



Scientia Et Technica

ISSN: 0122-1701

scientia@utp.edu.co

Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Caicedo-Rolón, A. J.; Criado-Alvarado, A. M.; Morales-Ramón, K. J.
Modelo matemático para la planeación de la producción en una industria metalmecánica
Scientia Et Technica, vol. 24, núm. 3, 2019, Junio-Septiembre, pp. 408-419
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84961239004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Modelo matemático para la planeación de la producción en una industria metalmecánica

Mathematical model for production planning in a metalworking industry

A. J. Caicedo-Rolón  ; A. M. Criado-Alvarado  ; K. J. Morales-Ramón 

Abstract— Production planning is a medium-term tactical decision that determines the level of employees, inventories, and production required to meet demand on a planning horizon. a mathematical model was designed for aggregate production planning in medium metalworking industry, where a mixed strategy of production planning that included chase (hiring and firing) and level of inventories was developed, from a linear programming model. The results showed the quantity of required employees, hiring, production levels per working shift and inventories, for each process, which minimize the associated costs with the plan and meet the demand requirements. The mathematical model designed and the process followed for the aggregate production planning, are a tool to support decision-making in operations management, and can be implemented in companies in the metalworking industry.

Index Terms—Aggregate planning, Linear programming, Operating research, Optimization.

Resumen— La planeación de la producción es una decisión táctica a mediano plazo, que determina el nivel de trabajadores, inventarios y producción requeridos, para satisfacer la demanda en un horizonte de planeación. Se diseñó un modelo matemático para la planeación agregada de la producción en una industria metalmecánica mediana, donde se desarrolló una estrategia mixta que incluyó la persecución (contratación y despido) y nivel de inventarios, a partir de un modelo de programación lineal. Los resultados arrojaron las necesidades de cantidad de empleados, las contrataciones, los niveles de producción por jornada laboral y los inventarios, para cada proceso, que minimizan los costos asociados al plan y satisfacen los requerimientos de la demanda. El modelo matemático diseñado y el proceso seguido para la planeación agregada de la producción, son una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de operaciones, y pueden implementarse en empresas de la industria metalmecánica.

Este manuscrito fue enviado el 27 de junio de 2017 y aceptado el 19 de junio de 2019.

A. J. Caicedo-Rolón, Profesor Asistente departamento de Procesos Industriales en la Universidad Francisco de Paula Santander, Av. Gran Colombia No. 12E-96 Barrio Colsag, Cúcuta, Colombia (e-mail: alvarojuniorcr@ufps.edu.co).

A. M. Criado-Alvarado, Profesional Gestión Comercial CENS-grupo EPM, Avenida Aeropuerto 5N - 220 Barrio Sevilla, Cúcuta, Colombia (e-mail: angelik_491@hotmail.com).

Palabras clave— Investigación de operaciones, Optimización, Planeación agregada, Programación lineal.

I. INTRODUCCIÓN

El plan agregado de una empresa tiene como propósito especificar la combinación óptima de la tasa de producción, el nivel de la fuerza de trabajo y los inventarios disponibles [1]. La planificación agregada y los niveles que se sitúan por debajo se inscriben en el área de producción, el cual intenta ajustar la producción con la demanda incurriendo en el menor costo posible, considerando como variable, generalmente, la dimensión de la plantilla, las horas extras y los niveles de producción y de inventarios en cada período [2]. La planificación agregada se refiere a la determinación de la fuerza laboral, a la cantidad de producción y niveles de inventario en orden a satisfacer la demanda para un horizonte temporal de planificación específico a medio plazo [3].

La importancia de la investigación de operaciones radica en su fortaleza para modelar y resolver problemas complejos y de gran escala [4; 5]. La aplicación de modelos de optimización tiene una amplia contribución a la reducción de costos y al ahorro de recursos en todo tipo de organizaciones a nivel mundial, lo cual le otorga más relevancia cada día entre la comunidad científica internacional [6]. La optimización matemática en programación lineal (PL) y programación lineal entera tienen un amplio uso para resolver problemas organizacionales reales, permitiendo la toma de decisiones individuales y conjuntas para la gestión empresarial, con el fin de hacer un uso eficiente de los recursos y aumentar los beneficios [7]. Fernández (2011) destaca la vigencia de la optimización en PL y PL entera para la resolución de problemas

K. J. Morales-Ramón, Profesional Planeación Estratégica y Estadísticas, Universidad Simón Bolívar sede Cúcuta, Calle 14 Número 3- 42 Barrio La Playa, Cúcuta, Colombia (e-mail: k.morales@unisimoncucuta.edu.co).

en áreas como la programación de la producción y de los requerimientos de materiales [7]. El modelo de PL para la planeación agregada de la producción es efectivo, ya que es una técnica sistemática e innovadora que mezcla cada una de las variables que intervienen en la producción y que optimiza cada uno de los recursos, y de esta manera reduce los costos que se generan por cumplir con la producción [8].

Con el objeto de elaborar planes agregados óptimos de producción se han realizado investigaciones utilizando la técnica matemática de PL, como el caso de una empresa Ecuatoriana del sector de Curtidos que comparó la solución de tres modelos de planes tradicionales con el modelo de PL, concluyendo que este último es más eficiente, ya que optimiza los costos, manteniendo un fuerza laboral constante, contrataciones, despidos eventuales y con variación de inventario en temporadas de alta demanda [8]. Madanhire & Mbohwa (2015) investigaron el mejor modelo para la planificación agregada en una fábrica de muebles, a partir del método de ensayo y error por medio de las hojas de cálculo y un modelo de PL. Se demostró la eficacia de los modelos de optimización el cual fue solucionado por medio del software LINGO 13.0, cuyo resultado obtuvo una mejor solución [9]. La aplicación del modelo de transporte como caso especial de la PL en la empresa “Bangladesh Cable Shilpa Ltd, Khulna” determinó la solución óptima de su producción para un período de ocho meses, considerando las estrategias de mano de obra constante en tiempo regular y tiempo extra, los inventarios y las órdenes atrasadas, sin embargo, esta última no hizo parte de la solución [10]. Para apoyar la toma de decisiones en los procesos de producción de una compañía fabricante de jugos de naranja concentrados congelados en Brasil, se elaboró un plan agregado de producción usando un modelo de PL con múltiples productos, etapas y períodos. Luego, el modelo fue ampliado teniendo en cuenta la incertidumbre en algunos parámetros, usando un enfoque de optimización robusta [11]. Gansterer (2015) dentro de su estudio de planeación jerárquica de la producción formuló un modelo matemático lineal para la planeación agregada, que consideró la minimización de los costos de inventarios y los de órdenes atrasadas, sin tener en cuenta los costos de los empleados requeridos, las contrataciones y los despidos [12]. En la compañía multinacional IMPSA Hydro que trabaja en proyectos hidroeléctricos, se desarrolló un modelo matemático en PL para representar y simular la planeación agregada de la producción y abastecimiento, con el objeto de optimizar el cronograma de planificación en la fabricación de los Grupos de fabricación de cada proyecto [2]. En una empresa fabricante de helados grande con alta demanda estacional en Brasil se desarrolló un modelo de planificación agregada de la producción basada en la PL entera, que determinó las tasas mensuales de producción y los niveles de inventario de productos terminados, así como los requisitos de la fuerza de trabajo para llevar a cabo los planes de producciones [13].

La planificación de la producción es reconocida como un problema complejo, que implica el manejo de una gran cantidad

de variables y restricciones. Una buena planificación de las operaciones asociadas a la producción u obtención de bienes, constituye uno de los grandes retos de las empresas manufactureras [14]. Las industrias de manufactura buscan la forma de planificar su producción eficientemente con la finalidad de optimizar sus recursos [8]. Debido a los grandes costos que intervienen en la planeación agregada, es una razón para buscar la mejor (óptima) solución al plan [15]. Sin una planificación no es posible gestionar de manera correcta el sistema productivo [3].

Después de la década de los años setenta no se han publicado enfoques esencialmente nuevos para la planeación agregada, pero han tenido lugar progresos muy importantes en las técnicas de programación matemática, debido a los cuales es posible actualmente resolver de forma eficiente modelos que hace unas décadas se consideraban inabordables [2]. En los últimos años los investigadores han desarrollado modelos integrales y métodos de solución sofisticados para la planeación agregada; sin embargo, algunos profesionales afirman que este concepto es raramente aplicado en la industria [12]. El responsable de planificar en una industria, no comprende con claridad los modelos matemáticos de PL para la planeación agregada, y es ésta la causa por la que no optan por esforzarse en utilizarlos [3]. La planeación agregada de la producción es probablemente uno de los trabajos más importantes, pero menos entendido, que realiza un gerente [16]. La industria metalmecánica de estudio realiza su planeación agregada por medio de la hoja de cálculo, en la cual se obtienen los requerimientos de personal basados en los tiempos de operación que conocen de cada proceso.

El propósito de la investigación fue diseñar un plan agregado óptimo de producción a partir de un modelo matemático de programación lineal en una industria metalmecánica, que determina las cantidades de empleados, los niveles de producción por jornada laboral y los inventarios, enmarcado en la minimización de los costos de mano obra, mantenimiento de inventarios y contratación, para satisfacer la demanda de los clientes en el momento oportuno.

II. METODOLOGIA

La unidad de estudio fue una empresa metalmecánica mediana ubicada en la ciudad de Cúcuta, Colombia, dedicada al diseño y fabricación de cilindros y tanques para el almacenamiento y transporte de G.L.P. (Gas Licuado del Petróleo) bajo los estándares de la norma de fabricación NTC 522-2- Quinta Actualización, y los lineamientos del código ASME sección 8 división I. La empresa produce cilindros completos y partes que se envían en presentación de *Kits*, para satisfacer su propia demanda y las necesidades de tres (3) plantas de producción pertenecientes a su grupo empresarial, además, fabrica partes a otras empresas, pero la prioridad es atender los requerimientos del grupo empresarial.

Las fases principales de la implementación de la investigación de operaciones comprenden: 1) la definición del problema; 2) la construcción del modelo; 3) la solución del modelo; 4) la validación del modelo y la implementación de la solución. En la opinión del autor la técnica más importante de la investigación de operaciones es la PL. Todos los modelos de investigación de operaciones, incluido el de PL, constan de tres componentes básicos: 1) las variables de decisión que se pretenden determinar; 2) el objetivo (la meta) que se necesita optimizar (maximizar o minimizar) y 3) las restricciones que la solución debe satisfacer [17]. Para solucionar el modelo matemático de PL se utilizó el programa LINGO versión 14.0. Se aplicó la PL como técnica matemática de la planeación agregada, que para Boiteux, Corominas & Lusa (2007) es uno de los métodos más importantes para resolver el problema de la planificación agregada [3]. Según Domínguez (1995) el empleo de la PL en planificación agregada se traduce, en general, en plantear una función objetivo que pretende minimizar los costes derivados de la mano de obra regular, horas extras, contrataciones y despidos, inventarios y retrasos. Esta función suele estar sujeta a restricciones de necesidades de producto o de demanda agregada a satisfacer, disponibilidades de capacidad, evolución de inventarios y mano de obra [18].

III. CONTENIDO

Teniendo en cuenta las fases de la investigación de operaciones, a continuación, se evidencia su aplicación para la planeación agregada de la producción en la industria metalmecánica.

A. Definición del problema

El problema consistió en determinar el número de trabajadores requeridos para cada uno de los treinta procesos que desarrolla la empresa metalmecánica en tres turnos de producción (dos diurnos y un nocturno), el número de empleados contratados y despedidos, las cantidades a fabricar en cada turno y los inventarios, con el objetivo de alcanzar el costo mínimo del plan agregado de producción para la fabricación óptima de cinco referencias de cilindros para el almacenamiento y transporte de G.L.P.

B. Modelo matemático de programación lineal para la planeación agregada de la producción

De acuerdo con los componentes básicos de la PL para la planeación agregada de la producción, a continuación, se presentan los resultados de su aplicación en la industria metalmecánica de estudio.

1) Definición de variables de decisión del modelo para planeación agregada de la producción. Las variables de decisiones cuyos valores se determinaron por medio de la solución del modelo matemático de PL son las siguientes:

$CEDA_{ik}$ = Cantidad de empleados en el turno A diurno en el proceso 1 para el período k

$CEDB_{ik}$ = Cantidad de empleados en el turno B diurno en el proceso 1 para el período k

CEN_{ik} = Cantidad de empleados en el turno nocturno en el proceso 1 para el período k

$PJRDA_{ijlk}$ = Producción en jornada regular diurna del turno A de la referencia i, de la parte j, en el proceso 1 para el período k

$PJRDB_{ijlk}$ = Producción en jornada regular diurna del turno B de la referencia i, de la parte j, en el proceso 1 para el período k

$PJRN_{ijlk}$ = Producción en jornada regular nocturna de la referencia i, de la parte j, en el proceso 1 para el período k

$CECDA_{ik}$ = Cantidad de empleados contratados en el turno A diurno en el proceso 1 para el período k

$CECDB_{ik}$ = Cantidad de empleados contratados en el turno B diurno en el proceso 1 para el período k

$CECN_{ik}$ = Cantidad de empleados contratados en el turno nocturno en el proceso 1 para el período k

$CEDPDA_{ik}$ = Cantidad de empleados despedidos para el turno A diurno en el proceso 1 para el período k

$CEDPDB_{ik}$ = Cantidad de empleados despedidos para el turno B diurno en el proceso 1 para el período k

$CEDPN_{ik}$ = Cantidad de empleados despedidos para el turno nocturno en el proceso 1 para el período k

NUI_{ijlk} = Número de unidades en inventario de la parte j de la referencia i, del proceso 1 para el período k

Donde:

i: Subíndice que identifica el tipo de cilindro a fabricar, donde $i = 1, 2, \dots, M$

j: Subíndice que identifica las partes del cilindro a fabricar, donde $j = 1, 2, \dots, N$

k: Subíndice que identifica el período de producción, donde $k = 1, 2, \dots, O$

l: Subíndice que identifica el proceso de producción, donde $l = 1, 2, \dots, P$

2) Definición de parámetros constantes del modelo para la planeación agregada de la producción. Los parámetros constantes del modelo matemático de PL que representa el plan agregado óptimo de producción para la empresa metalmecánica, son los siguientes:

D_{ijk} = Demanda total requerida del cilindro i de la parte j en el período k

$CDLPR_k$ = Cantidad de días laborables en producción regular para el período k

CMA_{ijlk} = Capacidad máxima de almacenamiento del cilindro i de la parte j en el proceso 1 para el período k

$CHEED_{il}$ = Cantidad de horas estándar por empleado al día del cilindro i para el proceso 1

$CUFD_{ijl}$ = Cantidad de unidades fabricadas del cilindro i de la parte j en el proceso 1 por hora

$CMEDA_1$ = Capacidad máxima de empleados en el proceso 1 en jornada regular diurna del turno A

$CMEDB_1$ = Capacidad máxima de empleados en el proceso 1 en jornada regular diurna del turno B

CMEN₁ = Capacidad máxima de empleados en el proceso 1 en jornada regular nocturna

CHRD₁ = Costo de una hora en tiempo regular en el proceso 1 en el turno diurno

CHRN₁ = Costo de una hora en tiempo regular en el proceso 1 en el turno nocturno

CC₁ = Costo de contratar un empleado en el proceso 1

CUI₁ = Costo de mantener una unidad en inventario del proceso 1

3) Función objetivo. El objetivo fue determinar la combinación óptima entre la tasa de producción, la fuerza de trabajo y los inventarios, para minimizar los costos del plan agregado de producción, que se observa en la expresión 1, e incluye los costos de mano de obra en tiempo regular diurno (turno A y B) y nocturna (1^a, 2^a y 3^a fila de la expresión 1), los costos de contratación (4^a y 5^a fila de la expresión 1) y los costos de mantener el inventario (6^a fila de la expresión 1).

$$Z(\text{Min}) = \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CDLPR_k * CEDA_{lk} * CHEED * CHRD_l)$$

$$\oplus \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CDLPR_k * CEDB_{lk} * CHEED * CHRD_l)$$

$$\oplus \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CDLPR_l * CEN_{lk} * CHEED * CHRN_l)$$

$$\oplus \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CECDA_{lk} * CC_{lk}) \oplus \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CECDB_{lk} * CC_{lk})$$

$$\oplus \sum_{l=1}^P \sum_{k=1}^O (CECDN_{lk} * CC_{lk})$$

$$\oplus \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^O (CUI_l * NUI_{ijk})$$

(1)

4) Restricciones del problema. En el modelo matemático se plantearon restricciones de: demanda, capacidad en jornadas regular diurna (turno A y B) y nocturna, cantidad de empleados en jornadas diurna (turno A y B) y nocturna, capacidad máxima de empleados en jornadas diurna (turno A y B) y nocturna, capacidad máxima de almacenamiento, cantidades de inventario por proceso, y la restricción de no negatividad.

Restricción de demanda. La sumatoria de la producción en jornada regular en los tres turnos y el inventario del período anterior, debe ser mayor o igual a la demanda total requerida de cada parte de cada producto, por proceso, como se observa en la expresión (2).

$$PJRDA_{ijkl} + PJRDB_{ijkl} + PJRN_{ijkl} + NUI_{ijkl-1} \geq D_{ijkl}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

proceso productivo, que fueron suministradas por la empresa y sirvieron de insumo para determinar la capacidad de producción por hora de trabajo en cada proceso. Estas restricciones determinan la producción en jornada regular por turno de trabajo, por cada parte de cada producto, por proceso por período.

Restricción de capacidad en jornada regular diurna turno A

$$CDLPR_k * CEDA_{lk} * CUFD_{ijl} * CHEED_{il} = PJRDA_{ijkl}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Restricción de capacidad en jornada regular diurna turno B

$$CDLPR_k * CEDB_{lk} * CUFD_{ijl} * CHEED_{il} = PJRDB_{ijkl}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Restricción de capacidad en jornada nocturna

$$CDLPR_k * CEN_{lk} * CUFD_{ijl} * CHEED_{il} = PJRN_{ijkl}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Respecto a las restricciones de empleados, expresiones desde la (6) hasta la (8), se debe cumplir que el número de empleados en cada proceso por período deber ser igual a los empleados del período anterior más las contrataciones, menos los despidos en cada proceso por período. Estas restricciones determinan la cantidad de empleados requeridos para cumplir con la demanda de cada parte de cada producto, por proceso productivo por período.

Restricción de empleados en jornada regular diurna turno A

$$CEDA_{lk} = CEDA_{lk-1} + CECDA_{lk} - CEDPDA_{lk}$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Restricción de empleados en jornada regular diurna turno B

$$CEDB_{lk} = CEDB_{lk-1} + CECDB_{lk} - CEDPDB_{lk}$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Restricción de empleados en jornada nocturna

$$CEN_{lk} = CEN_{lk-1} + CECDN_{lk} - CEDPN_{lk}$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, O$$

Las restricciones de capacidad máxima de empleados, expresiones desde la (9) hasta la (11), se relaciona con el límite máximo de empleados que cada proceso puede admitir, de

Para el planteamiento de las restricciones de capacidad, expresiones (3), (4) y (5), se consideró la tasa estándar de producción de cada parte de cada producto, por etapa del

acuerdo con la disponibilidad de maquinaria o puestos de trabajo.

Restricción de capacidad máxima de empleados en jornada regular diurna turno A

$$CEDA_{k-1} + CECDA_{ik} - CEDPDA_{ik} \leq CMEDA_l \\ \forall l = 1,2,\dots,P; k = 1,2,\dots,O \quad (9)$$

Restricción de capacidad máxima de empleados en jornada regular diurna turno B

$$CEDB_{k-1} + CECDB_{ik} - CEDPDB_{ik} \leq CMEDB_l \\ \forall l = 1,2,\dots,P; k = 1,2,\dots,O \quad (10)$$

Restricción de capacidad máxima de empleados en jornada nocturna

$$CEN_{k-1} + CECN_{ik} - CEDPN_{ik} \leq CMEN_l \\ \forall l = 1,2,\dots,P; k = 1,2,\dots,O \quad (11)$$

Restricción de capacidad máxima de almacenamiento. La expresión (12) representa la restricción de capacidad máxima de almacenamiento, la cual tuvo en cuenta el espacio disponible en cada proceso productivo para el almacenamiento de partes procesadas.

$$NUI_{ijkl} \leq CMA_{jlk} \\ \forall i = 1,2,\dots,M; j = 1,2,\dots,N; k = 1,2,\dots,O; l = 1,2,\dots,P \quad (12)$$

Restricción de cantidad de inventario por proceso. La restricción de inventario de partes procesadas de cada producto en cada proceso, expresión (13), consideró el inventario disponible del período anterior más la producción en jornadas diurna y nocturna menos la demanda por período. Esta restricción determina el número de unidades a mantener en inventario, luego de satisfacer la demanda.

$$PJRDA_{ijkl} + PJRDB_{ijkl} + PJRN_{ijkl} + NUI_{ijkl-1} - D_{ijkl} = NUI_{ijkl} \\ \forall i = 1,2,\dots,M; j = 1,2,\dots,N; l = 1,2,\dots,P; k = 1,2,\dots,O \quad (13)$$

Restricción de no negatividad. La expresión (14) hace referencia a que las variables de decisión del modelo no deben ser negativas.

$$CEDA_{kl}, CEDB_{kl}, CEN_{kl}, PJRDA_{ijkl}, PJRDB_{ijkl}, PJRN_{ijkl}, \\ CECDA_{kl}, CECDB_{kl}, CECN_{kl}, CEDPDA_{kl}, CEDPDB_{kl}, \\ CEDPN_{kl}, NUI_{ijkl} \geq 0 \\ \forall i = 1,2,\dots,M; j = 1,2,\dots,N; k = 1,2,\dots,O; l = 1,2,\dots,P \quad (14)$$

Se diseñó un modelo matemático de PL que se evidencia en las expresiones del (1) al (14), el cual determina el número de trabajadores requeridos, las contrataciones y despidos, las cantidades a fabricar y los inventarios a mantener, en cada proceso productivo por cada uno de los tres turnos de producción por período, en la empresa metalmecánica, con el objeto de satisfacer los requerimientos de producción al menor costo.

C. Plan agregado de producción en la empresa metalmecánica

En este apartado se presentan los resultados de la solución del modelo matemático de PL aplicado a la empresa metalmecánica.

1) Condiciones generales de producción en el caso de estudio

Turnos de Trabajo. Se contempló dos (2) turnos diurnos de trabajo, los cuales están distribuidos de la siguiente manera: (6am - 2pm), (2pm - 10 pm) y un turno nocturno de (10pm - 6am) de lunes a sábado. Por lo cual no se consideró tiempo extra como alternativa de producción.

Políticas de Contratación y despido. El proceso de contratación y despido de los empleados en la empresa se maneja a través de un tercero (Outsourcing), por lo cual el costo de despido es igual a cero y el costo de contratación (CC_l) corresponde al 7,15% del salario.

Políticas de subcontratación y de faltantes. Estas estrategias básicas de producción no fueron consideradas para el caso de aplicación, ya que la empresa no las implementa.

Cantidad de horas estándar por empleado al día. Se consideró como cantidad de horas disponibles por empleado al día lo que establece la legislación laboral colombiana, ocho horas de trabajo.

Nivel de inventarios. No se consideró inventario inicial de partes de cada producto por proceso, al inicio del período de estudio (NUI_{ijkl}).

2) Datos de entrada

Productos (i). La industria metalmecánica fabrica dos tipos de cilindros de acero con costuras cuya identificación se estableció como cilindros (C5-C9-C15-C18-C45), donde la letra C significa cilindro y el número la capacidad en kg. Los cilindros tipo I y II, constan de una tapa, un fondo, una brida, un cuello protector y una base, además, el tipo II tiene un cuerpo, cuyas partes están soldadas como se muestra en la figura 1.

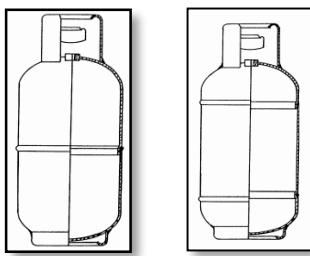


Fig. 1. Cilindro Tipo I y II.

Procesos (I). El proceso de fabricación inicia con el proceso de corte que se realiza en dos etapas de cada una de las partes del cilindro, luego algunas partes se someten a los procesos de troquelado, grabado, rebordeado, rolado y embutido, finalmente las partes se ensamblan en el proceso de soldadura, donde posteriormente a los cilindros se les realiza los procesos de normalizado, prueba hidrostática y neumática, tara, pintura, valvulado y registro de los seriales. Para el caso de estudio se consideró treinta procesos para cada parte de cada tipo de cilindro.

Estrategia de planeación de producción. Se empleó una estrategia mixta de producción que estuviera de acuerdo a los requerimientos de la industria de estudio, la cual incluyó las estrategias de persecución (contratación y despido) y nivel de inventarios.

Parámetros constantes y restricciones. En la tabla I, se presentan los parámetros constantes y restricciones del problema de estudio en la industria metalmecánica. Los costos de la mano de obra en tiempo regular diurno y nocturno, se determinaron teniendo en cuenta el salario del empleado o la suma de los salarios de los empleados quienes realizan la operación, incluyendo la carga prestacional, y posteriormente se determinó el costo por hora de acuerdo con la legislación laboral de Colombia, que establece el salario por un término de 30 días y 8 horas por día ($CHRD_i$), y un incremento del 35% del costo de la hora nocturna ($CHRN_i$).

La demanda total requerida o los requerimientos totales de producción de las partes de los productos (D_{ijk}), se calcularon mediante la suma de los datos de la demanda que fueron suministrados por la empresa, de acuerdo con los pedidos registrados para el período de agosto de 2015 y el inventario de seguridad establecido como política por la gerencia de producción. Se tuvo en cuenta 26 días laborables en ese período de tiempo ($CDLPR_k$).

A partir de un estudio de tiempos suministrado por la gerencia de producción que evidenciaba el tiempo de operación de cada parte del producto en cada etapa del proceso productivo, se procedió a calcular las tasas de producción en (unidades/hora) de cada parte del producto en cada proceso (CUD_{iji}). Los costos de mantenimiento de inventario por parte del producto en cada proceso (CUI_i) fueron establecidos como el 0,1744% del costo del cilindro.

Respecto a las restricciones, se identificaron el número de máquinas disponibles en cada proceso, y en función de éstas se definió el número máximo de empleados por turno ($CMEDA_i$, $CMEDB_i$, $CMEN_i$). De la misma manera se aprecia el número de empleados disponibles en el período de estudio por cada proceso productivo. Finalmente, se estableció la capacidad máxima de almacenamiento (CMA_{ijlk}) considerando los espacios disponibles en cada proceso.

3) Solución del modelo matemático para la planeación agregada de producción. Debido a la magnitud del problema, en la tabla II se presentan los resultados de las variables de decisión que resuelve el problema de la planeación agregada de la producción para once procesos, en la industria metalmecánica, cuyos valores de las variables se interpretaron de la siguiente manera:

Mano de obra. La cantidad de empleados requeridos en cada turno de producción que se determinó ($CEDA_{ik}$, $CEDB_{ik}$), arrojan valores con decimales que se interpretan como el porcentaje de utilización del tiempo de los empleados en cada proceso, durante cada turno de producción. Cabe mencionar que para los procesos de normalizado y pintura, el valor de la variable de cantidad de empleados indica el porcentaje de utilización de un grupo de tres (3) y seis (6) operarios necesarios, respectivamente para cada proceso.

Los procesos de soldadura del cuerpo, grabar capacidad protectora del cilindro y la prueba hidrostática del cilindro requieren del segundo turno diurno, por lo cual, se necesita contratar un (1) empleado ($CECDB_{ik}$) en cada uno de estas etapas productivas, los demás procesos solo requieren un turno diurno de producción. En el proceso de ensamble de cilindros la cantidad de empleados en el turno diurno corresponde a 1,21, lo que indica que el operario puede llegar a trabajar un 21% adicional de su tiempo regular de trabajo, representado en horas extras, en el marco de la legislación laboral de Colombia que permite como tiempo suplementario el 25% del tiempo regular de trabajo. Por lo cual, este proceso puede prescindir del operario adicional ($CEDPDA_{ik}$) que dispone para el período de producción de estudio.

Se considera la posibilidad de hacer transferencia de trabajadores entre procesos similares, de tal manera que el tiempo restante disponible de la mano de obra en el período de estudio, conocido como un colchón de capacidad, se puede emplear en otros procesos productivos, dando un manejo efectivo al recurso más importante de una organización. Como en el caso del empleado que realiza el proceso de troquelado, rolado y embutido de bases, cuya utilización de su tiempo productivo corresponde al 61%, quien puede llegar a desarrollar el proceso de grabado, troquelado, rolado y embutido del cuello protector, cuya utilización de su tiempo productivo es de 34%, ocupando su tiempo total disponible en el período de estudio para ambos procesos productivos y prescindiendo del empleado requerido para este último proceso.

Producción. De acuerdo con los resultados se aprecia que los procesos fabrican las partes de cada uno de los cilindros en jornada regular diurna ($PJRSA_{ijkl}$, $PJRB_{ijkl}$) para atender la demanda total requerida o los requerimientos totales de producción. En ningún proceso se empleó la jornada regular nocturna ($PJRN_{ijkl}$).

Inventarios. Se evidencia los inventarios de partes de cada producto (NUI_{ijkl}) disponibles en cada proceso, al final del período de estudio, una vez que la demanda total requerida fue satisfecha.

Costo total. Este rubro determina los recursos monetarios necesarios en cada proceso productivo para atender los salarios de la mano de obra, los costos de mantenimiento de inventarios y las nuevas contrataciones requeridas. Es el resultado de la función objetivo planteado en la expresión 1. Se debe aclarar que este valor solo incluye el tiempo productivo del empleado, y no considera el costo del tiempo disponible representado en un colchón de capacidad

TABLA I
PARÁMETROS CONSTANTES Y RESTRICCIONES DEL ESTUDIO DE CASO

| Proceso (i) | Costo de una hora en Tiempo regular diurno (\$) | Costo de una hora en Tiempo regular nocturno (\$) | Número de máquinas disponibles por turno | Número de empleados disponibles | Número máximo de empleados por turno | Parte (j) | Producto (i) | Demanda (Unid) | Inventario de seguridad (Unid) | Demanda total requerida (Unid) | Capacidad máxima de almacenamiento (Unid) | Tasas de producción (unid/hora) |
|---|---|---|--|---------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| Corte 2 - Troquelado | 4.618,51 | 6.234,99 | 1 | 1 | 1 | Discos tapa | C5 | 500 | 0 | 500 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C9 | 500 | 0 | 500 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 12.000 | 22.000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | Discos fondo | C5 | 500 | 0 | 500 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 12.000 | 22.000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 30.000 | 375 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 20.000 | 200 |
| Troquelado - Rolado y Embutido | 4.618,51 | 6.234,99 | 1 | 1 | 1 | Bases | C9 | 500 | 0 | 500 | 20.000 | 200 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5000 | 20.000 | 200 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 3.000 | 13.000 | 20.000 | 200 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 20.000 | 100 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 20.000 | 200 |
| Grabado , Troquelado, rolado y Embutido | 4.618,51 | 6.234,99 | 1 | 1 | 1 | Cuello Protector | C9 | 500 | 0 | 500 | 30.000 | 272 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 30.000 | 272 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 30.000 | 272 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 30.000 | 272 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 4.000 | 127 |
| Embutida y Rebordeado | 4.618,51 | 6.234,99 | 1 | 1 | 1 | Tapa | C9 | 500 | 0 | 500 | 4.000 | 100 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5000 | 4.000 | 127 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 3.000 | 13.000 | 4.000 | 127 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 4.000 | 142 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 500 | 206 |
| Rolado | 4.618,51 | 6.234,99 | 1 | 1 | 1 | Cuerpos | C9 | 500 | 0 | 500 | 500 | 120 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 500 | 206 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 500 | 206 |
| Soldadura | 5.171,59 | 6.981,65 | 4 | 2 | 2 | Cuerpos | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 500 | 40 |
| | | | | | | | C5 | 5.000 | 0 | 5.000 | 500 | 40 |
| | | | | | | | C15 | 10.000 | 0 | 10.000 | 500 | 40 |
| Ensamble | 5.171,59 | 6.981,65 | 2 | 2 | 2 | Cilindros | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 500 | 20 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 500 | 100 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 500 | 100 |
| | | | | | | | C9 | 500 | 0 | 500 | 500 | 56 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 500 | 91 |
| Grabar capacidad protector | 4.618,51 | 6.981,65 | 1 | 1 | 1 | Cilindros | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 500 | 91 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 500 | 43 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 500 | 53 |
| | | | | | | | C9 | 500 | 0 | 500 | 500 | 63 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 500 | 79 |
| Normalizado | 13.27,.64 | 17.919,42 | 1 | 3 | 3 | Cilindros | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 500 | 79 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 500 | 40 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 1.500 | 188 |
| | | | | | | | C9 | 500 | 0 | 500 | 1.500 | 125 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 1.500 | 188 |
| Normalizado | 13.27,.64 | 17.919,42 | 1 | 3 | 3 | Cilindros | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 1.500 | 188 |

| Proceso (I) | Costo de una hora en Tiempo regular diurno (\$) | Costo de una hora en Tiempo regular nocturno (\$) | Número de máquinas disponibles por turno | Número de empleados disponibles | Número máximo de empleados por turno | Parte (j) | Producto (i) | Demanda (Unid) | Inventario de seguridad (Unid) | Demanda total requerida (Unid) | Capacidad máxima de almacenamiento (Unid) | Tasas de producción (unid/hora) |
|---------------------|---|---|--|---------------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| Prueba hidrostática | 5.171,59 | 6.981,65 | 1 | 1 | 1 | Cilindros | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 1.500 | 100 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 1.500 | 65 |
| | | | | | | | C9 | 500 | 0 | 500 | 1.500 | 63 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 1.500 | 65 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 1.500 | 65 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 1.500 | 50 |
| | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 500 | 1.000 | 163 |
| Pintura | 31.487,08 | 42.507,56 | 1 | 6 | 6 | Cilindros | C9 | 500 | 0 | 500 | 1.000 | 150 |
| | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 5.000 | 1.000 | 245 |
| | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 10.000 | 1.000 | 150 |
| | | | | | | | C45 | 3.000 | 0 | 3.000 | 1.000 | 100 |
| | | | | | | | | | | | | |

TABLA II
RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN AGREGADA DE LA PRODUCCIÓN EN LA INDUSTRIA METALMECÁNICA

| Proceso (I) | RESUMEN DE LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN EL ESTUDIO DE INVESTIGACIONES | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| | CEDA _k | CECDA _k | CECDPA _k | CEDB _k | CECDB _k | CEDPDB _k | CEN _k | CECN _k | CEDPN _k | Costo total (\$) | Parte (j) | Producto (i) | PJRD _{A_{ijk}} | PJRD _{B_{ijk}} | PJRN _{j_{ijk}} | NUI _{ijk} |
| Corte 2 - Troqueladora | 0,83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Discos fondo | Discos tapa | C5 | 583 | 0 | 83 |
| | | | | | | | | | | | | | C9 | 583 | 0 | 83 |
| | | | | | | | | | | | | | C15 | 5.157 | 0 | 157 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 22.282 | 0 | 287 |
| | | | | | | | | | | | Discos fondo | Discos tapa | C45 | 3.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 751 | 0 | 251 |
| | | | | | | | | | | | | | C15 | 5.157 | 0 | 157 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 22.287 | 0 | 287 |
| Troquelado - Rolado y Embutido | 0,61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Bases | Protector | C5 | 521 | 0 | 21 |
| | | | | | | | | | | | | | C9 | 521 | 0 | 21 |
| | | | | | | | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | Bases | Tapa | C18 | 13.042 | 0 | 42 |
| | | | | | | | | | | | | | C45 | 3.130 | 0 | 130 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 0 |
| Grabado , Troquelado, rolado y Embutido | 0,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Bases | Protector | C9 | 500 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C15 | 5.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | Bases | Tapa | C45 | 3.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 673 | 0 | 173 |
| Embutida y Rebordeado | 0,85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Bases | Protector | C9 | 620 | 0 | 120 |
| | | | | | | | | | | | | | C15 | 5.158 | 0 | 158 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 13.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | Bases | Tapa | C45 | 3.101 | 0 | 101 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 5.106 | 0 | 106 |
| Rolado | 0,47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Cuerpos | Cuerpos | C18 | 10.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C45 | 3.012 | 0 | 12 |
| | | | | | | | | | | | Cuerpos | Cuerpos | C15 | 3.952 | 1.048 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 7.904 | 2.096 | 0 |
| Soldadura | 2 | 0 | 0 | 0,53 | 0,53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Cilindros | Cilindros | C45 | 2.392 | 634 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 500 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C9 | 600 | 0 | 0 |
| Ensamble | 1,21 | 0 | 0,79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.021.292 | Ci _i li _j n | Ci _i li _j n | C15 | 5.039 | 0 | 39 |
| | | | | | | | | | | | | | C18 | 10.000 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C45 | 3.010 | 0 | 10 |
| | | | | | | | | | | | Ci _i li _j n | Ci _i li _j n | C5 | 482 | 189 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C9 | 487 | 191 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | C5 | 487 | 191 | 0 |

| Proceso (i) | CEDA _k | CECDA _k | CECPDA _k | CEDB _k | CECDB _k | CEDPDB _k | CEN _k | CECN _k | CEDPN _k | Costo total (\$) | Parte (j) | Producto (i) | PJRD _{A_{ijk}} | PJRD _{B_{ijk}} | PJRN _{A_{ijk}} | NUI _{ijk} |
|----------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------|---|---|--|---|---|
| Grabar capacidad protector | | | | | | | | | | | | C15 C18 C45 | 3.595 7.189 2.184 | 1.406 2.811 853 | 0 0 0 | 1 0 37 |
| Normalizado | 0,57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.627.943 | Cilindros | C5 C9 C15 C18 C45 C5 C9 C15 C18 C45 C5 C9 C15 C18 C45 | 634 518 5.126 10.000 3.051 456 455 3.335 6.591 2.054 593 571 5.000 10.072 3.149 | 236 235 1.725 3.409 1.062 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 134 18 126 0 51 192 190 60 0 116 93 71 0 0 149 | 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 |
| Prueba hidrostática | 1 | 0 | 0 | 0,52 | 0,52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.972.697 | Cilindros | 1.844.314 | | | | |
| Pintura | 0,61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.627.943 | Cilindros | | | | | |

4) Comparación método actual y método propuesto. En la tabla III se presentan los resultados de la cantidad de trabajadores requeridos para cada uno de los once procesos productivos por el método actual empleado por la empresa y el propuesto por PL, con sus respectivos costos de mano de obra y de contratación para el periodo de estudio. La solución óptima fue ajustada teniendo en cuenta las decisiones de trabajar horas extras en el proceso de ensamble de cilindros y la transferencia de trabajadores entre los procesos de troquelado, rolado y embutido de bases y el proceso de grabado, troquelado, rolado y embutido del cuello protector. Se evidencia que los costos totales por el método actual ascienden a \$27.427.693 y con la propuesta los costos corresponden a \$25.403.880, lo que representa una reducción del 7,4%, que sería un ahorro para la empresa y apoyaría su estrategia competitiva en el largo plazo.

C. Discusión

El modelo matemático de PL representa la planeación agregada de la producción para cada uno de los treinta procesos productivos de la empresa metalmecánica, que se caracteriza por ser de flujo flexible, a diferencia de otras investigaciones que lo han aplicado para sistemas de producción de flujo de línea [11; 13].

Este estudio empleó como técnica matemática la PL, aspecto que coincide con las investigaciones [2; 9; 12]. Las variables de decisión arrojaron valores continuos, que se interpretaron como el porcentaje de utilización del tiempo de los trabajadores requeridos para cada uno de los procesos productivos, hecho similar presentado en el estudio realizado por Quintero et al.

(2004) [19], lo que permitió tomar decisiones operacionales como: el empleo de tiempo extra cuando la utilización requerida no supere el 25% del tiempo regular por empleado o grupo de empleados; y la transferencia de trabajadores hacia otros procesos metalmecánicos, siempre y cuando el operario cuente con las habilidades requeridas para desarrollar esta actividad. Se diferencia de otros estudios donde se emplearon técnicas como la PL entera o la PL entera mixta, pero igualmente obtuvieron soluciones óptimas al problema de planeación agregada [8; 13; 16].

También difiere de los estudios realizados por Gansterer (2015) y Sultana et al. (2014), ya que éstos no determinaron las necesidades de trabajadores, las contrataciones y los despidos, pero si consideraron la subcontratación, que es una estrategia de producción que no se tuvo en cuenta debido a las políticas establecidas por la industria metalmecánica [10; 12].

La investigación se torna relevante para la empresa de estudio, debido a que los resultados basados en la optimización le permite minimizar sus costos asociados al plan, y de esta forma aprovechar al máximo los recursos productivos escasos. Además, el modelo matemático para la planeación agregada de la producción se puede implementar en las otras tres (3) empresas adscritas al grupo empresarial, como también lo sugieren [8; 11]. Con este modelo se pretende la creación de una herramienta que le permita a la organización maximizar su experiencia de uso, mejorando la forma como se suministra y administra la información de entrada, a través de plantillas de datos en Microsoft Excel que alimenten y den solución a la Función Objetivo, disminuyendo en lo posible las complejidades del modelo.

TABLA III
COMPARACIÓN DEL MÉTODO ACTUAL Y EL MÉTODO PROPUESTO

| Proceso | Método actual | | | | Método propuesto | | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|---|
| | Cantidad de empleados turno A | Cantidad de empleados turno B | Costo de contratación (\$) | Costo de mano de obra (\$) | Cantidad de empleados requeridos turno A | Cantidad de empleados requeridos turno B | Costo de contratación (\$) | Costo de mano de obra (\$) | Costo de mano de obra tiempo extra (\$) |
| Corte 2 - Troqueladora | 1 | 0 | | 1.108.442 | 1 | 0 | | 1.108.442 | |
| Troquelado - Rolado y Embutido | 1 | 0 | | 1.108.442 | | 0 | | | |
| Grabado , Troquelado, rolado y Embutido | 1 | 0 | | 1.108.442 | 1 | 0 | | 1.108.442 | |
| Embutida y Rebordeado | 1 | 0 | | 1.108.442 | 1 | 0 | | 1.108.442 | |
| Rolado | 1 | 0 | | 1.108.442 | 1 | 0 | | 1.108.442 | |
| Soldadura | 2 | 1 | 79.256 | 3.723.543 | 2 | 1 | 79.256 | 3.723.543 | |
| Ensamble | 2 | 0 | | 2.482.362 | 1,21 | 0 | | 1.241.181 | 325.810 |
| Grabar capacidad protector | 1 | 1 | 79.256 | 2.216.884 | 1 | 1 | 79.256 | 2.216.884 | |
| Normalizado | 3 | 0 | | 3.185.674 | 3 | 0 | | 3.185.674 | |
| Prueba hidrostática | 1 | 1 | 79.256 | 2.482.362 | 1 | 1 | 79.256 | 2.482.362 | |
| Pintura | 6 | 0 | | 7.556.899 | 6 | 0 | | 7.556.899 | |
| Costo total (\$) | 27.427.693 | | | | 25.403.880 | | | | |

D. Esquema del proceso de modelado.

En la figura 2 se aprecia el proceso desarrollado en la investigación, para la solucionar el problema de planeación agregada de la producción en una industria metalmecánica.

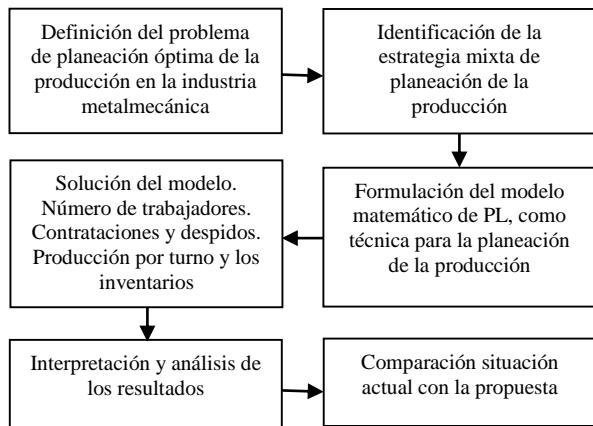


Fig. 2. Proceso de modelado para la planeación de la producción

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó un modelo matemático de PL para la planeación agregada de la producción en una industria metalmecánica

mediana, el cual se puede aplicar en las otras tres (3) empresas adscritas al grupo empresarial, o en cualquier otra industria del sector metalmecánico que cuente con características similares de operación a la de estudio, por medio de ajustes menores al modelo que incluya las estrategias propias de planeación de producción de estas organizaciones.

El plan agregado óptimo de producción desarrollado, representa una alternativa para la planificación táctica intermedia empresarial, que suministra información valiosa para la toma de decisiones en la gerencia de producción y resulta relevante por su enfoque basado en la optimización de los costos de producción, el cual es imprescindible para apoyar la ventaja competitiva empresarial en el largo plazo.

Se empleó una estrategia mixta de producción que incluyó las estrategias de persecución (contratación y despido) y nivel de inventarios, sin embargo, de acuerdo con los resultados se propuso la utilización de las horas extras en el proceso de ensamble de cilindros, debido a que éste requiere de 1,21 empleados, lo que indica que el operario puede llegar a trabajar un 21% adicional de su tiempo regular de trabajo, en el marco de la legislación laboral de Colombia que permite como tiempo suplementario el 25% del tiempo regular.

Los procesos de soldadura del cuerpo, grabar capacidad protectora del cilindro y la prueba hidrostática del cilindro requieren del segundo turno diurno, por lo cual, se necesita

contratar un (1) empleado en cada uno de estas etapas productivas, los demás procesos solo requieren un turno diurno de producción, ningún proceso requiere del turno nocturno.

Se consideró la transferencia de trabajadores entre procesos similares, como el caso del operario del proceso de troquelado, rolado y embutido de bases, cuya utilización de su tiempo productivo corresponde al 61%, quien puede llegar a desarrollar el proceso de grabado, troquelado, rolado y embutido del cuello protector, cuya utilización de su tiempo productivo es de 34%, de esta manera ocupar su tiempo total disponible para ambos procesos productivos en el período de estudio, y prescindir del empleado requerido para este último proceso.

Se comparó el método actual empleado por la empresa y el propuesto por PL, cuya solución óptima fue ajustada considerando las decisiones operacionales de trabajar horas extras y la transferencia de trabajadores. Los costos de la mano de obra y de contratación para el periodo de estudio por el método actual corresponden a \$27.427.693 y el propuesto a \$25.403.880, por lo cual se evidencia una reducción del 7,4%, que se torna valioso para la gestión operacional de la industria metalmecánica.

RECOMENDACIONES

Se agradece al personal administrativo y operativo de la empresa metalmecánica, por su valiosa colaboración en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] R. B. Chase, *[et al.]*, *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros*, 12^a ed., México, McGraw-Hill, 2009, p. 776.
- [2] O. D. Boiteux, R. Forradella, R. Palma and H. Guiñazu, H. (2010, Dic). Modelo matemático para la planificación agregada de la producción de IMPSA. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. [en línea], 2(4), p. 90-112. Disponible en: <http://stat.necat.incubadora.ufsc.br/index.php/IJIE/article/view/622>.
- [3] O. D. Boiteux, A. Corominas, A. Lusa. (2007, Marzo). Estado del arte sobre planificación agregada de la producción. Universidad Politecnica de Cataluña, [en línea]. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/747>.
- [4] J. Boirivant. (2011, Ene). El análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura. *Reflexiones*. [en línea], 90(1), p. 161-173. Disponible en: <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/1478>. DOI: 10.15517/RR.V90I1.1478
- [5] H. A. Taha, , *Investigación de operaciones*, 7^a ed., México, Pearson Education, 2004, p. 848.
- [6] Y. Colina. (2011, Jul). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. *ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*. [en línea], 2(7), p. 85-104, Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/Inge-Industrial/volII-n7/art6.pdf>.
- [7] C. Fernández. (2011, Ene). Programación lineal e Ingeniería Industrial: una aproximación al estado del arte. *ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*. [en línea], 2(6), p. 61-78. Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/Inge-Industrial/VolIII-n6/art4.pdf>.
- [8] J. P. Vasquez and C. G. Velis. (2014, Oct). Plan Agregado de Producción Mediante el Uso de un Algoritmo de Programación Lineal: Un caso de Estudio para la pequeña industria. *Politecnica*. [en línea], 34(1), p. 1-7. Disponible en: http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/254.
- [9] I. Madanhire and C. Mbohwa. "Aggregate production planning framework in a multi-product factory". In *Proceeding of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (March 3-5, 2015), Dubai, UAE, [online], p. 2531-2540, Available: <http://hdl.handle.net/10210/14344>.
- [10] M. Sultana, S. Shohan and F. Sufian. (2014, Sep). Aggregate planning using transportation method: a case study in cable industry. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*. [online], 5(3), p. 19-35. Available: <http://search.proquest.com/openview/3dd388b1c832021360dc55e66e8b2c98/1?pq-origsite=gscholar>. DOI: 10.5121/ijmvsc.2014.5302.
- [11] J. R. Munhoz and R. Morabito. (2014, May). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*. [online]. 107, p. 45-57. DOI: 10.1016/j.compag.2014.05.016
- [12] M. Gansterer. (2015, Jun). Aggregate planning and forecasting in make-to-order production systems. *International Journal of Production Economics*. [online]. 170, p. 521-528. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.06.001
- [13] F. M. Takey and M. A. Mesquita. (2006, Nov). Aggregate Planning for a Large Food Manufacturer with High Seasonal Demand. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, [online], 3(1), p. 05-20. Available: https://bjopm.emnuvens.com.br/bjopm/article/view/BJV3N1_2006_P1
- [14] T. G. Motoa, J. C. Osorio and J. P. Orejuela. (2013, Oct). Planificación jerárquica de la producción (Hierarchical production planning) El estado del arte y presentación de experiencias. *Heurística*, [en línea]. 14, p. 35-50. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10893/6114>.
- [15] L. Krajewski, *[et al.]*, *Administración de operaciones, procesos y cadenas de valor*, 8^a ed., México, Pearson Education, 2008, p. 752.
- [16] V. Uluçam. (2010). Aggregate Production Planning Model Based On Mixed Integer Linear Programming. *Temmuz*, [en línea], 9(34), p. 195-201. Available: <http://dspace.marmara.edu.tr/handle/11424/1608>
- [17] H. A. Taha, *Investigación de operaciones*, 8^a ed., México, Pearson Education, 2012, p. 824.
- [18] J. Domínguez, *[et al.]*, *Dirección de operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Madrid, McGraw-Hill, 1995, p. 266.
- [19] R. S. Quintero, A. Correa and J. A. Aristizábal. (2004, Mar). Un enfoque de análisis multiobjetivo para la planeación agregada de producción. *Dyna*, [en línea]. 71(141), p. 15-27. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/496/49614104.pdf>.



Alvaro Junior Caicedo Rolon, nació en Cúcuta, Colombia en 1977. Ingeniero de Producción Industrial de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, en 2002. Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristobal, Venezuela, en 2008. Actualmente estudia el doctorado en Ingeniería énfasis en Ingeniería Industrial en la Universidad del Valle.

Desde el año 2006, ha estado trabajando en la Universidad Francisco de Paula Santander. Él es profesor Asistente tiempo completo del departamento de Procesos Industriales desde el año 2014 y profesor en la especialización en Dirección de Operaciones y Logística de la Universidad de Santander, sede Cúcuta. Ha sido Director del programa Tecnología en Procesos Industriales y director del grupo de investigación en Productividad y Competitividad (Producción, Cadenas de Suministro y Simulación). Ha escrito varios artículos científicos en revistas indexadas relacionados con la planeación y programación de la producción, y de necesidades de capacitación en habilidades gerenciales para directores de producción.

Las áreas de interés son: La programación matemática y heurísticas aplicadas en la planeación y programación de producción y las operaciones. La teoría de restricciones aplicada en la mejora de la gestión de la producción. La simulación de eventos discretos aplicada en la logística hospitalaria, y el análisis de datos.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3651-3364>



Angélica María Criado, nació en Cúcuta, Colombia en 1991. Ingeniera Industrial de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, en 2015.

Desde el año 2016, ha estado trabajando en Centrales Electricas de Norte de Santander, empresa de servicios públicos domiciliarios prestadora del servicio de energía eléctrica en el departamento Norte de Santander, Sur de Cesar y Sur de Bolívar. Actualmente se encuentra liderando el proyecto de implementación del Código de Medida, el cargo desempeñado es el de profesional comercial (Comercial T&D), equipo encargado de la compra y venta de energía en el mercado de energía mayorista.

Las áreas de interés son: La programación matemática y heurísticas aplicadas en la planeación y programación de producción y las operaciones. La teoría de restricciones aplicada en la mejora de la gestión de la producción, y el análisis de datos.



Kerly Morales Ramón, nació en Los Patios, municipio de Norte de Santander en 1991, es Ingeniería Industrial de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta graduada el año 2015, actualmente estudia en la Maestría en Estadística Aplicada de la Universidad

Santo Tomás en la ciudad de Bogotá. Cuenta con estudios adicionales business intelligence & data mining.

Desde el 2016 trabaja en la Universidad Simón Bolívar sede Cúcuta. Durante su paso por esta institución ha liderado las áreas de Estadísticas Institucionales, Reportes de Información, Inteligencia Competitiva, y a partir del 2018 coordina la Oficina de Planeación de la sede Cúcuta, a cargo de apoyar la implementación y hacer seguimiento al marco estratégico institucional orientado al cumplimiento de la Misión y al mejoramiento continuo de la Universidad.

Las áreas de interés son: Planeación estratégica, Estadística aplicada, Educación Superior, Modelos de gestión organizacionales, programación matemática y Teoría de restricciones.