

# Modelo matemático para la programación de la producción en compañías fabricantes de alambres y cables para la construcción

## Mathematical model for the production scheduling in manufacturers of wire and cable for building

ESCOBAR, John W. <sup>1</sup>

MARCELES GONZALES, Johann J <sup>2</sup>

QUEVEDO, Diego F <sup>3</sup>

### Resumen

Este artículo considera el problema de programación de la producción multi-etápica y multi-producto en compañías fabricantes de alambres y cables para la construcción. La problemática radica en la minimización del makespan. El problema se ha solucionado con un modelo matemático de programación lineal entera mixta considerando tiempos de producción, traslapes de tiempo y tiempos de alistamiento. El modelo se ha probado con información real obtenida de una compañía multinacional colombiana del sector. Los resultados son prominentes para el problema considerado.

**Palabras clave:** Producción, Programación, Makespan, Industria de la Construcción

### Abstract

This paper considers the problem of multi-stage and multi-product production scheduling for companies manufacturing wires and cables for construction. The main problem considers the minimization of makespan. The problem has been solved by a mathematical model of mixed-integer linear programming by considering production times, overlapping times, and setup times. The mathematical model has been tested with real information obtained from a Colombian of the sector. The results are prominent for the considered problem.

**key words:** Production, Scheduling, Makespan, Building Industry

---

## 1. Introducción

Ante la internacionalización de la economía mundial y la creciente necesidad de las organizaciones por competir en los mercados globales, se hace necesario que las cadenas de suministro sean diseñadas y operadas efectivamente construyendo el camino hacia la competitividad. La cadena de suministro o de valor está constituida por las actividades asociadas con el flujo necesario para entregar un producto al mercado y comprende los procesos de: logística de entrada (planeación y abastecimiento) (García-Cáceres and Escobar, 2016), logística de transformación (manufactura) y logística de salida (distribución, servicio al cliente y logística

---

<sup>1</sup> Associate Professor. Department of Accounting and Finance, Universidad del Valle, Cali. john.wilmer.escobar@correounivalle.edu.co

<sup>2</sup> Consultor Empresarial. D & M Consulting. jmceles@yahoo.com

<sup>3</sup> Jefe de Planeación. Empresa Privada. diegoquevedogaviria@hotmail.com

inversa). En relación con la logística de transformación, las empresas colombianas en el sector de manufactura tradicionalmente han enfocado su gestión en calidad, eficiencia y productividad. Actualmente, es necesario que los procesos de fabricación ofrezcan además diferenciación en el producto y servicio percibido por el cliente, confiabilidad y flexibilidad en tiempos de entrega y tamaños de lote; reducción en la inversión en capital de trabajo en inventarios y otros activos operativos; sostenibilidad y fuente de ventaja competitiva en mercados locales y globales.

Todo lo anterior propicia un mayor dinamismo del mercado. En el caso de Colombia se refuerza además con los programas de gobierno en cuanto a tratados de libre comercio y acuerdos multilaterales con otras economías. Esto conlleva a que la industria nacional deba replantear estrategias de mediano y largo plazo. Tal es el caso de la industria de cables de energía, la cual desarrolla un pulso constante por los mercados nacionales y norteamericano.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario implementar metodologías y herramientas de gestión orientadas hacia los objetivos estratégicos (Stump & Badurdeen, 2009). Tales metodologías incluyen Lean manufacturing (Melton, 2005), la filosofía TPS (Toyota Production System), y la Teoría de análisis de restricciones (TOC) entre otras (González & Escobar, 2008). Particularmente, en la TOC se analizan procesos que limitan la capacidad de producción y generan acumulación de inventarios de producto en proceso, desarrollando una metodología para explotar al máximo las capacidades de estos procesos restrictivos, con el fin de lograr el mayor throughput. El throughput en este caso se define como la conversión del inventario en proceso en producto terminado y salida a clientes (Watson et al., 2007). Todas estas metodologías están enfocadas en solucionar una de las mayores problemáticas a nivel empresarial: planeación de la producción considerando la asignación de diferentes trabajos a máquinas.

Este artículo considera la problemática de programación de la producción en un entorno multiproducto y multiperiodo (Noori et al., 2008) y propone un modelo de programación lineal entera mixta para solucionarla. En particular, el modelo propuesto considera: (a) variables críticas de los procesos, (b) carga de máquinas, y (c) secuenciamiento de actividades a programar. La eficiencia del modelo matemático propuesto se ha probado con información real obtenida de una de las compañías más importantes en la fabricación de alambres y cables para la construcción en Colombia. El principal aporte del paper es la estructura del modelo y el desarrollo de una metodología para la planificación de la toma de decisiones en la industria de la construcción, como aporte al desarrollo de la sociedad.

En la siguiente sección se presenta la revisión de la literatura relacionada con el contexto de la problemática. Sección 3 muestra el modelo de programación lineal entera mixta propuesto y los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones de la investigación son presentadas en la sección 4.

---

## 2. Revisión de la literatura

La programación de producción (PP) es una actividad trascendental en la logística interna de las organizaciones, además de ser la columna vertebral de las empresas manufactureras (Caridi et al., 2014). En los problemas de programación de producción se tienen un conjunto de  $N$  trabajos  $\{J_1 \dots J_N\}$  que serán procesados en un conjunto de  $M$  máquinas físicas  $\{R_1 \dots R_M\}$ . La planificación busca encontrar un tiempo o intervalo de tiempo para cada actividad, en las máquinas disponibles. Esto se debe realizar considerando diferentes funciones objetivo y sujetas a restricciones propias de la producción. En este problema, cada tarea tiene por lo general un tiempo de procesamiento, a partir de tiempo de inicio que se ha de determinar. Cada trabajo tiene un tiempo de trabajo más temprano y en ocasiones se considera un tiempo de finalización más tardío, lo que obliga que los valores de inicio de las tareas tomen valores en dominios finitos (Sierra, 2009).

Diferentes autores han propuesto diversas metodologías para resolver la PP, las cuales se pueden clasificar dependiendo de la técnica de solución empleada como: Metodologías aproximadas basadas en prioridades, algoritmos aproximados y metaheurísticos y modelos matemáticos de optimización mono-objetivo, multi-objetivo y multicriterio. En (Yenisey & Yagmahan, 2014) se han propuesto una revisión bibliográfica extensiva, en el cual se identifican metodologías matemáticas para los problemas de programación de producción. La idea general es encontrar una secuencia dada  $n$  puestos de trabajo comunes en  $m$  máquinas cada una con un rendimiento diferente.

## 2.1. Metodologías basadas en prioridades

En las metodologías aproximadas basadas en prioridades, se puede diferenciar la Teoría de Restricciones (TOC). La TOC permite conceptualizar los procesos productivos y analizar sus restricciones para tomar las decisiones prioritarias en la planeación de la producción (González, & Escobar, 2008). Las restricciones pueden ser de carácter interno y externo. Las primeras surgen por limitaciones derivadas de los procesos o las políticas internas de la organización. Las restricciones por procesos son aquellas que se presentan cuando un proceso u operación en la compañía tiene insuficiente capacidad para satisfacer totalmente la demanda del mercado, por ejemplo, una máquina con un flujo menor al resto de equipos. (Marín & Gutierrez, 2013). Las restricciones por políticas surgen cuando la dirección define procedimientos que limitan la capacidad de operación de una organización o restringen su flexibilidad. En algunos casos el gobierno impide el buen desarrollo de una empresa, legislando a través de normas sectoriales, lo cual puede incluir aspectos ambientales y laborales. Este tipo de restricciones se consideran políticas y externas.

Un elemento fundamental en la TOC es la consideración de reposición de inventario (Bonfietti et al., 2013). De ahí surge una nueva idea denominada teoría de las restricciones de suministro del sistema de reposición de la cadena (TOC-SCRS), el cual es un método bajo la filosofía TOC (Wu et al., 2014).

En Wei et al., (2002) se plantean las ventajas y desventajas del TOC y una propuesta ajustada para recursos limitados y en conflicto.

## 2.2. Algoritmos aproximados y metaheurísticos

El hecho de que muchos problemas de programación son difíciles de resolver por algoritmos exactos, especialmente si se requiere modelar detalladamente el problema y comprobar su factibilidad y un valor óptimo, ha motivado la aplicación de técnicas aproximadas, caracterizadas por una búsqueda guiada. Debido a la naturaleza estocástica de la búsqueda, las heurísticas y metaheurísticas tratan problemas no lineales, no convexos o en problemas con regiones factibles no conectadas (Harjunkoski et al., 2014).

Ante la complejidad de los modelos, las metaheurísticas se presentan como alternativa de solución para el problema de programación de producción. Estos operan mediante el uso de algoritmos basados en la búsqueda de soluciones guiadas (Ren et al, 2013) así como en su representación gráfica (Harhalakis, 1989). En la categoría de algoritmos heurísticos y metaheurísticos, varios autores han propuesto diferentes metodologías para la solución de la problemática de programación de la producción (Harjunkoski et al., 2014).

En Alarcon & Clifford, (2009) se proponen veintiséis reglas para la programación de la producción mediante algoritmos heurísticos. Los resultados obtenidos se han graficado desde diferentes escenarios de permutaciones en las actividades, aplicando combinaciones de diferentes reglas.

Entre las metaheurísticas más utilizadas para problemas de programación de la producción se encuentran la búsqueda tabú, el recocido simulado y los algoritmos genéticos. La búsqueda tabú consiste es un procedimiento de búsqueda local que opera como un procedimiento de mejora local excepto que no requiere que cada nueva

solución de prueba sea mejor que la solución de prueba anterior. En particular, esta metaheurística utiliza algunas ideas de sentido común para permitir que el proceso de búsqueda escape de un óptimo local (Jaeggi et al., 2008).

### **2.3. Modelos matemáticos mono objetivos**

Las primeras publicaciones científicas sobre programación de la producción aparecieron hace más de medio siglo (Patterson et al., 1989 y Möhring & Radermacher, 1989). Sin embargo, muchos autores han reconocido una brecha entre la literatura y problemas industriales. La mayor parte de la investigación se centra en la solución de problemas que son en realidad una versión muy simplificada de la realidad. Esto permite la utilización de enfoques y respuestas avanzadas en muchos casos, llegando a soluciones óptimas. Sin embargo, la exclusión de las restricciones del mundo real limita la aplicabilidad de dichos métodos. En realidad, lo que la industria requiere son sistemas para optimizar la programación de la producción que se ajustan exactamente a las condiciones reales, generando buenas soluciones en pequeños tiempos computacionales (Urlings et al., 2010).

Varios autores han estudiado metodologías existentes para programación de producción (Harjunkoski et al., 2014). En este contexto surgen problemas al momento de planificar la producción con respecto al tamaño de lotes, asignación de lotes a las líneas y secuencias. Sin embargo, a pesar de lo anterior, el uso de métodos exactos para la solución de programación a gran escala y problemas con restricciones complejas se ha vuelto más atractivo con el desarrollo de métodos híbridos tales como el modelo de reducción por métodos y técnicas de agregación, y los métodos de descomposición. La idea fundamental de estos métodos es aprovechar la flexibilidad que ofrece la programación lineal entera mixta para acomodar fácilmente la composición de limitaciones tecnológicas complejas. Si tiene problemas con un proceso de cuello de botella, se propone reemplazar las variables de precedencia individuales para cada etapa de secuenciación, por variables que definen un ordenamiento único de los lotes para todas las etapas (Baumann & Trautmann, 2014).

### **2.4. Modelos matemáticos multi objetivos y multi criterios**

El propósito general de las metodologías multicriterios para la Planeación Maestra de la Producción (MPS), es la coordinación de todas las tareas de planificación dependientes para lograr los objetivos de reducción de costos y satisfacción del cliente (Slowinski, 1989). La minimización de costos incluye, los costos relacionados con la minimización del tiempo de entrega y la nivelación de recursos objetivos, además de un factor de ponderación que se utilizan para equilibrar los objetivos de acuerdo al conocimiento del Programador (Gahmn et al., 2013). En un contexto de cadena de suministro, la logística interna integrada a la de distribución sugiere modelos más generales, vinculando producción, distribución, y las decisiones de expansión de capacidad óptimas, teniendo en cuenta el costo total, tiempo total de flujo y pérdida de ventas como objetivos (Liu & Papageorgiou, 2013).

Coca et al., (2013) proponen un algoritmo genético multiobjetivo llamado VEGA. En particular, para  $m$  objetivos,  $m$  subpoblaciones de tamaño  $N/m$  serían generadas, asumiendo que la población es de tamaño  $N$ . Posteriormente, las subpoblaciones se reúnen, con el propósito de continuar con las funciones usuales de cruzamiento y mutación. De igual manera se utiliza el algoritmo MOGA, una variación de la jerarquización de Pareto definida por (Goldberg et al., 1993).

Otros modelos multi-objetivos han sido aplicados a celdas de trabajo en sistemas de ensambles de la industria electrónica (Yu et al., 2014). Todos estos algoritmos están basados en una modificación del algoritmo multiobjetivo NGSA II (non-dominated sorting genetic algorithm).

### 3. Modelo matemático propuesto

En este capítulo se explica en forma detallada el modelo de programación lineal mixta para el problema de programación de trabajos por lote (Job Shop Scheduling Problem) en compañías que se dedican a la producción de alambres y cables para el sector de la construcción.

#### 3.1. Consideraciones generales del modelo

Los trabajos a realizar son equivalentes a los productos finales del proceso. A pesar de que cuenta con varios procesos productivos de transformación, el modelo se define solo en términos de productos finales simplificando la modelación. Este enfoque permite considerar sin inconveniente los tiempos de proceso y preparación a lo largo de todo el proceso productivo, lo que es una representación acertada de la realidad de las organizaciones dedicadas a la fabricación de cables para la construcción. Se considera un conjunto finito de máquinas, cada una de estas representado un proceso productivo.

Los productos deben ser procesados en una secuencia lógica ya determinada por la naturaleza del proceso productivo, esto indica a su vez, que no todos los productos pueden ser procesados en una determinada máquina. Se tiene definido el tamaño de lote y con esto el tiempo de proceso en cada máquina. En particular, se consideran tiempo de proceso y alistamiento calculados para los tamaños de lote especificados.

Los productos requieren de un tiempo de preparación antes de ser procesados y este solo depende del producto y la máquina, no de la secuencia. El modelo busca determinar la secuencia de programación de los trabajos en cada máquina.

Los tiempos de inicio y finalización de proceso de cada producto en cada máquina están sujetos a disponibilidad de las máquinas para procesar y a disponibilidad del producto para ser procesado a lo largo de todas las etapas del proceso productivo. El objetivo del modelo es la minimización del tiempo máximo de realización de todos los productos, entendidos como un producto a través de diferentes procesos (*makespan*).

#### 3.2. Taxonomía del modelo

Un problema de programación es descrito por una trilogía de parámetros ( $\alpha / \beta / \gamma$ ). El parámetro  $\alpha$  describe el ambiente de máquinas y contiene justo una entrada. El parámetro  $\beta$  provee detalles de características de procesamiento y restricciones y puede no contener entradas, una sencilla o múltiples. El parámetro  $\gamma$  describe el objetivo para ser minimizado y por lo general contiene una entrada sencilla (Pinedo, 2000). El modelo considera la siguiente taxonomía:

$\alpha$  = Flexible Job Shop (FJc)

$\beta$  = No recirculation (no rcrc) – precedence constraints (prec)

$\gamma$  = Minimize Makespan

Notación del modelo: (FJc / no rcrc- prec / makespan); (Trabajos flexibles agrupados por centros / no recirculación de trabajos entre máquinas ni entre centros - restricciones de precedencia entre centros / minimizar el tiempo total transcurrido hasta la salida del último trabajo en la última máquina).

El modelo propuesto considera  $j$  trabajos flexibles y  $c$  centros de trabajo y dentro de cada centro un número de máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo tiene su propia ruta para seguir dentro del centro; el trabajo  $j$  requiere ser procesado en cada centro de trabajo solamente en una máquina y sólo una máquina puede hacerlo. Para este modelo no se permite recirculación entre máquinas ni entre centros. Restricciones de precedencia aplican en el modelo entre centros de trabajo para completar un trabajo  $j$ .

### 3.3. Estructura del modelo

#### Conjuntos

$S$	Productos $l, s \in S$
$M$	Máquinas $m, u, v \in M$
$SM_{m \in M} \subseteq S$	Productos $s \in S$ que deben pasar (asignados) por la máquina $m \in M$
$PRO_{m \in M}$	Todas las parejas ordenadas de productos $(l, s)$ procesados en la máquina $m \in M$ tal que $s, l \in SM_m$ y $s \neq l$
$PRE_{s \in S}$	Parejas ordenadas de máquinas $(u, v)$ que pueden procesar el producto $s \in S$ tal que $u, v \in M$ y para el que la máquina $u$ precede a la máquina $v$ en el proceso.

#### Parámetros

$time_{sm}$	Tiempo de producción del producto $s \in S$ en la máquina $m \in M$ .
$suptime_{sm}$	Tiempo de alistamiento para procesar el producto $s \in S$ en la máquina $m \in M$ .
$po$	Producto dummie $s \in S$ , con tiempo de proceso y preparación 0 que se procesa en todas las máquinas $m \in M$ .
$mf$	Máquina $m \in M$ , que se encuentra al final de todo el proceso productivo y por la cual deben pasar todos los productos.
$tras\_R5$	Traslape de tiempo para iniciar proceso referenciado al tiempo inicial máquina $u$ .
$tras\_R6$	Traslape de tiempo para iniciar proceso referenciado al tiempo inicial máquina $v$ .

#### Variables de Decisión

$w_{lsm}$	1 si el producto $l \in S$ se realiza antes que el producto $s \in S$ en la máquina $m \in M$ , 0 de lo contrario
$tin_{sm}$	Momento del tiempo en el que inicia el proceso (alistamiento y producción) del producto $s \in S$ en la máquina $m \in M$
$tif_{sm}$	Momento del tiempo en el que finaliza el proceso (alistamiento y producción) del producto $s \in S$ en la máquina $m \in M$
$MS$	Makespan, tiempo transcurrido entre todos los productos

#### Función Objetivo

Minimizar  $MS$  (*Makespan*) = Diferencia de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajos o tareas.

#### Restricciones

A cada producto solo lo puede preceder un único producto en cada máquina; es decir que existe un único producto esperando para ser procesado.

$$\sum_{l \in SM_m | l \neq s} w_{lsm} = 1 \quad \forall m \in M, s \in SM_m - \{po\} \tag{1}$$

Cada producto sólo puede ser posterior justo a un Producto o Trabajo en una determinada máquina.

$$\sum_{s \in SM_m | l \neq s} w_{lsm} \leq 1 \quad \forall m \in M, l \in SM_m \tag{2}$$

El tiempo final es igual al tiempo inicial más el tiempo de alistamiento y el tiempo de producción. Esto para cada producto en cada proceso productivo

$$tif_{sm} = tin_{sm} + suptime_{sm} + time_{sm} \quad \forall m \in M, s \in SM_m \tag{3}$$

El producto  $s$  inicia el proceso en la máquina  $m$  después de terminar el producto  $l$ , momento en que se libera la máquina. Esto se cumple siempre que  $l$ , se programe antes que  $s$  en la máquina  $m$ . Para esta restricción  $M^*$  es un número muy grande.

$$tin_{sm} \geq tif_{lm} - M^*(1 - w_{lsm}) \quad \forall m \in M, (l, s) \in PRO_m \quad (4)$$

El producto  $s$  debe iniciar el proceso en la máquina  $v$  después de terminar su tiempo de proceso en la máquina predecesora  $u$ , momento en el que se libera el producto. El inicio de proceso siguiente puede traslaparse hasta un parámetro  $tras_{R5}$  antes de terminar el proceso anterior.

$$tin_{sv} \geq tif_{su} - Time_{sv} * tras_{R5} \quad \forall s \in S, (u, v) \in PRE_s \quad (5)$$

El producto  $s$  debe iniciar el proceso en la máquina  $v$  después de iniciar el del tiempo del producto  $s$  en la máquina  $u$  hasta un parámetro  $tras_{R6}$

$$tin_{sv} \geq tin_{su} + Time_{su} * tras_{R6} \quad \forall s \in S, (u, v) \in PRE_s \quad (6)$$

El tiempo final en la última máquina para todos los productos debe ser menor o igual al Makespan.

$$tif_{[s, mf]} \leq MS \quad \forall s \in S \quad (7)$$

Restricciones de no negatividad

$$w_{lsm} \in (0,1) \quad (8)$$

$$tin_{sm}, tif_{sm}, MS \geq 0 \quad (9)$$

## 4. Resultados

### 4.1. Caso de Estudio

La efectividad del modelo propuesto se ha probado en un caso de estudio de una compañía multinacional perteneciente al sector de cables de energía. Esta empresa cablera ha estado ligada a la industria colombiana desde hace varios años. Durante estos años se ha consolidado como una trasnacional con casa matriz colombiana al establecer presencia manufacturera y comercial en otros países de América, fortaleciendo su operación directa en el grupo andino, Estados Unidos de América y el Caribe.

Los productos están presentes en proyectos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, en la actividad edificadora, en la fabricación de equipos industriales y electrodomésticos, en la industria automotriz, en el ensanche y automatización de plantas industriales y en la industria petroquímica, petrolera y minera. Es pionera en Colombia en la obtención del Certificado de Calidad ISO 9001, el Certificado de Gestión Ambiental ISO 14001 y el Certificado de su Sistema de Gestión de Salud y Seguridad en el Trabajo bajo la norma OHSAS 18001, otorgadas por el ICONTEC y avaladas por la red de Certificación Internacional IQNET.

Los procesos básicos para la fabricación de alambres y cables de la unidad comercial son trefilado, cableado, extrusión y fraccionado. Los productos en estudio están racionalizados para estos procesos y se componen de una maquina trefiladora primaria (procesa todos los productos), una trefiladora más un buncher para el cableado. El aislamiento se realiza en dos máquinas (alambres y otra en cables). El fraccionado se realiza en cuatro máquinas que procesan todos los productos definidos.

La organización actualmente cuenta con una planta de fabricación de alambres y cables para el sector de la construcción, la cual tiene una capacidad mensual de 1.040 Tons.

El proceso actual de programación de la producción utiliza un cronograma en un archivo de Excel para realizar la carga de máquinas. La hoja de cálculo incluye los productos a fabricar identificando los códigos y descripciones de los productos semielaborados y terminados. De igual manera toda la información del número del pedido, cliente, cantidades, fechas esperadas por el cliente, fechas ofertadas por planeación, velocidades e índices de

productividad. El programador se basa en la experiencia para definir la secuencia de los diferentes procesos y realiza los cálculos para establecer los tiempos de duración de las actividades de fabricación.

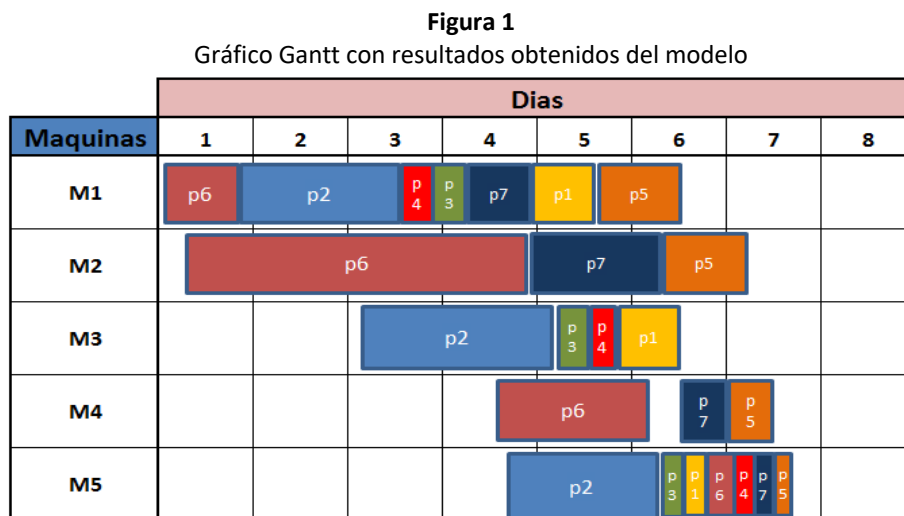
Los procesos de fabricación son intermitentes, iniciando por el proceso de trefilado primario, el cual consiste en elongar un alambroón de cobre de 8 mm hasta diámetros de 1.68 mm. Luego se realiza un proceso de trefilación intermedia para disminuir el diámetro hasta calibre 0.624 mm. Una vez se tiene el diámetro del material, se realiza el proceso de cableado, el cual consiste en la reunión de varios alambres, formando una cuerda que puede variar en su número de hilos según especificación técnica. Con la cuerda fabricada se realiza el proceso de aislamiento, que consiste en pasar dicha cuerda por una línea de extrusión, aplicando un material aislante termoplástico para 600 voltios. La presentación final del producto se obtiene en el proceso de fraccionado (rollos 100 m).

Los productos terminados se componen de las siguientes materias primas: Chaqueta nylon BW-NY6 Enka-NYC212-Nyltek3100, colorante PVC sin pb SAE, cobre colada continua 8 mm tipo B, compuesto PVC-2 duro 105°C. Los productos fabricados de acuerdo con su calibre son siete. Cuatro alambres y tres cables. Estos tienen a su vez presentación en seis colores para un total de cuarenta y dos. Cuando exista la necesidad de fabricación se tendrá en cuenta el calibre y la orden de fábrica se realizará para los colores requeridos. Estos productos terminados comprenden procesos de: trefilado, cableado, aislamiento y fraccionado. Toda la información de la compañía se obtuvo desde el ERP corporativo SAP. Los resultados obtenidos de la metodología propuesta, que son descritos en la siguiente sección, han sido incorporados al sistema ERP de la compañía con el fin de mostrar el impacto en el proceso de planeación de la producción y la toma de decisiones gerenciales en el área de operaciones.

### 4.2. Resultados obtenidos

El modelo matemático se ha programado en AMPL y se ha solucionado utilizando el software CPLEX. La solución óptima propuesta para el Makespan es de 6.48 días. Este valor está definido por el producto 5.

La representación gráfica de la solución se muestra en la Figura 1.



Fuente: Elaboración propia

El modelo realiza una propuesta interesante con respecto a la programación de la producción, teniendo en cuenta los tiempos utilizados en producción (incidencias y mantenimiento preventivo) y preparación. La entrada se realiza por medio de órdenes de fabricación generadas de acuerdo con el comportamiento de la demanda. El nivel del inventario al llegar al punto de reorden define una cantidad establecida en un lote económico y restringido por la capacidad de las bobinas de alimentación. Esto sugiere que no siempre se requiere fabricar la



totalidad de los productos, sino solamente los que tengan un nivel por debajo del punto de reorden. Para el ejercicio presentado se propone correr todos los productos en su lote económico y establecer cuál sería el Makespan máximo para la reposición del inventario en un arranque con niveles mínimos.

El resultado del modelo es favorable para la disminución del inventario en proceso, ya que el ciclo (Makespan) se reduce en aproximadamente un día y medio, lo cual representa para la organización una disminución en costos de productos de 215.000 USD y un costo financiero de este, cercano a 6.000 USD.

De igual manera, en la actualidad el tiempo de respuesta para un ciclo promedio el tiempo es de 8,0 días. Con el modelo el makespan se estima en 6,5 días, lo que permite tener mejor respuesta y la rotación del inventario de producto terminado será mayor. Se considera entrega inmediata al centro de distribución. El punto de reorden tiene en cuenta la capacidad que tiene planta de reponer el inventario y con base en ello realiza el cálculo de esta cantidad. Esto permitirá una mayor facturación por disminución de agotados y mejorar el servicio de entregas al cliente. Estos beneficios se podrán evidenciar en el corto plazo, con la implementación del modelo.

---

## 5. Conclusiones

En este trabajo se considera el problema de programación de la producción multi-etápica y multi-producto en compañías fabricantes de alambres y cables para la construcción. El objetivo central de la problemática radica en la minimización del makespan.

Para la solución de la problemática se ha propuesto un modelo de programación lineal entera mixta considerando tiempos de producción, traslapes y tiempos de alistamiento. La eficiencia del modelo matemático propuesto se ha probado con información real obtenida de una de las compañías multinacionales más grande del sector en Colombia. Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia del modelo en la solución de la problemática propuesta, así como el beneficio obtenido para la compañía al implementar dicha estrategia. En particular, se ha disminuido en 1.5 días el makespan, consecuentemente con una disminución del inventario en proceso de cerca de 215.000 USD y un costo de capital de 6.000 USD.

Como futuras investigaciones, se propone incluir dentro de la estructura del modelo costos relacionados con las decisiones de programación, además de ingresos marginales por cada producto. De igual manera se puede probar la eficiencia del modelo en otras compañías del sector que incluyen más procesos (hasta 10 procesos de producción) y el intercambio de maquinaria con otras familias de productos.

De igual manera se podría extender el trabajo incluyendo parámetros variables que involucrarían otras técnicas de solución.

---

## Referencias bibliográficas

- Alarcon, H. R., & Clifford, F. Á. (2009). Un modelo de optimización para planificar la producción de una compañía siderúrgica. *Revista Ingeniería Industrial*, 8(1), 73-91.
- Baumann, P., & Trautmann, N. (2014). A hybrid method for large-scale short-term scheduling of make-and-pack production processes. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 718-735.
- Bonfietti, A. (2013). Constraint based methods for allocation and scheduling of periodic applications, Technical Report, University of Bologna, 2013
- Caridi, M., Moretto, A., Perego, A., & Tumino, A. (2014). The benefits of supply chain visibility: A value assessment model. *International Journal of Production Economics*, 151, 1-19.

- Coca-Ortegón, G. A., Castrillón, O. D., & Ruiz-Herrera, S. (2013). Metodología basada en los algoritmos VEGA y MOGA para solucionar un problema multiobjetivo en un sistema de producción Job Shop. *Revista EIA*, 10(19), 175 – 191.
- Gahm, C., Dünnwald, B., & Sahamie, R. (2014). A multi-criteria master production scheduling approach for special purpose machinery. *International Journal of Production Economics*, 149, 89-101.
- García-Cáceres, R. G., & Escobar, J. W. (2016). Characterization of supply chain problems. *Dyna*, 83(198), 68-78.
- Goldberg, D. E., Deb, K., & Clark, J. H. (1993). Accounting for noise in the sizing of populations. *Foundations of genetic algorithms*, 2, 127-140.
- González, P., & Escobar, J. W. (2008). Teoría de las restricciones (TOC) y la mecánica del Throughput Accounting (TA) Una aproximación a un modelo gerencial para toma de decisiones: caso compañía de Cementos Andino SA. *Cuadernos de contabilidad*, 9(24), 209 – 228.
- Harhalakis, G. (1989). The use of project scheduling for the manufacture of custom made products. *Advances in Project Scheduling*, 1, 355-368.
- Harjunkoski, I., Maravelias, C. T., Bongers, P., Castro, P. M., Engell, S., Grossmann, I. E., ... & Wassick, J. (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers & Chemical Engineering*, 62, 161-193.
- Jaeggi, D. M., Parks, G. T., Kipouros, T., & Clarkson, P. J. (2008). The development of a multi-objective Tabu Search algorithm for continuous optimisation problems. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1192-1212.
- Liu, S., & Papageorgiou, L. G. (2013). Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry. *Omega*, 41(2), 369-382.
- Marín, W. M., & Gutiérrez, E. V. G. (2014). Desarrollo e implementación de un modelo de teoría de restricciones para sincronizar las operaciones en la cadena de suministro. *Revista EIA*, 10(19), 67-77.
- Melton, T. (2005). The benefits of lean manufacturing: what lean thinking has to offer the process industries. *Chemical engineering research and design*, 83(6), 662-673.
- Möhring, R. H., & Radermacher, F. J. (1989). The order-theoretic approach to scheduling: The deterministic case. *Advances in project scheduling*, 1, pp. 29-66.
- Noori, S., Bagherpour, M., Zorriassatine, F., Makui, A., & Parkin, R. (2008). A new project scheduling approach for improving multi-product multi-period production planning problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(11), 1517-1527.
- Patterson, J. H., Słowiński, R., Talbot, F. B., & Węglarz, J. (1989). An algorithm for a general class of precedence and resource constrained scheduling problems. *Advances in project scheduling*, 187, pp. 3-28.
- Pinedo, M. (2000). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*.
- Ren J., (2013). *Search Based Software Project Management*, Technical Report London: University College London.
- Sierra Sánchez, M. R. (2009). Mejora de algoritmos de búsqueda heurística mediante poda por dominancia. Aplicación a problemas de scheduling. Tesis Doctoral Oviedo: Universidad de Oviedo, pp. 1-270.

- Słowiński, R. (1989). Multiobjective project scheduling under multiple-category resource constraints. *Advances in project scheduling*, 1, 151-167.
- Stump, B., & Badurdeen, F. (2012). Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study. *Journal of Intelligent manufacturing*, 23(1), 109-124.
- Urlings, T. (2010). Heuristics and metaheuristics for heavily constrained hybrid flowshop problems. Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València.
- Watson, K. J., Blackstone, J. H., & Gardiner, S. C. (2007). The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management*, 25(2), 387-402.
- Wei, C. C., Liu, P. H., & Tsai, Y. C. (2002). Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint. *International Journal of Project Management*, 20(7), 561-567.
- Wu, H. H., Lee, A. H., & Tsai, T. P. (2014). A two-level replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 152-159.
- Yenisey, M. M., & Yagmahan, B. (2014). Multi-objective permutation flow shop scheduling problem: Literature review, classification and current trends. *Omega*, 45, 119-135.
- Yu, Y., Tang, J., Gong, J., Yin, Y., & Kaku, I. (2014). Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 774-786.