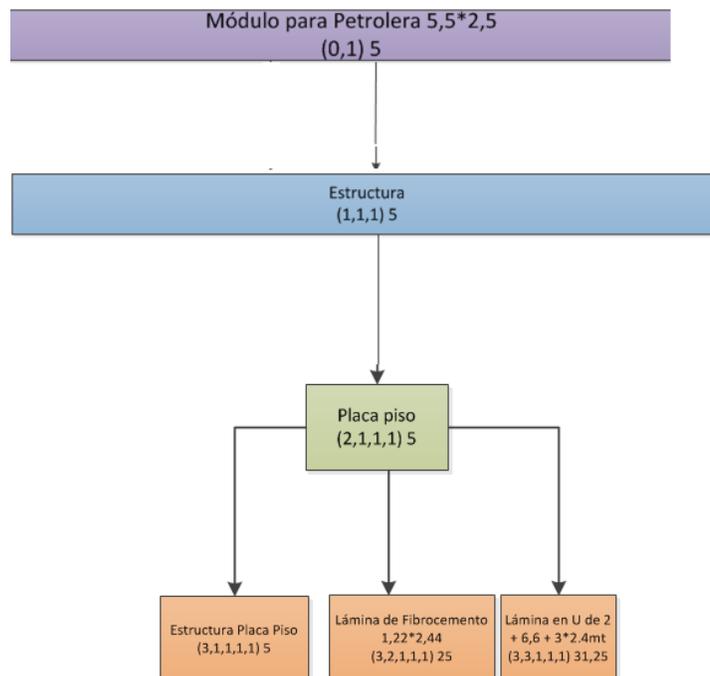
1. El primer número es el nivel al que pertenece el material, para este caso puntual los niveles son: 0, 1, 2, 3. La escala de colores se presenta en la Tabla 2.

Codigo de colores	
Niveles	Colores
0	
1	
2	
3	

Tabla 2. Código de Colores

2. El segundo número denota la posición de izquierda a derecha en la que se encuentra el material en el BOM.
3. El siguiente número es su Padre, esto quiere decir, el material de siguiente menor nivel al que pertenece.
4. El cuarto es el padre de su Padre.
5. Y el último número es el Padre del Padre de su Padre.

Ejemplo:



La lámina de fibrocemento se encuentra en el nivel 3 en la segunda posición. Su padre es Placa Piso, el padre de su padre es Estructura y el padre del padre de su padre es módulo para petrolera 5,5x2,5 metros.

## 6. Modelo Flow Shop Anidado

A continuación se muestra el planteamiento, la formulación y los resultados del Modelo de Flow Shop anidado para ARMA S.A.S.

### 6.1. Planteamiento

Como se mostró anteriormente en el diagrama de operaciones (Diagrama 3) el procesamiento de cada pieza del módulo se asemeja a un Flow Shop, por lo tanto se plantea un modelo matemático de un Flow Shop para cada línea de proceso; sin embargo, los diferentes Flow Shop separados no aportan información que permita elaborar el programa de producción. Se vuelve entonces necesario, la unificación de cada uno de los Flow Shop en uno solo, que busque determinar el mejor orden de procesamiento de piezas.

El “Modelo Flow Shop Anidado”, como se ha denominado el Flow Shop que une todas las piezas del módulo, tiene por objetivo minimizar el *Makespan* (Ver Marco Teórico) del proceso de producción para los  $n$  módulos del producto estrella de la compañía.

#### 6.1.1. Metodología

El Modelo Flow Shop Anidado cuenta con cuatro variables.

- $x_{i,j,k,l}$ : una variable binaria que toma el valor de 1 si el módulo  $j$  se procesa en la operación  $i$  en la posición  $k$  con la máquina  $l$ .
- $s_{i,j,l}$ : tiempo de inicio de la operación  $i$  del módulo  $j$  con la máquina  $l$ .
- $c_{i,j,l}$ : tiempo de terminación de la operación  $i$  del módulo  $j$  con la máquina  $l$ .
- *Makespan*: La variable a minimizar que corresponde al mayor tiempo de terminación de la última operación.

Parámetros:

- $H_{i,l}$ : toma el valor de 1 si la operación  $i$  se hace en la máquina  $l$  y es 0 en otro caso
- $P_i$ : que es el tiempo de proceso de la operación  $i$  en minutos.
- $M$ : un número muy grande.

Los valores de  $H_{ij}$  y  $P_i$  fueron suministrados por el Gerente General de la compañía Jorge Enrique Lleras Matamoros.

La pieza del módulo sobre la cual se ensamblan todas las demás piezas es el Skid, entonces se toma éste como base estructural de todo el modelo, dentro de cada Flow Shop la combinación operación máquina es única; es decir, cada operación tiene una sola máquina. Sin embargo, una misma máquina se puede usar para diferentes operaciones dentro de diferentes Flow Shop, por lo que se deben diseñar restricciones de simultaneidad.

Se generan también restricciones de precedencia y orden de proceso que garantizan que las piezas del módulo sean procesadas en su totalidad antes de entrar a ser parte de la línea del Skid; además, se asegura que entre en el tiempo correcto según lo determina el diagrama de proceso. De esta forma se logra anidar los Flow Shop pequeños con el Flow Shop de la base estructural (Skid).

Cada operación cuenta con un tiempo de inicio, un tiempo de procesamiento y un tiempo de fin. Se incluyen restricciones para garantizar que el tiempo de fin sea siempre mayor al tiempo de inicio más el tiempo de procesamiento en cada operación y para cada módulo. Así mismo, hay una restricción que asegura que si el tiempo de inicio de una operación específica para un módulo es mayor que la de otro módulo, entonces el primer módulo siempre va a estar en una posición siguiente a la del segundo.

Como todo modelo de Flow Shop, el Modelo Flow Shop Anidado cuenta con restricciones de asignación en donde se asegura que sólo haya un módulo en cada posición; otra para que todos los módulos pasen por todas las operaciones, y otra para que un módulo sólo pueda pasar una vez por cada operación.

Por último, existe una restricción que garantiza que la variable Makespan tome el mayor valor del tiempo de terminación de la última operación.

## 6.2. Formulación

A continuación se presenta la formulación matemática de un Flow Shop independiente y enseguida el Modelo Flow Shop Anidado. Con sus respectivos conjuntos, parámetros, variables, restricciones y función objetivo.

### 6.2.1. Flow Shop: Cubierta

El Flow Shop independiente que se muestra a continuación es correspondiente a la cubierta.

CONJUNTOS

*I*: Operación  $i = 20,21,22,23,24,25$

$J$ : Módulos  $j = 1, \dots, n$

$K$ : Posición  $k = 1, \dots, n$

$L$ : Máquina  $l = 1, 3, 8, 6, 5, 10$

VARIABLES

$x_{ijkl} = \begin{cases} 1 & \text{si el módulo } j \text{ se procesa en la operación } i \text{ en la posición } k \text{ con la máquina } l \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$

$s_{ijl}$  = Tiempo de inicio de la operación  $i$  con la máquina  $l$  del módulo  $j$

$c_{ijl}$  = Tiempo de terminación de la operación  $i$  con la máquina  $l$  del módulo  $j$

Makespan = Tiempo máximo de terminación de la operación 25 para los  $n$  módulos

PARÁMETROS

$P_i$  = Tiempo de proceso de la operación  $i, \forall i \in I$

$M = 10000$

$H_{il} =$

	Taladro	Soldador	Martillo	Tronzadora	Pulidora	Taladro de Arbol	Compresor	Esmertil	Llaves	Flexometro	Nivel	Oxi corte	Herramientas Generales	Alicates	Taladro atornillador	Herramientas de acabado	Prensa manual	Destornilladores
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

RESTRICCIONES

1. Una posición  $k$  en una operación  $i$  es ocupada por un sólo módulo  $j$  y una máquina  $l$ .

$$\sum_{\forall l} \sum_{j=1}^n x_{ijkl} = 1 ; \forall k, \forall i$$

2. Para cada módulo  $j$  procesado en la operación  $i$  con la máquina  $l$  sólo puede existir una posición  $k$ .

$$\sum_{k=1}^n x_{ijkl} = 1 ; \forall j, \forall i, \forall l$$

3. Para cada operación  $i$  de cada módulo  $j$  hay solo una posición  $k$  y una máquina  $l$ .

$$\sum_{\forall l} \sum_{k=1}^n x_{ijkl} = 1 ; \forall j, \forall i$$

4. Si el tiempo de terminación de un módulo  $r$  es menor o igual al tiempo de inicio de un módulo  $j$ , entonces, el módulo  $j$  esta en la siguiente posición del módulo  $r$ .

$$s_{ijl} + M(1 - x_{ijkl}) \geq c_{irl} - M(1 - x_{irk-1l}) ; \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall r \in J, r \neq j$$

5. Que el tiempo de terminación sea mayor o igual al tiempo de inicio más el tiempo de procesamiento.

$$c_{ijl} \geq s_{ijl} + P_i \forall j, \forall i, \forall l | H_{il} = 1$$

Las restricciones 6 a la 12 aseguran el orden de procesamiento.

$$6. s_{21,j,5} \geq c_{20,j,10} ; \forall j$$

$$7. s_{22,j,6} \geq c_{21,j,5} ; \forall j$$

$$8. s_{23,j,8} \geq c_{22,j,6} ; \forall j$$

$$9. s_{24,j,3} \geq c_{23,j,8} ; \forall j$$

$$10. s_{25,j,1} \geq c_{24,j,3} ; \forall j$$

11. Le asigna a la variable "Makespan" el valor del tiempo máximo de terminación del último módulo en la última operación.

$$Makespan \geq c_{25,j,1} ; \forall j$$

12. Para que el módulo siempre tenga la misma posición y se reduzca el tiempo ejecución ya que en este caso orden de la posición no afecta el valor de la función objetivo.

$$x_{ijkl} = x_{pjkml} ; \forall i \in I, \forall p \in I, \forall j \in J, \forall m \in L, \forall l \in L, \forall k \in K$$

13. Restricciones de no negatividad.

$$s_{ijl}, c_{ijl} \geq 0 ; \forall j, \forall i, \forall l$$

## FUNCIÓN OBJETIVO

Consiste en minimizarla variable Makespan.

$$\min Z = Makespan$$

Esta formulación se replica de la misma forma para los siguientes Flow Shop (Columnas, Muros y Riel).

### 6.2.2. Modelo Anidado

La formulación matemática del Modelo Flow Shop Anidado, el cual une todos los Flow Shop independientes se muestra a continuación:

#### CONJUNTOS

$I$ : Operación  $i = 1, \dots, 27$

$J$ : Módulo  $j = 1, \dots, n$

$K$ : Posición  $k = 1, \dots, n$

$L$ : Máquina  $l = 1, \dots, m$

#### VARIABLES

$$x_{ijkl} = \begin{cases} 1 & \text{si el módulo } j \text{ se procesa en la operación } i \text{ en la posición } k \text{ de la máquina } l \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$s_{ijl}$  = Tiempo de inicio de la operación  $i$  del módulo  $j$  en la máquina  $l$

$c_{ijl}$  = Tiempo de terminación de la operación  $i$  del módulo  $j$  en la máquina  $l$

La siguiente variable binaria garantiza que se cumplan las restricciones disyuntivas (6 y 7).

$$y \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

$Makespan$  = Tiempo máximo de terminación de la operación 26 del último módulo

#### PARÁMETROS

$P_i$  = Tiempo de proceso de la operación;  $\forall i$

$$H_{il} = \begin{cases} 1 & \text{si la operación } i \text{ se hace en la máquina } l \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}; \forall l, \forall i$$

$$M = 10000$$

#### RESTRICCIONES

1. Una posición  $k$  en una operación  $i$  es ocupada por un sólo módulo  $j$  y una máquina  $l$ .

$$\sum_{\forall l} \sum_{j=1}^n x_{ijkl} = 1; \forall k, \forall i$$

2. Para cada módulo  $j$  procesado en la operación  $i$  con la máquina  $l$  sólo puede existir una posición  $k$ .

$$\sum_{k=1}^n x_{ijkl} = 1; \forall j, \forall i, \forall l | H_{il} = 1$$

3. Para cada operación  $i$  de cada módulo  $j$  hay solo una posición  $k$  y una máquina  $l$ .

$$\sum_{\forall l} \sum_{k=1}^n x_{ijkl} = 1; \forall j, \forall i$$

4. Si el tiempo de terminación de un módulo  $r$  es menor o igual al tiempo de inicio de un módulo  $j$ , entonces, el módulo  $j$  está en la siguiente posición del módulo  $r$ .

$$s_{ijl} + M(1 - x_{ijkl}) \geq c_{irl} - M(1 - x_{i,r,k-1,l}); \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall r \in J, \forall l \in L | r \neq j, k \geq 2$$

5. Que el tiempo de terminación sea mayor o igual al tiempo de inicio más el tiempo de procesamiento.

$$c_{ijl} \geq s_{ijl} + P_i \quad \forall j, \forall i, \forall l | H_{il} = 1$$

Las restricciones 6 y 7 son restricciones disyuntivas que garantizan que no se hagan operaciones simultáneas con la misma máquina.

$$6. s_{ijl} \geq c_{prl} - My; \forall i \in I, \forall p \in I, \forall j \in J, \forall r \in J, \forall l \in L | p > i$$

$$7. s_{prl} \geq c_{ijl} - M(1 - y); \forall i \in I, \forall p \in I, \forall j \in J, \forall r \in J, \forall l \in L | p > i$$

8. Para conservar el orden de procesamiento en todas las operaciones durante todo el proceso y se reduzca el tiempo ejecución ya que en este caso orden de la posición no afecta el valor de la función objetivo.

$$x_{ijkl} = x_{pjkm}; \forall i \in I, \forall p \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall m \in L | i < p$$

Las restricciones de la 9 a la 33 son de orden de procesamiento y precedencia.

$$9. s_{3,j,12} \geq c_{2,j,10} \quad \forall j$$

$$10. s_{4,j,7} \geq c_{3,j,12} \quad \forall j$$

$$11. s_{5,j,2} \geq c_{4,j,7} \quad \forall j$$

$$12. s_{5,j,2} \geq c_{1,j,13} \quad \forall j$$

$$13. s_{6,j,1} \geq c_{5,j,2} \quad \forall j$$

14.  $s_{7,j,11} \geq c_{6,j,1} \quad \forall j$
15.  $s_{8,j,16} \geq c_{7,j,11} \quad \forall j$
16.  $s_{10,j,4} \geq c_{9,j,10} \quad \forall j$
17.  $s_{11,j,6} \geq c_{10,j,4} \quad \forall j$
18.  $s_{12,j,2} \geq c_{11,j,6} \quad \forall j$
19.  $s_{13,j,7} \geq c_{12,j,2} \quad \forall j$
20.  $s_{15,j,9} \geq c_{14,j,4} \quad \forall j$
21.  $s_{15,j,9} \geq c_{13,j,7} \quad \forall j$
22.  $s_{15,j,9} \geq c_{8,j,16} \quad \forall j$
23.  $s_{16,j,3} \geq c_{15,j,9} \quad \forall j$
24.  $s_{17,j,14} \geq c_{16,j,3} \quad \forall j$
25.  $s_{18,j,17} \geq c_{17,j,14} \quad \forall j$
26.  $s_{19,j,18} \geq c_{18,j,17} \quad \forall j$
27.  $s_{21,j,5} \geq c_{20,j,10} \quad \forall j$
28.  $s_{22,j,6} \geq c_{21,j,5} \quad \forall j$
29.  $s_{23,j,8} \geq c_{22,j,6} \quad \forall j$
30.  $s_{24,j,3} \geq c_{23,j,8} \quad \forall j$
31.  $s_{25,j,1} \geq c_{24,j,3} \quad \forall j$
32.  $s_{26,j,15} \geq c_{25,j,1} \quad \forall j$
33.  $s_{26,j,15} \geq c_{19,j,18} \quad \forall j$

34. Le asigna a la variable "Makespan" el valor del tiempo máximo de terminación del último módulo en la última operación.

$$\text{Makespan} \geq c_{26,j,15} ; \quad \forall j$$

35. Restricción de no negatividad

$$s_{ijl}, c_{ijl} \geq 0; \quad \forall j, \forall l, \forall i$$

## FUNCIÓN OBJETIVO

Consiste en minimizarla variable Makespan.

$$\min Z = \text{Makespan}$$

### 6.3. Modelo Anidado para ARMO S.A.S

El Modelo Anidado se programó en LPSolve con los datos reales de ARMO S.A.S. adjuntos en el Anexo 4, ya que se considera que la sintaxis del programa es sencilla y es una herramienta fácil de usar; además de ser una herramienta con la que ya se había trabajado antes en el transcurso de la carrera y no requiere licencia.

A continuación se ejecuta el modelo para tres escenarios, el mes de mayor ventas en el 2011 (12 módulos), aunque en el mes de menores ventas se produce 1 módulo si se corre el modelo para este valor no se ve una optimización de tiempo ya que la producción real y la modelada tienen el mismo valor, es por esto que se decide correr el modelo para el siguiente mes de menores ventas (3 módulos), y el mes de ventas promedio considerado como el escenario normal; según los datos de la Tabla 4. Ventas mensuales ARMOS S.A.S 2011.

Se toma para el escenario normal un  $n=5$  que corresponde al promedio mensual de módulos para petroleras. La cantidad de módulos analizados se obtiene al realizar un promedio de las ventas del producto estrella desde Enero de 2010 y hasta Diciembre de 2011. Como se muestra en la Tabla 3. Ventas mensuales ARMO S.A.S 2010 y Tabla 4. Ventas mensuales ARMOS S.A.S 2011.

El tiempo de ejecución del modelo con los datos de ARMO S.A.S es de 16,86 segundos. Obteniendo como resultado una solución óptima y tres soluciones factibles.

Ventas Mensuales 2010 ARMO S.A.S		
Mes	Tipo de Módulo	
	Construcción	Petrolero
ene-10	6	
feb-10	2	3
mar-10	1	5
abr-10	2	
may-10	2	1
jun-10	17	6
jul-10	2	6
ago-10		10
sep-10		2
oct-10		5
nov-10	4	9
dic-10	9	7
<b>Promedio Mes</b>	<b>3,75</b>	<b>4,5</b>

Tabla 3. Ventas mensuales ARMO S.A.S 2010

Ventas Mensuales 2011 ARMO S.A.S			
Mes	Tipo de Módulo		
	Construcción	Petrolero	Minero
ene-11	1	3	
feb-11	3	4	1
mar-11		5	
abr-11	2	2	
may-11		3	4
jun-11		12	
jul-11		8	
ago-11			7
sep-11	1	6	
oct-11		5	
nov-11	3	9	3
dic-11		1	
<b>Promedio Mes</b>	<b>0,833333333</b>	<b>4,83333333</b>	<b>1,25</b>

Tabla 4. Ventasmensuales ARMO S.A.S 2011.

Como se evidencia en las tablas anteriores el promedio mensual de módulos para petroleras producido por ARMO S.A.S está alrededor de 4,83 pero las ventas de la compañía están en ascenso razón por la cual se realizó el planteamiento del modelo con 5 módulos.

El tipo de contratación de mano de obra utilizado por ARMO S.A.S es por medio de subcontratos. Este modelo contempla únicamente un juego de máquinas o, en otras palabras, un sólo grupo subcontratado, pero actualmente se trabajan con 4 de estos grupos. Cada grupo cuenta con su propia maquinaria; sin embargo, la formulación se realizó sólo para un grupo, aunque se puede replicar para los 4 ya que son independientes.

La matriz  $H_{ij}$  que proporciona las combinaciones válidas de operación-máquina utilizada para la propuesta del programa de producción de la ARMO S.A.S se presenta en la Tabla 5. Matriz  $H_{ij}$ .

Dentro de las restricciones dispuestas en LPSolve, se programó el modelo de forma tal que sólo evalué las combinaciones válidas de Operación y Máquina. Es decir, cuando  $H_{il}$  es igual a 1, esto con el ánimo de disminuir el tamaño de las restricciones y el tiempo de ejecución del modelo.

Taladro	Soldador	Martillo	Tronzadora	Pulidora	Taladro de Árbol	Compresor	Esmeril	Llaves	Flexometro	Nivel	Oxi corte	Herramientas Generales	Alicates	Taladro atornillador	Herramientas de acabado	Prensa manual	Destornilladores
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5. Matriz  $H_{il}$

La numeración de las máquinas se presenta en la Tabla 6. Máquinas

#	Máquina
1	Taladro
2	Soldador
3	Martillo
4	Tronzadora
5	Pulidora
6	Taladro de Árbol
7	Compresor
8	Esmeril
9	Llaves
10	Flexómetro
11	Nivel
12	Oxi corte
13	Herramientas Generales
14	Alicates
15	Taladro atornillador
16	Herramientas de acabado
17	Prensa manual
18	Destornilladores

Tabla 6. Máquinas.

Finalmente, el valor del parámetro M se estableció arbitrariamente en 10.000 para los escenarios normal y de menores ventas y en 100.000 para el escenario de mayores ventas.

### 6.3.1. Resultados

#### 6.3.1.1 Escenario Normal

La variable  $x_{ijkl}$  es igual a uno (1) para 130 de 654 combinaciones. Cada operación tiene asignado cada uno de los módulos una sola vez, y cada módulo tiene sólo una posición en cada operación, así como se muestra en la Tabla 7. Resultados  $x_{1,j,k,13}$ . En esta tabla se presenta la operación 1 la cual se realiza con la máquina 13, se observa que únicamente se activan 5 variables correspondientes a cada uno de los cinco módulos. Los resultados se comportan de igual manera para las otras 25 operaciones.

VARIABLES	RESULTADO
$x[1,1,3,13]$	1
$x[1,2,1,13]$	1
$x[1,3,2,13]$	1
$x[1,4,4,13]$	1
$x[1,5,5,13]$	1

Tabla 7. Resultados  $x_{1,j,k,13}$ .

Los valores que se obtienen para la variable  $s_{ijl}$  corresponden al tiempo de inicio del módulo j en la operación i con la máquina l. Los resultados se presentan en la Tabla 8. Resultados  $s_{ijl}$ , donde las filas corresponden al módulo j y las columnas, a la operación i.

		TIEMPO DE INICIO (S)																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	120	10	247	487	727	847	907	2107	265	385	1507	1687	1867	985	2587	3547	3787	4027	4507	865	4087	4387	4687	4867	5167	5467
	2	0	0	5	7	247	367	427	667	25	145	265	1327	1507	745	1627	2107	2347	2587	2827	625	745	3787	4087	4267	4567	4747
	3	60	5	10	247	487	607	667	1627	145	265	1327	1507	1687	865	2107	2587	2827	3787	4027	745	3787	4087	4387	4567	4867	5227
	4	180	15	487	727	967	1087	1147	2587	385	505	1687	1867	2047	1105	3067	3787	4027	4507	4987	985	4387	4687	4987	5167	5527	5707
	5	240	20	727	967	1207	1327	1387	3367	505	625	1867	2047	2227	1225	3547	4027	4267	5227	5467	1105	4687	4987	5287	5467	5767	5947

Tabla 8. Resultados  $s_{ijl}$ .

La variable  $c_{ijl}$  hace referencia al tiempo de terminación del módulo j en la operación i con la máquina l. Los resultados se presentan en la Tabla 9. Resultados  $c_{ijl}$ .

		TIEMPO DE FIN (C)																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	180	15	487	727	847	907	1027	2587	385	505	1687	1867	1987	1105	3067	3787	4027	4507	4987	985	4387	4687	4867	5167	5467	5707
	2	60	5	7	247	367	427	667	1627	145	265	1327	1507	1627	865	2107	2347	2587	2827	3307	745	3787	4087	4267	4567	4747	4987
	3	120	10	247	487	607	667	907	2107	265	385	1507	1687	1807	985	2587	2827	3787	4027	4507	865	4087	4387	4567	4867	5167	5467
	4	240	20	727	967	1087	1147	1387	3067	505	625	1867	2047	2167	1225	3547	4027	4267	4987	5467	1105	4687	4987	5167	5467	5707	5947
	5	300	25	967	1207	1327	1387	3367	3547	625	745	2047	2227	2347	1345	4027	4267	5227	5467	5947	1225	4987	5287	5467	5767	5947	6187

Tabla 9. Resultados  $c_{ijl}$ .

Para analizar los resultados del modelo anidado se comparan los valores obtenidos para  $s_{ijl}$  y  $c_{ijl}$  de manera conjunta, verificando que no se viole ninguna de las restricciones planteadas.

Por ejemplo analizando el diagrama Gantt adjunto a este documento, el módulo 3 inicia la operación 2 en el minuto 5 y termina en el minuto 10. Inmediatamente después inicia la operación 3 y se tarda 237 minutos en salir de ésta; es decir, en el minuto 147. Cabe preguntarse entonces, si el tiempo de procesamiento de la operación 3 es igual a 2 minutos ( $P_3=2$ ) minutos ¿Por qué se demora 237 minutos? Esto se debe a que desde el minuto 7 hasta el 247 la máquina 7 con la que se realiza la operación 4 se encuentra procesando el módulo 2. Por lo tanto, podría decirse que el modelo pone en espera el módulo 3 mientras el módulo 2 libera la máquina.

Para visualizar y comprender de una mejor manera los resultados del Modelo Anidado, se presentan dos diagramas de Gantt. Anexo 5 - Diagrama de Gantt Operaciones y Anexo 6 - Diagrama de Gantt por máquina. El tiempo que tarda en cada operación se muestra dentro de cada casilla; es la diferencia entre  $c_{ijl}$  y  $s_{ijl}$ . La escala de tiempo utilizada en estos diagramas se encuentra en minutos y no conserva la misma proporción debido a la extensión de los mismos, solo muestran los tiempos en los que una operación inicia o termina.

En este diagrama se puede visualizar que los cinco módulos son procesados en las 26 operaciones; además las restricciones de simultaneidad se están cumpliendo completamente. Por ejemplo, el módulo 2 se opera en el mismo intervalo de tiempo en las operaciones 1,2,3,4,5,6, ya que éstas se realizan con máquinas diferentes. Así mismo se puede observar que los trabajos entran en cola o en espera cuando una máquina está ocupada.

Igualmente se evidencia que el orden de procesamiento dentro de cada operación es el mismo.

Se observa que una máquina no tiene más de un trabajo en un intervalo de tiempo determinado y que el tiempo improductivo de la máquina es mínimo.

El resultado óptimo de la variable Makespan es de 6187 minutos equivalentes a 13 días (de 8 horas) para los 5 módulos. Los resultados arrojados por LPSolve se muestran en la Tabla 10. Valores de la Función Objetivo.

Solución	Valor de la Función Objetivo
Primera Solución Factible	6186,999999999999
Segunda Solución Factible	6186,999999999886
Solución Óptima	6186,99999999766

Tabla 10. Valores de la Función Objetivo en el Escenario Normal.

Las tablas con los resultados y los valores de las variables se encuentran en el Anexo 7 – Tablas de Resultados.

### 6.3.1.2 Escenario de mayores ventas

Al ejecutar el modelo en LPSolve con 12 unidades, no encuentra una solución óptima después de correrlo durante poco menos de 2 días. Sin embargo, se obtienen 10 soluciones factibles muy cercanas entre ellas, la cuales sólo varían a partir del séptimo decimal. Se toma la última solución obtenida para realizar el programa de producción.

El resultado de la variable Makespan es de 13.327 minutos equivalentes a 28 días de 8 horas para los 12 módulos. Los resultados se muestran en la Tabla 11; en la actualidad la producción de estas unidades se demora un poco más de mes y medio, según datos de Jorge Enrique Lleras, Gerente de la compañía.

Como se mencionaba anteriormente, las respuestas no varían mucho entre si y el mejor valor de la función objetivo es aproximadamente 28 días lo que corresponde a 4 días más de la mitad del tiempo de producción actual (48 días). Cabe recordar que esto es con sólo un equipo de trabajo.

Solución	Valor de la Función Objetivo (min)
Primera Solución Factible	13326,9999999997
Segunda Solución Factible	13326,9999999960
Tercera Solución Factible	13326,9999999845
Cuarta Solución Factible	13326,9999999298
Quinta Solución Factible	13326,9999996927
Sexta Solución Factible	13326,9999993699
Septima Solución Factible	13326,9999991914
Octava Solución Factible	13326,9999989602
Novena Solución Factible	13326,9999967814
Decima Solución Factible	13326,9999960173

Tabla 11. Valores de la Función Objetivo en el escenario de mayores ventas

La variable  $x_{ijkl}$  toma el valor de uno para 312 de 3744 combinaciones; los valores obtenidos para

$s_{ijl}$  y  $c_{ijl}$  se muestran a continuación.

		Tiempo de inicio (S <sub>ijl</sub> ) min																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	420	35	1685	1687	1927	2047	2107	5587	900	1020	4087	4267	4447	2460	6667	7147	7387	7867	10687	2340	10747	10927	11227	11407	11707	12007
	2	120	10	247	487	727	847	1147	3787	300	420	3187	3367	3547	1860	4267	4747	4987	5227	5467	1740	9127	9427	9727	9907	10207	10387
	3	300	25	967	1207	1447	1567	1627	5227	660	780	3727	3907	4087	2220	5707	6187	6427	6667	6907	2100	10147	10327	10627	10807	11107	11287
	4	180	15	487	727	967	1087	1267	4267	420	540	3367	3547	3727	1980	4747	5227	5467	5707	5947	1860	9547	9727	10027	10207	10507	10687
	5	60	5	10	247	487	607	667	3307	180	300	3007	3187	3367	1740	3787	4267	4507	4747	4987	1620	8827	9127	9427	9607	9907	10087
	6	0	0	5	7	247	367	427	667	60	180	300	3007	3187	1620	3307	3787	4027	4267	4507	1500	1620	8827	9127	9307	9607	9787
	7	360	30	1207	1447	1687	1807	1867	5407	780	900	3907	4087	4267	2340	6187	6667	6907	7147	7387	2220	10447	10627	10927	11107	11407	11707
	8	540	45	1927	2167	2407	2527	2587	7147	1140	1260	4447	4627	4807	2700	7627	8587	8827	11167	11647	2580	11227	11527	11827	12007	12307	12607
	9	240	20	727	967	1207	1327	1387	4747	540	660	3547	3727	3907	2100	5227	5707	5947	6187	6427	1980	9727	10027	10327	10507	10807	10987
	10	600	50	2167	2407	2647	2767	2827	7627	1260	1380	4627	4807	4987	2820	8107	8827	9067	11647	12127	2700	11647	11827	12127	12307	12607	12847
	11	480	40	1687	1927	2167	2287	2347	6667	1020	1140	4267	4447	4627	2580	7147	7627	7867	10687	11167	2460	10927	11227	11527	11707	12007	12247
	12	660	55	2407	2647	2887	3007	3067	8407	1380	1500	4807	4987	5167	2940	8587	9067	9307	12367	12607	2820	11827	12127	12427	12607	12907	13087

Tabla 12. Resultados  $S_{ijl}$  en el escenario de mayores ventas.

		Tiempo de fin (C <sub>ijl</sub> ) min																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	180	15	487	727	847	907	1267	4267	420	540	3367	3547	3667	1980	4747	4987	5227	5467	5947	1860	9427	9727	9907	10207	10387	10627
	2	360	30	1207	1447	1567	1627	1867	5407	780	900	3907	4087	4207	2340	6187	6427	6667	6907	7387	2220	10327	10627	10807	11107	11287	11527
	3	240	20	727	967	1087	1147	1387	4747	540	660	3547	3727	3847	2100	5227	5467	5707	5947	6427	1980	9727	10027	10207	10507	10687	10927
	4	120	10	247	487	607	667	1147	3787	300	420	3187	3367	3487	1860	4267	4507	4747	4987	5467	1740	9127	9427	9607	9907	10087	10327
	5	60	5	7	247	367	427	667	3307	180	300	3007	3187	3307	1740	3787	4027	4267	4507	4987	1620	8827	9127	9307	9607	9787	10027
	6	420	35	1209	1687	1807	1867	1987	5587	900	1020	4087	4267	4387	2460	6667	6907	7147	7387	7867	2340	10627	10927	11107	11407	11707	11947
	7	600	50	2167	2407	2527	2587	2827	7627	1260	1380	4627	4807	4927	2820	8107	8827	9067	11647	12127	2700	11527	11827	12007	12307	12607	12847
	8	300	25	967	1207	1327	1387	1627	5227	660	780	3727	3907	4027	2220	5707	5947	6187	6427	6907	2100	10027	10327	10507	10807	10987	11227
	9	660	55	2407	2647	2767	2827	3067	8107	1380	1500	4807	4987	5107	2940	8587	9067	9307	12127	12607	2820	11827	12127	12307	12607	12847	13087
	10	540	45	1927	2167	2287	2347	2587	7147	1140	1260	4447	4627	4747	2700	7627	7867	8827	11167	11647	2580	11227	11527	11707	12007	12247	12487
	11	720	60	2647	2887	3007	3067	8407	8587	1500	1620	4987	5167	5287	3060	9067	9307	12367	12607	13087	2940	12127	12427	12607	12907	13087	13327
	12	480	40	1687	1927	2047	2107	2347	6667	1020	1140	4267	4447	4567	2580	7147	7387	7867	10687	11167	2460	10927	11227	11407	11707	12007	12247

Tabla 13. Resultados  $C_{ijl}$  en el escenario de mayores ventas.

### 6.3.1.2 Escenario de menores ventas

Para realizar el análisis de este escenario se tomaron 3 módulos, y el programa después de 0,47 segundos encuentra la solución óptima del problema como se muestra en la Tabla siguiente. Además, la variable  $x_{ijkl}$  toma el valor de uno (1) para 78 para 234 combinaciones; los valores obtenidos para  $s_{ijl}$  y  $c_{ijl}$  se muestran en las Tablas 14 y 15.

		Tiempo de inicio (S <sub>ijl</sub> ) min																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	60	5	10	247	487	607	667	1147	135	255	847	1027	1207	615	1627	2227	2467	2707	2947	495	2347	2647	2947	3127	3427	3667
	2	0	0	5	7	247	367	427	667	15	135	255	847	1027	495	1147	1627	1867	2107	2347	375	495	2347	2647	2827	3127	3307
	3	120	10	247	487	727	847	907	1927	255	375	1027	1207	1387	735	2107	2587	2827	3187	3427	615	2647	2947	3247	3427	3727	3907

Tabla 14. Resultados  $S_{ijl}$  en el escenario de menores ventas.

		Tiempo de fin (C <sub>ijl</sub> ) min																									
OPERACIÓN		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
MÓDULO	1	60	5	7	247	367	427	667	1147	135	255	847	1027	1147	615	1627	1867	2107	2347	2827	495	2347	2647	2827	3127	3307	3547
	2	180	15	487	727	847	907	1927	2107	375	495	1207	1387	1507	855	2587	2827	3187	3427	3907	735	2947	3247	3427	3727	3907	4147
	3	120	10	247	487	607	667	907	1627	255	375	1027	1207	1327	735	2107	2467	2707	2947	3427	615	2647	2947	3127	3427	3667	3907

Tabla 15. Resultados  $C_{ijl}$  en el escenario de menores ventas.

Según los resultados mostrados en la tabla 16, la producción demoraría 9 días de 8 horas (4.147 minutos) una mejora significativa en comparación con los 15 días que se demora actualmente producir la misma cantidad de módulos, de acuerdo con información suministrada por el Gerente de la empresa.

Solución	Valor de la Función Objetivo (min)
Primera solución Factible	4146,999999999996
Solución Óptima	4146,999999999996

Tabla 16. Valores de la Función Objetivo en el escenario de menores ventas

Después de hacer este análisis por escenarios cabe resaltar que a medida que el número de módulos a analizar aumenta el ahorro en tiempo también crece ya que hay una mayor optimización y aprovechamiento de recursos.

## 7. MRP (Material Requirements Planning)

El MRP se realiza para conocer las fechas en las que se deben liberar las órdenes de pedido a los proveedores de acuerdo al programa de producción obtenido con el modelo de Flow Shop Anidado y, de esta forma, intentar mitigar los impactos generados por desabastecimientos que se presentan en la compañía.

La plantilla sobre la que se construye el MRP se encuentra en la Tabla 17.

Tiempo de entrega (número de periodos)	Inventario actual	Inventario de Seguridad	Codificación por nivel más bajo	Id. del artículo	
					Requerimientos Globales
					Recepción Programados
					Inventario Proyectado
					Requerimientos Netos
					Recepción de órdenes planeadas
					Liberación de órdenes planeadas

Tabla 17. Plantilla MRP.

- El tiempo de entrega hace referencia a los días que transcurren desde la liberación de la orden hasta la recepción del material.
- Inventario actual es igual a la cantidad de unidades que se encuentran en almacén en el periodo de tiempo analizado.
- Inventario de seguridad es un Stock permanente en el almacén, debido a su falta de liquidez ARMO S.A.S no cuenta con inventario de seguridad para ningún material. Si en algún momento la liquidez de la compañía permite tener inventarios de seguridad, se podría empezar la producción inmediatamente disminuyendo notablemente los tiempos de entrega a los clientes.
- La codificación por nivel más bajo, es el nivel al que pertenece el material de acuerdo con la codificación que se asigna en el BOM. (Ver explicación de codificación en el numeral 5.1.4 BOM (Bill of Material))
- Id del artículo es el nombre del material al que se está haciendo referencia.

- Los requerimientos globales son los requerimientos totales de cada material para cumplir con el pedido que se va a producir.
- Recepción programados son las entradas de material programadas en periodos anteriores. ARMO S.A.S no cuenta con este tipo de recepción ya que su demanda es variable y no se sabe con certeza en que periodo se requiere material. Además, no se puede garantizar que se cuente con liquidez para cubrir los costos en el momento de la recepción. Los valores ubicados en este campo en el MRP que se muestra a continuación, corresponden a materiales nivel 2, 1, y 0 que se encuentran terminados ese día según el programa de producción.
- Inventario proyectado, son las unidades que se encuentran disponibles en almacén en ese periodo.
- Requerimientos netos es la cantidad a ordenar, teniendo en cuenta las unidades disponibles en almacén (la diferencia entre los Requerimientos globales y el Inventario proyectado).
- Recepción de órdenes planeadas es cuando se reciben los materiales.
- Liberación de órdenes planeadas es el día en que se libera la orden a los proveedores (se efectúa el pedido de materia prima).

Se toma como fecha de entrega el día 41 porque es el tiempo que se tarda en llegar el material y procesarlo actualmente. La Tabla 18. Estructura de materiales, muestra las cantidades que se encuentran en almacén, los requerimientos netos y la cantidad a ordenar de cada material.

MATERIAL	CANTIDADES	ALMACEN	CANTIDAD A ORDENAR
ESTRUCTURA	5	0	5
PLACA PISO	5	0	5
COLUMNAS	30	0	30
ESTRUCTURA CUBIERTA	5	0	5
MARCA	5	30	0
PINTURA	5	20	0
CUBIERTA	5	0	5
ESTRUCTURA PLACA PISO (SKID + PLATAFORMA)	5	0	5
LÁMINA FIBROCEMENTO	25	0	25
TUBO 50x50x2,5 mm x 6 mts	15	0	15
TUERCA 3/8	90	1000	0
PLATINA CUADRADA	60	100	0
BARILLA ROSCADA	60	1000	0
PINTURA ANTICORROSIVO	5	20	0
PERLIN	15	0	15
LÁMINA EN U	62,5	0	62,5
PLATINA ANGULADA	20	20	0
TUBO 25,5x25,5x2,5 mm x 6 mts	10	0	10
ALUMINIO PERFORADO	5	30	0
PINTURA EPOXICA PARA AMBIENTES MARINA	5	20	0
PANELES RBS	440	0	440
TEJAS	120	0	120
SICAFLEX	5	20	0
SILICONA	5	20	0
MARCO RBS PUERTA	5	0	5
MARCO VENTANA	5	0	5
CALCOMANIA ARMO	5	50	0
CALCOMANIA PLACA TÉCNICA	5	50	0
CALCOMANIA SISTEMA ELÉCTRICO	5	50	0
PISO CUADROS	5	0	5
SOLUCIÓN DE CAUCHO	2,5	15	0
CUADROS 2093	55	0	55
CERRADURA	5	20	0
BISAGRA	15	40	0
PANEL TÉRMICO	5	0	5
PIRLAN DE ALFAJOR DE ALUMINIO	0,5	40	0
GOTERO	10	30	0
VIDRIO VENTANA	5	0	5
SISTEMA ELÉCTRICO	5	0	5
MÓDULO PARA PETROLERA	5	0	5
CERRAMIENTO PANELES PVC	5	0	5
PUERTA	5	0	5
VENTANA	5	0	5
CALCOMANÍAS	5	50	0
MUROS	20	0	20
LÁMINA MARCADA	5	30	0

Tabla 18. Estructura de Materiales.

Para entender mejor como se elabora el MRP se muestran los siguientes ejemplos.

Ejemplo 1. Material nivel 1 (Estructura) se necesitan 5 unidades, 2 el día 32 o el día 4 de producción y 3 unidades el siguiente día. Estos tiempos se obtienen del programa de producción. Como se trata de un material nivel 1 compuesto por varios materiales nivel 2 y nivel 3, estos deben estar en almacén el día 29. Se libera la orden el día cero de producción (día 28). El material recibido el día 29 se considera en inventario a partir del día 30 hasta el día 32 cuando se producen 2 estructuras y hasta el día 33 cuando se termina la construcción de estructura.

Ejemplo 2. Material nivel 2 (Placa piso) la orden se libera el día cero de producción los materiales nivel 3 que componen Placa piso deben estar en almacén para iniciar la producción el día 29. Se necesitan 2 unidades el día 30 y 31 respectivamente y una el 36.

Ejemplo 3. Material nivel 3 (Estructura placa piso) se requiere que las 5 unidades necesarias se encuentren en almacén el día cero de producción. Como el tiempo de entrega son 3 días, se libera la orden el día 25.

A continuación se presenta el MRP elaborado para ARMO S.A.S. Los tiempos de entrega de cada material fueron suministrados por Jorge Enrique Lleras Gerente General. La línea roja marca el inicio de la producción.

















## 7.1. Análisis del MRP (Material Requirements Planning)

Aplicando los resultados del modelo, la producción de 5 módulos se lleva a cabo en 13 días, algo que actualmente toma aproximadamente 20 días. Se evidencia que el primer pedido de material se hace el día 13, el primer material a ordenar son los paneles térmicos lo que supone una disminución de 13 días en la entrega de los módulos al cliente.

Para poder cumplir con la entrega en el día 41, todos los materiales nivel 3 deben estar en almacén el día 28. El día en que se libera la orden depende del nivel del material que se esté analizando; por ejemplo, se libera la orden de los materiales que pertenecen al nivel 3 antes de los del nivel 2 y así sucesivamente, ya que como se muestra en el BOM estos materiales son necesarios para la producción de los materiales del nivel 2.

Si el mismo material se requiere para diferentes materiales nivel "Padre", se libera sólo una orden al proveedor. Por ejemplo, en la cubierta y en la puerta los paneles son los mismos, pero se considera ineficiente realizar dos órdenes de compra distintas y en diferente tiempo, ya que se trata del mismo proveedor y del mismo material.

En el caso de los materiales que se encuentran en inventario y para el análisis de los 5 módulos, se alcanza a cumplir el requerimiento de material con lo que se encuentra en Stock. Y ante la eventualidad de desabastecimiento, como lo manifiesta el Gerente general, esto impacta en un tiempo despreciable sobre la operación, ya que son materiales que se consiguen fácilmente.

La línea roja marca el inicio de la producción. Para entender con mayor profundidad la metodología aplicada se muestran los siguientes ejemplos:

**Material Nivel 0. Módulo para petrolera:** El ejercicio se realizó para cinco módulos los cuales deben ser entregados el día 41, esto corresponde a un cinco en requerimiento globales. Según los tiempos obtenidos en el programa de producción, el día 38 se termina de producir el primer módulo, el siguiente día el segundo, el día 40 se termina la producción del tercer y cuarto módulo y por último, el día 41 se produce el quinto módulo. Estas entradas se toman como recepciones programadas. En el inventario proyectado se van sumando los módulos a medida que son terminados.

**Material Nivel 1. Estructura:** Según el plan de producción obtenido en Lpsolve, El día tres de producción (31) se terminan de producir dos estructuras y el día siguiente tres; se ubican dentro del MRP como recepción planeada. El día nueve de producción (37) se necesita una estructura para continuar con el proceso productivo, el siguiente día dos y los dos días siguientes una cada uno. Estos requerimientos se ubican en Requerimientos Globales. El inventario se proyecta teniendo en cuenta las entradas de programados y restando los requerimientos globales.

**Material Nivel 2. Placa Piso:** Sigue el mismo procedimiento del material nivel 1.

Material Nivel 3. Lámina fibrocemento: Este material no se produce dentro de la empresa, por lo que se libera una orden planeada el día 1 de producción (29). Como se había mencionado antes se libera solo una orden de producción por el total de requerimientos que en este caso son 25. Se reciben el día 3 de producción (31). Se requieren 5 láminas cada día desde el día 31 hasta el día 35. Se restan al inventario las unidades “gastadas” en ese día.

La dotación no se tiene en cuenta para realizar este MRP, ya que no es estándar y varía según los requerimientos del cliente: se construyen módulos para petroleras dotados como cocinas, enfermerías, baños, comedores, habitaciones, oficinas, entre otras. Este análisis se hace para un módulo estándar de sólo una puerta y una ventana, requerimientos que también pueden variar de acuerdo a las necesidades de los clientes.

## 8. Análisis Costo Beneficio

Este análisis costo beneficio se realiza con la información financiera entregada por parte de la empresa para el año 2011. ARMO S.A.S subcontrata la mano de obra y es pagada por actividad debido a esto no se puede hacer una relación directa entre la optimización en tiempo y el ahorro en costos de producción.

En la actualidad, sólo hasta el día de entrega del producto se genera la factura para que el cliente cancele el saldo. Éste varía según el acuerdo de pago, puede ser el 100% o el 50% del valor total dependiendo si hubo anticipo o no. Se analizan tres casos: con anticipo, sin anticipo y otro suponiendo que la mitad de los meses en el año se realiza la compra con anticipo y que la otra mitad sin anticipo. Estos casos se reproducen para dos escenarios (Escenario Normal y Escenario de Mayores Ventas) No se toma el Escenario de menores ventas (3 módulos) ya que éste no se considera viable para proyectar ese mismo número de ventas todo el año.

Los costos de la elaboración e implementación de este proyecto se muestran en la siguiente tabla. Constan de las horas hombre invertidas en el desarrollo del programa de producción (modelo Flow Shop Anidado y MRP) y la capacitación del personal que lo va a ejecutar.

<b>Costos</b>		
<b>Actividad</b>	<b>Horas</b>	<b>\$</b>
Desarrollo del modelo	320	\$ 2.933.333
Implementación y capacitación	30	\$ 275.000
<b>Total</b>		<b>\$ 3.208.333</b>

Tabla 19. Costos del proyecto

### 8.1. Escenario Normal

Los beneficios de este ejercicio están compuestos por un ahorro de Intereses, ya que se reduce el tiempo de financiación, lo que significa que el préstamo que se pide para cubrir los costos de producción, se cancela 13 días antes (para este caso puntual). Y la ganancia de valor del dinero en el tiempo al tener el ingreso 13 días antes. Por ejemplo, en una venta de 5 módulos sin anticipo por un valor de \$98'750.000, se recibe el dinero en la empresa el día 41. Con esta propuesta se recibiría el día 28 y el valor de los \$98'750.000 es mayor el día 28 que el día 41. Se proyectan estas ganancias a un año, se calcula el VPN, la TIR y la relación Costo Beneficio.

En el escenario de la venta con anticipo, teniendo en cuenta que el anticipo es del 50% y los costos de producción son el 60% del precio de venta, se debe financiar el 10% restante. Al liquidar la deuda 13 días antes, se genera un ahorro de \$ 84.728 pesos mensuales y al recibir el dinero antes se está evitando una pérdida de valor de \$ 69.668 cada mes. Entonces el total del beneficio mensual para este escenario es de \$ 154.395.

Para el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) se toma como Interés de Oportunidad el WACC calculado con los valores del Balance General de ARMO S.A.S para el 2011. (Anexo 2) y se proyecta a 12 periodos cada uno con el mismo beneficio, pues se parte del supuesto de vender 5 módulos mensuales. La inversión en este caso se recupera en aproximadamente 21 meses.

En el escenario de ventas sin anticipo se debe financiar el total de los costos de producción (60% del precio de venta) por lo tanto los ahorros son mayores, el ahorro de intereses es de \$508.365 mensual y la ganancia por recibir el dinero antes equivale a \$139.335. Usando el mismo interés de Oportunidad, se obtiene un VPN de \$1'368.688, una TIR de 17% y una relación Beneficio costo de 1,43 es decir, por cada peso invertido se generan 43centavos adicionales. En el último caso (con y sin anticipo) el VPN \$ (297.142), una TIR de 7%, y una relación costo beneficio de 0,91.

## 8.2. Escenario de mayores ventas

Para este escenario se toma un ahorro en tiempo de producción de 20 días, ya que actualmente la producción de 12 módulos tarda 48 días (según información del Gerente General) y con el programa de producción se reduciría a 28. Como no se cuenta con tiempos reales en el proceso de abastecimiento, no existe una medida de comparación con respecto al proceso integrado (abastecimiento y producción). Es por esto que sólo se toman los tiempos de producción.

Analizando el caso de venta con anticipo, usando el mismo interés de oportunidad y proyectando a un año, el total del ahorro es de \$ 364.267. El Valor Presente Neto es de \$ (634.212), la TIR es de 5% y la relación costo beneficio es de 0,6.

En el caso en el que la venta se realiza sin anticipo el ahorro en intereses asciende a \$ 1.877.040 y la ganancia de valor en los 20 días es de \$ 308.564. El VPN de este ejercicio puntual es de \$12'236.394, con una TIR de 68% y una relación Costo Beneficio de 4,81 lo que significa que por cada peso invertido se generan 3,81 pesos adicionales.

Finalmente, en el caso en el cual se mezclan las dos formas de negociación (con y sin anticipo) el VPN es de \$ 6'085.969 con una Tasa Interna de Retorno igual a 44% y una relación Costo Beneficio de 2,90, o sea que por cada peso invertido se generan 1,90 adicionales. El cálculo de estos escenarios se encuentra en el Anexo 11.

En conclusión, según los resultados obtenidos la inversión se recuperaría entre 2 y 21 meses dependiendo del volumen de ventas y el tipo de pago del cliente.

Cabe resaltar que este análisis de escenarios se hace con el objetivo de mostrar que es un proyecto que genera beneficios para la empresa en ahorro de intereses y tiempo. Estos son directamente proporcionales con el volumen de producción.

Adicionalmente, se logra mejorar la liquidez de la empresa, uno de sus mayores problemas, pues al reducir el tiempo de entrega se aumenta la rotación de cartera. En el 2011 la rotación de cartera fue de 4 es decir, cada 96 días se recupera el capital de trabajo.

## 9. Conclusiones

- Como se ha mencionado anteriormente en el documento, la demanda de módulos para petroleras tiene tendencia creciente, por lo que aumentar la capacidad de producción de este tipo de módulo y por consiguiente las ventas, genera un impacto positivo en las Ganancias de la compañía.
- Con base en el estudio de procesos de la Empresa se corrobora que existe una oportunidad de mejora en el proceso productivo de la compañía, se trabaja sobre el producto estrella debido al impacto que genera sobre el portafolio de ventas de ARMO S.A.S.
- El modelo de Flow Shop Anidado es flexible y sirve para aplicarse en cualquier industria, siempre y cuando las diferentes líneas de ensamble o de proceso se comporten como un Flow Shop independiente y que en cada uno de estos sólo se utilice una máquina por operación; y, adicionalmente, que esta máquina no realice ningún otra operación dentro del mismo Flow Shop. Para aplicar el modelo de forma general no es necesario tener en cuenta la restricción número 8 ya que esta sólo se agregó para disminuir el tiempo de ejecución del modelo en LPSolve. Y no necesariamente se cumple en otros casos.
- Al utilizar como datos de entrada en el MRP los resultados obtenidos en el modelo de Flow Shop Anidado, se permite mejorar el proceso de abastecimiento y de producción reduciendo los tiempos y además conociendo las fechas en las que se deben hacer los pedidos a los proveedores, evitando desabastecimiento.
- A largo del desarrollo del Trabajo se van integrando las diferentes herramientas de ingeniería Industrial para finalmente lograr modelar la realidad bajo los conceptos de programación lineal con base a la diagramación de procesos.
- La propuesta genera ahorros en cuanto a intereses y tiempo para la compañía, que se ven reflejados en la rotación de cartera y por ende en su liquidez.

## 10. Recomendaciones

1. Al analizar la situación de ARMO S.A.S se evidencia que además de oportunidades de mejora en el proceso productivo hay otras oportunidades en el área administrativa, es importante gestionar mejoras sobre esta área ya que la administración impacta toda la empresa.
2. Como se menciona en la Situación Actual, ya se habían realizado otros estudios en aras de mejorar la situación de la empresa y estos no habían sido ejecutados con disciplina por la administración de la compañía, por lo que se recomienda tener en cuenta y seguir los lineamientos dictados en este Trabajo de Grado.

3. Capacitar al personal administrativo, más específicamente al Gerente de Producción, para que esté en capacidad de analizar y modificar el modelo de Flow Shop Anidado según sea necesario.
4. Diseñar una forma más sencilla de alimentar el modelo de MRP con los datos del modelo de Flow Shop Anidado y también, de alimentar el modelo de Flow Shop Anidado que no necesariamente suponga hacerlo desde LPSolve.
5. Crear un sistema que proporcione como resultado el esquema de producción desde que se ordenan los materiales a los proveedores, puede ser en forma de calendario o diagrama de Gantt.
6. Correr el modelo en un programa de solución de problemas de Programación Lineal. Por ejemplo GAMS, y comparar los resultados, el tiempo de ejecución y las iteraciones generadas.

## 11. Referencias

### 11.1. Bibliográficas

- Cohen, E., & Franco, R. (2006). Evaluación de proyectos sociales. México D.F: Siglo XXI Editores.
- Heizer, J., & Render, B. (2004). Principios de Administración de Operaciones. México: Pearson.
- Niebel, B., & Freivalds, A. (2001). Ingeniería Industrial, Métodos, estándares y diseño del trabajo. México D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. de C.V.
- Pinedo, M. (2008). Scheduling Theory, Algorithms and systems.
- Rodríguez, A. (2003). La Realidad de la Pyme Colombiana. Desafío para el desarrollo. Bogotá: Fundes Internacional.
- Sancho Frías, J. A. (2011). Dependiente de comercio. Málaga: Vértice.
- Winston, W. L. (1994). Investigación de Operaciones - Aplicaciones y Algoritmos -. México: Iberoamérica S.A.
- Zaragoza Martínez, F. J. (2009). Planes de obra. San Vicente: Club Universitario.

### 11.2. Entrevista con expertos

- Jorge Enrique Lleras Matamoros, Gerente general y comercial de Arquitectura Móvil S.A.S.
- Álvaro Lleras Matamoros, Gerente de Producción Arquitectura Móvil S.A.S.
- Ingeniero Carlos Alberto Vega Mejía, Profesor Guía.

### 11.3. Cibergráficas

- Arquitectura Móvil (ARMO). (s.f.). Recuperado el 21 de 09 de 2011, de <http://www.arquitecturamovil.com/>
- DANE. (s.f.). Recuperado el 06 de 09 de 2011, de [http://www.dane.gov.co/daneweb\\_V09/index.php?option=com\\_content&view=article&id=996:iniciativa-ilac&catid=101:cuentas-ambientales/](http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=996:iniciativa-ilac&catid=101:cuentas-ambientales/)
- DANE. (s.f.). Recuperado el 06 de 09 de 2011, de Encuesta anual de manufactura: [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=17&id=43&Itemid=154](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=17&id=43&Itemid=154)

- Bowers, M., & Agarwal, A. (s.f.). International Journal of Clothing Science and Technology. Recuperado el 23 de 9 de 2011, de Hierarchical production planning: Scheduling in the Apparel.: [https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f7777772e63656469726563742e636f6d\\$/science/article/pii/S0925527304003470/](https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f7777772e63656469726563742e636f6d$/science/article/pii/S0925527304003470/)
- Reay-Chen Wanga, T.-F. L. (s.f.). Science Direct. Recuperado el 23 de 09 de 2011, de Applying possibilistic linear programming to aggregate: [https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f7777772e73636965e63656469726563742e636f6d\\$/science/article/pii/S0925527304003470/](https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f7777772e73636965e63656469726563742e636f6d$/science/article/pii/S0925527304003470/)