

Artículo de Investigación

Optimización de los procesos operativos mediante la teoría de restricciones en una empresa metalmecánica

Operational Processes Optimization through the theory of constraints in a metal-mechanical company

Ricardo Espín-Guerrero¹, Byron Toalombo-Rojas^{1*}, Ángel Moyolema-Chaglla¹, Adriana Altamirano-Salazar²

¹ *Electrónica e Industrial, Facultad de Sistemas, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 180207; ricardoespin81@gmail.com; angelgus@hotmail.es*

² *Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información y la Comunicación, Universidad Tecnológica Indoamérica, Ambato, Ecuador, 180103; adrymichu@gmail.com*

*Correspondencia: byronmtr@gmail.com

Citación: Espín-Guerrero, R., Toalombo-Rojas, B., Moyolema-Chaglla, A., & Altamirano-Salazar, A., (2022). Optimización de los procesos operativos mediante la teoría de restricciones en una empresa metalmecánica. *Novasinerгия*. 5(2). 33-57.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.10.03>

Recibido: 21 abril 2022

Aceptado: 09 junio 2022

Publicación: 05 julio 2022

Novasinerгия
ISSN: 2631-2654

Resumen: El objetivo de este trabajo fue optimizar los procesos operativos mediante la teoría de restricciones (Theory of Constraints, TOC) en una empresa metalmecánica dedicada a la elaboración de máquinas de procesamiento de madera. Como parte de la muestra se consideraron las siete máquinas con demanda permanente y todos los procesos operativos. Se realizó un estudio de tiempos y se valoraron los recursos disponibles para cuantificar la utilización de los puestos de trabajo. Se identificaron restricciones en los procesos de corte y torneado, con porcentajes de utilización que impedían cubrir la demanda mensual media. A partir de las restricciones y la aplicación de la programación lineal entera (PLE) se determinó que el volumen de producción maximizado no abastecía la demanda media mensual. Se tecnificó el proceso de corte y se redistribuyeron los operarios, con lo que se eliminaron las restricciones. Sin embargo, para optimizar la producción según los recursos disponibles se aplicó nuevamente la PLE. De esta manera se optimizó la producción, cubriéndose la capacidad requerida por la demanda e incrementándose la utilidad bruta en un 12.91%.

Palabras clave: Máquinas de procesamiento de madera, optimización, programación lineal entera (PLE), procesos operativos, teoría de restricciones (TOC).

Abstract: *This work aimed to optimize the operating processes through the Theory of Constraints (TOC) in a metal-mechanical company dedicated to manufacturing wood processing machines. The seven machines with permanent demand and all the operating processes were considered part of the sample. A process time and the available resources were evaluated, to quantify the utilization of the work centers. We identified restrictions in the cutting and turning processes, with utilization percentages that prevented covering the average monthly demand. Based on the constraints and integer linear programming (ILP), the results show that the maximized production volume did not meet the average monthly demand. Therefore, the cutting process was technified, and the operators were redistributed, thus eliminating the restrictions. However, to optimize production according to the available resources, PLE was again applied. In this way, we optimized production covering the capacity required by the demand and increasing the gross profit by 12.91%.*

Keywords: *Integer linear programming (ILP), operational processes, optimization, theory of constraints (TOC), wood processing machines.*



Copyright: 2022 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

La fabricación y producción de maquinaria es un proceso complejo en el que intervienen muchos aspectos que determinan y restringen los sistemas de producción (Xia, 2013). En las empresas pequeñas la cadena de producción suele presentar algunos inconvenientes, que representan restricciones que obstaculizan el buen desempeño de los procesos operativos. Entre las principales razones por las que se presentan las restricciones consta la obsoleta organización de las actividades, debido al hecho que la producción no suele ser continua, sino que más bien suele responder al volumen de los pedidos de producción recibidos por la demanda del mercado, que es variable y poco predecible. Esto ocasiona que la distribución en planta y la asignación de los recursos no sea optimizada (Sari, Syahputri, Rizkya, & Siboro, 2019).

En vista de la problemática existente y los beneficios que supone la aplicación de la TOC en las empresas de producción, la presente investigación tiene por objeto fundamentar la importancia de su utilización para la optimización de los procesos operativos, como una alternativa viable de solución a los problemas referentes a la existencia de restricciones y elementos que limitan el ritmo de producción en las empresas metalmeccánicas. Para llevar a cabo el presente estudio inicialmente surge la pregunta de investigación: ¿Cómo se puede aplicar la teoría de restricciones para optimizar los procesos operativos en una empresa metalmeccánica? Para dar respuesta a la pregunta de investigación es conveniente inicialmente abordar el fundamento teórico de la TOC y de la optimización a través de PLE.

El origen de la TOC se remonta a los años 70's, cuando Eliyahu Goldratt y su equipo desarrollaron un software de programación finita para la optimización de sistemas de producción conocido como Tecnología de Producción Optimizada (Ikeziri, Souza, Gupta, & De Camargo, 2018). En ese sentido, en sus comienzos la TOC se utilizaba para planificar el proceso de producción y asignación de recursos, pero el alcance de su contenido ha evolucionado en los nuevos escenarios globalizados y tecnológicos, ampliándose su perspectiva hasta integrarse como toda una filosofía de gestión, que evalúa los procesos como eslabones de una misma cadena y los considera dependientes entre si (Melendez, Zoghbe, Malvacias, Almeida, & Layana, 2018). Actualmente se concibe a la TOC como una filosofía de gestión que se centra en eliminar el punto más débil del funcionamiento del sistema (Kumar, Siddiqui, & Suhail, 2020).

La TOC es principalmente útil para mejorar los procesos y maximizar la eficiencia en sistemas con recursos limitados (Pacheco, Antunes Junior, & de Matos, 2021), se desarrolla a través de cinco pasos de enfoque para la gestión de la producción, siendo éstos: identificación de la restricción, explotación de la restricción, subordinación de todo a la restricción, elevación de la restricción (aumento a la capacidad) y nuevo comienzo (Kumar *et al.*, 2020). La TOC puede utilizarse en casi todos los sectores empresariales, entre los que se encuentran las industrias metalmeccánicas (Janosz, 2018).

Se han desarrollado algunas investigaciones acerca del uso de la TOC para superar los problemas de restricciones y la optimización del flujo de producción (Sari *et al.*, 2019). En el estudio desarrollado por Herrera-Vidal, Campo-Juvinao, Bernal-Hernandez, & Tilves (2018) sobre un modelo de TOC con consideraciones de optimización en una industria del

sector plástico, se expone la utilidad de la TOC y la optimización para la toma de decisiones operativas. Los investigadores consiguieron un incremento de la utilidad del negocio de un 14.5% gracias a la aplicación de la metodología. Esto refleja que existe una valiosa oportunidad para el mejoramiento de la utilidad empresarial a partir de la optimización de los recursos disponibles a través de la adopción de la TOC.

Paralelamente, de acuerdo a Romero, Ortiz, & Caicedo (2019) la aplicación de la TOC permite establecer las cantidades a fabricar de diversos tipos de unidades de producción y la secuencia correspondiente, a través de la maximización de la contabilidad del *throughput* o rendimiento. En su estudio acerca de la utilización de la TOC para la optimización mediante PLE en la industria de muebles, los autores consideraron como restricciones los puestos de trabajo que tenían una utilización superior al 100%, siendo la restricción inicial en el mecanizado, con una utilización del 193.71%, en tanto que después de la explotación, subordinación y elevación de la restricción a través de la optimización con la PLE, permitieron que se incrementen las utilidades en 87.62%. Este trabajo refuerza lo expuesto anteriormente y puntualiza los indicadores que permiten valorar el beneficio obtenido, destacándose el caso del número de unidades de producción, la contabilidad del *throughput*, el porcentaje de utilización y la utilidad económica. De entre los mencionados, los *throughput* son los indicadores de uso común para medir los resultados obtenidos a partir de las restricciones internas (Cortabarría, Martínez, & Mendoza, 2016).

Por su parte, Tsai, Lai, & Chang (2007) elaboraron un algoritmo para optimizar la decisión de productos conjuntos basado en la TOC en el ámbito industrial y productivo. De acuerdo con la secuencia de prioridad del recurso más restringido, desarrollaron el programa maestro de producción inicial. Los pasos siguientes encontraron el mejor camino para alcanzar la solución óptima bajo la dirección de todos los recursos a la restricción existente. De igual manera, Altumi & AL-yaseer (2016) realizaron un trabajo investigativo acerca de la mezcla óptima de producción a través de la TOC y la PLE. A partir de los resultados obtenidos, los autores destacan que el uso de la TOC para la optimización de la producción es útil cuando existe más de una restricción, caso contrario es igual o más efectiva la utilización de un enfoque convencional. Es decir, los autores sugieren que se emplee la TOC para optimizar la producción solamente cuando se identifica que haya más de una restricción.

Abisambra-Lemus & Mantilla-Cuadros (2014) añaden que la aplicación de la TOC permite identificar la capacidad restrictiva, de manera que sirva como base para enfocar los esfuerzos en conseguir que ésta se incremente hasta que cubra la demanda existente. Entre las alternativas viables para la optimización de los procesos de producción mediante la aplicación de la TOC está la opción de prescindir de los recursos excedentes en aquellos procesos que tengan una capacidad superior a la demandada, con la posibilidad de hacer también una reducción de personal. Cortabarría *et al.* (2016) declaran que para aplicar la TOC en las empresas del sector metalmeccánico se debe llevar a cabo un estudio del trabajo, tendiente a identificar la velocidad de los recursos más lentos o restricciones, que son los que determinan la velocidad del sistema de producción.

Por otra parte, con respecto a los modelos de optimización y particularmente sobre la PLE, Bermúdez (2011) destaca que tiene que ser manejable, resoluble y representativa de la situación original que se desea modelar. De esa manera se podrá asegurar que las decisiones que se adopten respondan a una necesidad objetiva y real. Las principales contribuciones de la PLE se centran en la reducción de costos de producción y el ahorro de los recursos disponibles en una organización. La PLE se suele emplear para la resolución de problemas de programación de producción, balance de líneas, asignación de materiales, así como para maximizar el beneficio a través del *throughput* o rendimiento de todo el sistema (Guédez, 2011).

Bajo el contexto señalado, en la presente investigación se analiza la situación actual de los procesos operativos para la fabricación de máquinas de procesamiento de madera en una empresa metalmeccánica. Adicionalmente se propone una alternativa de solución mediante la aplicación de la TOC para la optimización de los procesos operativos y el mejoramiento del flujo de los recursos y finalmente se evidencia el impacto en el cambio de los procesos operativos, mediante comparación de la situación actual y propuesta.

2. Metodología

Se seleccionó una empresa representativa en el sector metalmeccánico, con base en la trayectoria que tiene en el servicio a la comunidad, teniendo además como criterios de inclusión la disponibilidad de datos de historial de producción y el interés de la dirección de la empresa en la implementación de herramientas que permitan la optimización de los procesos operativos. Como parte del proceso investigativo, en primer lugar, se hizo una valoración de la situación actual de una empresa metalmeccánica con la finalidad de identificar las restricciones existentes en la cadena de producción. Se desarrolló un estudio individualizado de las restricciones que limitan el normal desempeño de los procesos de fabricación de las máquinas de procesamiento de madera. Posteriormente se procedió a la aplicación de la TOC a través de la explotación de la restricción, subordinación de todo a la restricción, elevación de la restricción y reinicio. Se midieron los tiempos de ejecución de los procesos y se realizó una diagramación de los mismos, con la finalidad de valorar los desperdicios existentes. Adicionalmente se estableció una optimización de los procesos, considerando como función objetivo la maximización de la contabilidad del rendimiento, la cual más adelante determinó la utilidad bruta obtenida de la producción.

2.1 Población y muestra

La población está conformada por los procesos de fabricación (incluyendo a los correspondientes puestos de trabajo), así como las unidades producidas (máquinas de procesamiento de madera). Se consideraron a todos los procesos que corresponden a la parte operativa con sus respectivos puestos, conforme la información mostrada en la tabla 1. Debido a que los procesos y actividades desarrolladas en la fabricación de todos los tipos de máquinas de procesamiento de madera son similares, se presenta un diagrama de flujo de procesos general (Figura 1), utilizando la simbología del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI por sus siglas en inglés), que representa las operaciones realizadas y la secuencia en la que se realizan cada una de ellas. El primer proceso es el trazado, seguido del corte, enderezado, doblado, forjado, soldado, taladrado,

torneado, fresado, limado, soldado, ensamblaje, cepillado, pulido, pintado y pruebas de funcionamiento.

Tabla 1. Procesos operativos de la fabricación de máquinas de procesamiento de madera.

Proceso	Puestos de trabajo	Área
Trazado	Trazado	
Corte	Sierra de mano, Sierra de cinta, Cortadora de plasma manual	Preparación
Enderezado	Prensa hidráulica	
Doblado	Doblado	
Forjado	Fragua	
Soldado	Soldadora SMAW, Soldadora MIG	
Taladrado	Taladro de mano, Taladro de pedestal	Maquinado
Torneado	Torno	
Fresado	Fresadora	
Limado	Limado manual, Cepillo de vaivén	
Ensamblaje	Matrices, Herramientas manuales	Ensamblaje
Cepillado	Cepillo de puente	
Pulido	Pulidora, Esmeril	Acabados
Pintado	Compresor, Pistola de pintura	
Pruebas	Pruebas de funcionamiento	Pruebas

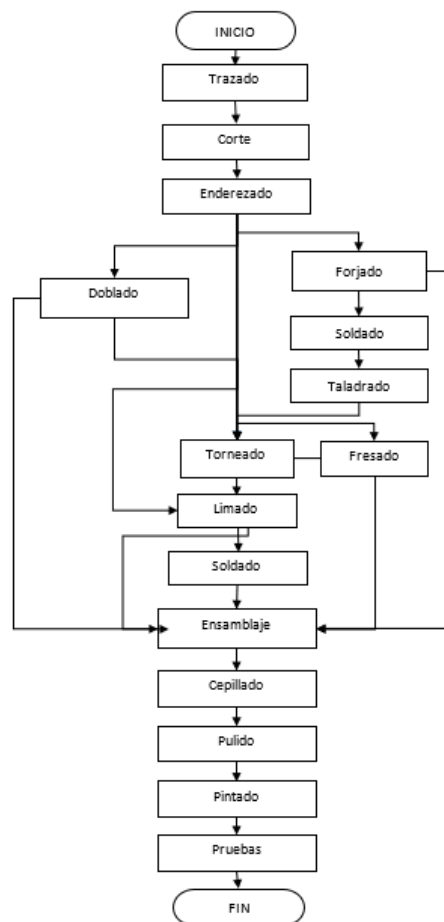


Figura 1: Procesos productivos de la empresa metalmecánica.

Con la finalidad de cuantificar la capacidad de producción se realizó un estudio de tiempos, a partir del establecimiento de un muestreo obtenido mediante la aplicación de la fórmula propuesta por Niebel & Freivalds (2014) (Ecuación (1)).

$$n = \left(\frac{t s}{k \bar{x}} \right)^2 \quad (1)$$

Donde: n tamaño de la muestra. t valor de la distribución t de Student según los grados de libertad. s desviación estándar de las observaciones de la prueba piloto. k fracción aceptable de la media \rightarrow 5%. \bar{x} media de las observaciones piloto realizadas.

La aplicación de la ecuación (1) en cada una de las actividades que conforman los procesos operativos de la elaboración de máquinas de procesamiento de madera requirió de una prueba piloto inicial, que tenía por objeto arrojar datos que permitan calcular el valor de la media y la desviación estándar. A su vez para determinar el valor de la t de *student* se consideró una confiabilidad de 95%. Una vez realizado el cálculo correspondiente se decretó que la cantidad de mediciones requeridas es de 10, tomando en cuenta además la viabilidad técnica de realización de las mediciones, ya que la obtención de una unidad de producción tarda entre 8 y 30 días laborales según el tipo de máquina a ser elaborada.

En lo que respecta a las unidades de producción, es decir las máquinas de procesamiento de madera, se consideró una muestra no probabilística estratificada, seleccionada de forma aleatoria considerando los principales tipos de máquinas que se fabrican en la empresa. En este sentido, de acuerdo a la cantidad media anual de máquinas elaboradas se clasificó según el análisis de la metodología de clasificación ABC de acuerdo al volumen de ventas. El análisis ABC se basa en el principio que “una pequeña parte de los productos regularmente pueden representar la mayor proporción del uso total del material del inventario y recursos existentes” (Indrasan, Rajput, & Chaware, 2018), al mismo tiempo esta metodología es aplicable al pronóstico de la demanda en ambientes multiproducto y de alta variabilidad (Méndez & López, 2013), razón por la que se consideró su aplicación en el presente estudio. Para el efecto se estableció el nivel de ventas anuales, siendo la gama A la que representa a los productos elaborados en gran cantidad. Mientras que la categoría B forman parte aquellos productos que son vendidos habitualmente, aunque en menor cantidad que los anteriores. Por su parte, los productos de la gama C son aquellos que tienen un bajo nivel de pedidos. El muestreo se determinó según los niveles ABC, se estudiaron todas las máquinas de los niveles A y B, así como la principal máquina de nivel C por volumen de producción. El detalle de la muestra seleccionada se presenta en la tabla 2.

De acuerdo a la información de la tabla 2, los principales productos que se fabrican en la empresa metalmecánica son: sierras circulares, cepilladoras, canteadoras, sierras de cinta, tupys, machimbreadores, afiladoras de cuchillas, tornos, cepilladoras, pulidoras de pisos y laminadoras. El volumen de producción mensual obedece a los pedidos recibidos, los cuales suelen ser medianamente estables con pequeñas variaciones; a partir de la información disponible se estableció una media aproximada de unidades fabricadas para cada tipo de máquinas de procesamiento de madera, tomando en cuenta el historial de los últimos cinco años.

Tabla 2. Muestra de unidades de producción de máquinas de procesamiento de madera.

Ítems	Producción de máquinas	Tamaño de la muestra	Nivel ABC
1	Sierra circular	10	A
2	Cepilladora de 45 cm	10	A
3	Canteadora	10	A
4	Sierra de cinta	10	B
5	Tupy	10	B
6	Machiembrador	10	B
7	Afiladora de cuchillas	10	C

2.2 Técnica e instrumentos de recolección y procesamiento de la información

La recolección de la información se llevó a cabo mediante la técnica de la observación directa, con el empleo de ficha de recolección de datos de tiempos y unidades de producción. El procedimiento desarrollado para la recopilación de la información obedece a la secuencia estándar establecida en los pasos para la aplicación de la TOC (Trojanowska & Dostatni, 2017). De modo que en primer término se identificaron los procesos operativos a través de una diagramación mediante la simbología ANSI (Chapin, 1970). Ya como parte de la aplicación de la TOC, inicialmente se hizo la identificación de las restricciones de la cadena de producción; seguidamente se procedió a elevar la restricción mediante incorporación de nuevas máquinas y reordenamiento de los operarios; luego se explotó la restricción a través de un modelo de PLE con una función objetivo de maximización del rendimiento; una vez maximizada la función se procedió a subordinar todo a la restricción que implica la determinación de las cantidades a producir para optimizar los recursos disponibles y satisfacer la demanda de producción existente; en ese punto se efectuó un reinicio, que conllevó una determinación de nuevas restricciones y la repetición del procedimiento anteriormente indicado.

Los tiempos observados se midieron en una muestra de 10 observaciones por cada actividad, mediante el empleo de un cronómetro digital que tenía una precisión ± 50 ms/día, las mediciones se hicieron con vuelta a cero y los datos se registraron en fichas de observación. Para la valoración de la habilidad y desempeño de los operarios, con miras a la determinación del tiempo normal, se consideraron las tablas estandarizadas que otorgan una calificación de 75, 100 o 125; mientras que el tiempo estándar se calculó tomando en cuenta los suplementos de trabajo (Niebel & Freivalds, 2014). Para la resolución del problema de la PLE se utilizó el software libre R versión 4.1.2 (R Foundation for Statistical Computing, 2021, <https://www.r-project.org/foundation/>), con la finalidad de hallar la función objetivo de maximización del rendimiento.

El establecimiento de la PLE requiere de una función objetivo y restricciones para el problema, no obstante, se comienza por definir las variables y los parámetros constantes.

Función objetivo.

El objetivo planteado es la maximización del rendimiento conforme se muestra en la ecuación (2):

$$FO = \text{Máx} \sum_{i=1}^N R_i \cdot C_i \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (2)$$

Donde: FO = Función objetivo. C_i = Cantidad mensual a producir de cada máquina i . i = Subíndice que identifica el tipo de producto a fabricar (máquinas de procesamiento de madera), donde $i = 1, 2, 3, \dots, 7$. N = número total de máquinas de la muestra (7 unidades).

R_i = Rendimiento o velocidad a la que un producto se mueve a través del puesto de trabajo (*throughput*) por producto i fabricado.

Para las máquinas de procesamiento de madera a ser fabricadas se emplea la siguiente identificación para el subíndice i : 1 Sierra circular, 2 Cepilladora de 45 cm, 3 Canteadoras, 4 Sierra de Cinta, 5 Tupy, 6 Cepillo Machimbre, 7 Afiladora de Cuchillas.

Restricciones del problema

El modelo matemático considera las siguientes restricciones: demanda, capacidad disponible y variables enteras y no negativas.

a) Restricción de demanda, según se muestra en la ecuación (3):

$$C_i \geq D_i \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (3)$$

Nota: En la fase de explotación de la restricción se considera que el límite superior de la capacidad de producción sería menor o igual a la demanda de cada máquina. Es decir, de acuerdo a la ecuación (4):

$$C_i \leq D_i \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (4)$$

b) Restricción de capacidad. Para el o los puestos de trabajo críticos se calcula mediante la ecuación (5):

$$\sum_{i=1}^N T_{ri} \cdot C_i \leq T_d \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (5)$$

c) Restricción de variables enteras y no negativas. Debido a la naturaleza de los productos (máquinas de procesamiento de madera), se requiere que las variables de decisión sean enteras y no negativas, conforme se expresa en la ecuación (6):

$$C_i \in Z^+ \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (6)$$

Donde: D_i = Demanda mensual de cada producto i . T_{ri} = Tiempo requerido por producto i en cada puesto de trabajo crítico. T_d = Tiempo disponible total de cada puesto de trabajo crítico. C_i = Cantidad mensual a producir de cada máquina i . Z^+ = Números enteros positivos.

De acuerdo a las condiciones establecidas para el problema de optimización del rendimiento en la producción de las siete máquinas de procesamiento de madera de la empresa metalmecánica, la ecuación (2) se convierte en la función a maximizar indicada en la ecuación (7).

$$FO = \text{Máx} \sum_{i=1}^7 R_i \cdot C_i \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, 7. \quad (7)$$

Los valores de los rendimientos (R_i) de cada máquina se obtuvieron a partir de la diferencia entre el precio de venta al público (PVP) y el costo de los materiales invertidos para la elaboración de cada máquina. Es decir, la expresión de la ecuación (8).

$$R_i = PVP_i - \text{Costo de materiales}_i \quad (8)$$

De esta manera la función de maximización es la expresada en la ecuación (9).

$$FO = \text{Máx: } 1504.99 C_1 + 1903.58 C_2 + 1400.78 C_3 + 694.44 C_4 + 1161.17 C_5 + 4187.68 C_6 + 470.87 C_7 \quad (9)$$

Las restricciones se convierten en:

a) Restricción de demanda:

En este caso se considera que el límite superior de la capacidad sería menor o igual a la demanda de cada máquina, dado que la utilización es superior al 100%, lo que no abastece la demanda existente. Es decir que la ecuación (4) se convierte en:

$$C_1 \leq 20, C_2 \leq 12, C_3 \leq 10, C_4 \leq 4, C_5 \leq 3, C_6 \leq 2, C_7 \leq 1$$

b) La restricción en los procesos críticos a partir de la ecuación (5) es la mostrada en la ecuación (10):

$$\sum_{i=1}^7 T_{ri} \cdot C_i \leq T_d, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 7. \quad (10)$$

Para el caso del proceso crítico de corte con sierra de mano se tiene:

$$8 C_1 + 0.8 C_2 + 0.4 C_3 + 4.8 C_4 + 0 C_5 + 1.6 C_6 + 0.8 C_7 \leq 176 \frac{h}{mes}$$

Para el caso del proceso crítico de torneado se tiene:

$$16 C_1 + 10 C_2 + 10 C_3 + 10 C_4 + 10 C_5 + 50 C_6 + 30 C_7 \leq 704 \frac{h}{mes}$$

c) Restricción de variables enteras y no negativas a partir de la ecuación (6):

$$C_1 \geq 0, C_2 \geq 0, C_3 \geq 0, C_4 \geq 0, C_5 \geq 0, C_6 \geq 0, C_7 \geq 0$$

La resolución del problema conlleva establecer la cantidad de máquinas de procesamiento de madera de cada tipo que se podrían fabricar optimizando la capacidad actual de las restricciones. De manera que se obtenga el mayor rendimiento y utilidad en un mes de producción. Adicionalmente, se estableció que el parámetro de interés para valorar la capacidad de producción es el porcentaje de utilización, que se expresa mediante la relación entre el tiempo requerido y el tiempo disponible en cada puesto de trabajo, conforme la ecuación (11):

$$\text{Utilización del puesto de trabajo} = \frac{\text{Tiempo requerido}}{\text{Tiempo disponible}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Se considera que, si el porcentaje de utilización excede el valor del 100%, el puesto de trabajo correspondiente no abastece el requerimiento, por lo que restringe el normal desempeño del proceso operativo (Romero *et al.*, 2019).

3. Resultados

3.1 Identificación de la restricción dentro de la cadena de producción

Con base en la aplicación de la TOC, la primera etapa llevada a cabo fue la identificación de la restricción dentro de la cadena de producción. De acuerdo a la información de la tabla 3, las restricciones correspondían a los procesos de corte con sierra de mano y torneado, que tienen porcentajes de utilización de 111.82% y 105.11%, respectivamente.

Tabla 3. Identificación de la restricción, a partir del porcentaje de utilización mensual.

Proceso	Puestos de trabajo	Operarios	Número de máquinas	Tiempo unitario de producción (horas)							Capacidad mensual requerida (h)	Capacidad mensual disponible (h)	Utilización (%)
				Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machibre	Afiladora de Cuchillas			
Trazado	Trazado	2	4	4	8	2	4	8	16	16	284	352	80.68
	Sierra de mano	1	2	8	0.8	0.4	4.8	0	1.6	0.8	196.8	176	111.82
Corte	Sierra de cinta	1	2	4	1.8	0.8	1.6	4	6.4	3.2	144	176	81.82
	Cortadora de plasma manual	1	1	4	1.4	2.8	1.6	4	8	4	163.2	176	92.73
Enderezado	Prensa hidráulica	1	1	4	2	4	2	2	4	4	170	176	96.59
Doblado	Doblado	1	1	2	2	2	8	4	16	8	168	176	95.45
Forjado	Fragua	2	2	3	8	4	4	4	16	0	256	352	72.73
Soldado	Soldadora SMAW	1	3	2	0.8	1.2	0.8	0.8	5.6	0.8	79.2	176	45.00
	Soldadora MIG	2	4	8	3.2	2.8	7.2	7.2	10.4	7.2	304.8	352	86.59
Taladrado	Taladro de mano	1	2	2.4	2.4	1.5	2.4	3	7.2	1.6	126.4	176	71.82
	Taladro de pedestal	2	2	5.6	5.6	3.5	1.6	3	8.8	2.4	249.6	352	70.91
Torneado	Torno	4	5	16	10	10	10	10	50	30	740	704	105.11
Fresado	Fresadora	2	2	0	8	4	3	4	8	8	184	352	52.27
Limado	Limado manual	1	10	2	0.8	0.6	2.4	0.8	0.4	1.6	70	176	39.77
	Cepillo de vaivén	1	1	3	3.2	2.4	1.6	1.2	0.6	2.4	136	176	77.27
Ensamblaje	Matrices	2	6	0	4	1	1.6	2	16.8	0.8	104.8	352	29.77
	Herramientas manuales	4	-	16	12	9	14.4	6	31.2	7.2	699.2	704	99.32
Cepillado	Cepillo de puente	2	2	8	2	6	0	0	10	0	264	352	75.00
Pulido	Pulidora	1	3	2	1.5	1	3	2.8	8	1.8	106.2	176	60.34
	Esmeril	1	2	2	3.5	1	1	1.2	2	1.2	104.8	176	59.55
Pintado	Compresor	1	1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	1.6	0.1	21.5	176	12.22
	Pistola de pintura	1	1	0.5	3.6	1.8	1.8	1.8	6.4	0.9	97.5	176	55.40
Pruebas	Pruebas de funcionamiento	1	-	1	1	2	1	1	4	2	69	176	39.20
Producción mensual o demanda (unidades) de cada máquina				20	12	10	4	3	2	1	-	-	-

3.2 Explotación de la restricción mediante PLE

La fase de la explotación de la restricción tiene por objeto el máximo aprovechamiento del recurso que representa la restricción del sistema. En virtud que los porcentajes de utilización no abastecían el requerimiento, correspondió optimizar el volumen de producción de las máquinas tomando en cuenta el rendimiento de cada una de ellas (Ecuación (8)). Se buscó maximizar la contabilidad del rendimiento de la producción teniendo como referentes a los dos puestos de trabajo que restringían la producción (corte con sierra de mano y torneado) por tener una utilización superior al 100%. Para el efecto se empleó la PLE, como una herramienta matemática de optimización. La PLE se resolvió considerando las condiciones indicadas anteriormente (Ecuaciones (2) a (10)) mediante el empleo del software R, cuyos códigos se muestran en el apéndice A de este documento. Los resultados obtenidos fueron los mostrados en la tabla 4: Función objetivo maximizada (Ecuación (9)) condujo a un rendimiento máximo igual a \$ 78470.

Tabla 4. Máquinas a fabricar según la PLE en la fase de explotación.

Máquina	Notación	Cantidad a producir
Sierra circular	C ₁	19
Cepilladora de 45 cm	C ₂	12
Canteadoras	C ₃	10
Sierra de Cinta	C ₄	1
Tupy	C ₅	3
Cepillo Machimbre:	C ₆	2
Afiladora de Cuchillas:	C ₇	1

3.3 Subordinación de todo a la restricción

Una vez determinadas las cantidades óptimas de producción mensual de los siete tipos de máquinas consideradas en la muestra, correspondió subordinar todo a la restricción. Esto conllevó la determinación del nuevo porcentaje de utilización de todos los puestos de trabajo, a la vez de cuantificar los costos de todos los recursos inmersos en la producción y establecer los tiempos requeridos y disponibles. En la tabla 5 se muestra el esquema óptimo que establece la solución de la PLE:

Tabla 5. Esquema óptimo mediante aplicación de la PLE.

Costos Unitarios	Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machimbre	Afiladora de Cuchillas
Costo de materiales (\$)	895.01	1496.42	799.22	455.56	638.83	1812.32	729.13
Costo mano de obra (\$)	222.73	195.45	145.45	177.27	161.36	543.18	236.36
Costos indirectos o energéticos (\$)	2.03	1.78	1.32	1.61	1.47	4.94	2.15
P.V.P. (\$)	2400	3400	2200	1150	1800	6000	1200
Rendimiento (Ri) (\$)	1504.99	1903.58	1400.78	694.44	1161.17	4187.68	470.87
Rendimiento por tiempo en la restricción (\$/h)	188.12	2379.47	3501.95	144.68	0.00	2617.30	588.59
Utilidad (\$)	1280.23	1706.35	1254.00	515.56	998.34	3639.56	232.36
SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA (PLE)							
Cantidades a fabricar (u)	19	12	10	1	3	2	1
Secuencia de producción	3	2	4	6	5	1	7
Máximo rendimiento (\$)	78469.69						
Utilidades (\$)	68362.68						

Costos Unitarios	Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machibre	Afiladora de Cuchillas
SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LA CONTABILIDAD DEL RENDIMIENTO							
Cantidades a fabricar (u)	19	12	10	1	3	2	1
Secuencia de producción	3	2	4	6	5	1	7
Tiempo requerido en la restricción (h)	152	9.6	4	4.8	0	3.2	0.8
Tiempo acumulado requerido en la restricción (h)	164.8	12.8	168.8	173.6	168.8	3.2	174.4
Tiempo disponible en la restricción (h)	176						

En la tabla 6 se presentan los nuevos porcentajes de utilización de todos los puestos de trabajo en caso de considerarse la producción de la cantidad de máquinas establecidas por la solución de la PLE.

Tabla 6. Porcentaje de utilización mensual de los puestos de trabajo a partir de la subordinación de la restricción.

Proceso	Puestos de trabajo	Operarios	Número de máquinas	Tiempo unitario de producción (horas)							Capacidad mensual requerida (h)	Capacidad mensual disponible (h)	Utilización (%)
				Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machibre	Afiladora de Cuchillas			
Trazado	Trazado	2	4	4	8	2	4	8	16	16	268	352	76.14
	Sierra de mano	1	2	8	0.8	0.4	4.8	0	1.6	0.8	174.4	176	99.09
Corte	Sierra de cinta	1	2	4	1.8	0.8	1.6	4	6.4	3.2	135.2	176	76.82
	Cortadora de plasma manual	1	1	4	1.4	2.8	1.6	4	8	4	154.4	176	87.73
Enderezado	Prensa hidráulica	1	1	4	2	4	2	2	4	4	160	176	90.91
Doblado	Doblado	1	1	2	2	2	8	4	16	8	142	176	80.68
Forjado	Fragua	2	2	3	8	4	4	4	16	0	241	352	68.47
Soldado	Soldadora SMAW	1	3	2	0.8	1.2	0.8	0.8	5.6	0.8	74.8	176	42.50
	Soldadora MIG	2	4	8	3.2	2.8	7.2	7.2	10.4	7.2	275.2	352	78.18
Taladrado	Taladro de mano	1	2	2.4	2.4	1.5	2.4	3	7.2	1.6	116.8	176	66.36
	Taladro de pedestal	2	2	5.6	5.6	3.5	1.6	3	8.8	2.4	239.2	352	67.95
Torneado	Torno	4	5	16	10	10	10	10	50	30	694	704	98.58
Fresado	Fresadora	2	2	0	8	4	3	4	8	8	175	352	49.72
Limado	Limado manual	1	10	2	0.8	0.6	2.4	0.8	0.4	1.6	60.8	176	34.55
	Cepillo de vaivén	1	1	3	3.2	2.4	1.6	1.2	0.6	2.4	128.2	176	72.84
Ensamblaje	Matrices	2	6	0	4	1	1.6	2	16.8	0.8	100	352	28.41
	Herramientas manuales	4	-	16	12	9	14.4	6	31.2	7.2	640	704	90.91
Cepillado	Cepillo de puente	2	2	8	2	6	0	0	10	0	256	352	72.73
Pulido	Pulidora	1	3	2	1.5	1	3	2.8	8	1.8	95.2	176	54.09
	Esmeril	1	2	2	3.5	1	1	1.2	2	1.2	99.8	176	56.70
Pintado	Compresor	1	1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	1.6	0.1	20.4	176	11.59
	Pistola de pintura	1	1	0.5	3.6	1.8	1.8	1.8	6.4	0.9	91.6	176	52.05
Pruebas	Pruebas de funcionamiento	1	-	1	1	2	1	1	4	2	65	176	36.93
Producción mensual o demanda (unidades) de cada máquina				19	12	10	1	3	2	1	-	-	-

En la tabla 7 se hace una comparación de la producción mensual requerida, la producción subordinada a la restricción y el déficit existente respecto a la demanda:

Tabla 7. Producción mensual actual versus producción subordinada a la restricción.

Producto	Producción mensual requerida	Producción subordinada a la restricción	Déficit de la demanda (%)
Sierra Circular	20	19	5
Cepilladora de 45 cm	12	12	0
Canteadora de Plancha	10	10	0
Sierra de Cinta	4	1	75
Tupy	3	3	0
Cepillo Machimbre	2	2	0
Afiladora de Cuchillas	1	1	0
Total	52	48	7.69

Conforme la información mostrada en la tabla 7, se aprecia que en el caso de las sierras circulares y las sierras de cinta existe un déficit de la demanda (5 y 75%, respectivamente).

3.4 Elevación de la restricción

Como alternativa para contrarrestar el déficit de la planta para cubrir la demanda media existente, se optó por considerar la siguiente solución:

- Adquisición e incorporación de una máquina cortadora de plasma CNC de pórtico portátil, para sustituir los procesos de corte con sierra de mano.
- Reordenamiento de los operarios y ayudantes en los puestos de trabajo, e incorporación de operarios adicionales de ser necesario.

En la tabla 8 se presenta el detalle de las modificaciones realizadas sobre el talento humano de la empresa en la fase de elevación de la restricción:

Tabla 8. Modificaciones realizadas sobre el talento humano de la empresa en la fase de elevación de la restricción.

Aspecto	Situación actual	Situación propuesta
Operarios de torno	4	5
Nómina de trabajadores	30	29
Plantilla de operarios	17 operarios y 11 ayudantes	17 operarios y 10 ayudantes
Presupuesto mensual para remuneraciones	\$ 10760	\$ 10400

3.5 Identificación y análisis de una nueva restricción

Una vez cuantificados los costos de producción, correspondió establecer si la capacidad de producción de la planta en función de los operarios y de las máquinas disponibles sería capaz de satisfacer el requerimiento de tiempo. En la tabla 9 se hace constar el detalle de cada proceso, los puestos de trabajo correspondientes, la cantidad de operarios, el número de máquinas por puesto de trabajo, los tiempos unitarios de las siete principales máquinas fabricadas, la capacidad mensual requerida en horas, la capacidad mensual disponible en horas y el porcentaje de utilización una vez realizada la identificación y análisis de una nueva restricción:

Tabla 9. Porcentaje de utilización mensual de los puestos de trabajo a partir de la elevación de la restricción.

Proceso	Puestos de trabajo	Operarios	Número de máquinas	Tiempo unitario de producción (horas)							Capacidad mensual requerida (h)	Capacidad mensual disponible (h)	Utilización (%)	
				Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machimbre	Afiladora de Cuchillas				
Diseño	Diseño	1	4	2	4	1	3	3.33	8	8.33	144	176	82.01	
	Cortadora plasma CNC	1	2	1.5	0.33	0.25	2	0	0.5	0.33	46	176	26.04	
Corte	Sierra de cinta	1	2	4	1.8	0.8	1.6	4.00	6.4	3.2	144	176	81.82	
	Cortadora plasma CNC	1	1	2	0.75	1.67	0.75	1.33	4	1.5	82	176	46.69	
Enderezado	Prensa hidráulica	1	1	4	2	4	2	2	4	4	170	176	96.59	
Doblado	Doblado	1	1	2	2	2	8	4	16	8	168	176	95.45	
Forjado	Fragua	2	2	3	8	4	4	4	16	0	256	352	72.73	
Soldado	Soldadora SMAW	1	3	2	0.8	1.2	0.8	0.8	5.6	0.8	79	176	45.00	
	Soldadora MIG	2	4	8	3.2	2.8	7.2	7.2	10.4	7.2	305	352	86.59	
Taladrado	Taladro de mano	1	2	2.4	2.4	1.5	2.4	3	7.2	1.6	126	176	71.82	
	Taladro de pedestal	2	2	5.6	5.6	3.5	1.6	3	8.8	2.4	250	352	70.91	
Torneado	Torno	5	5	16	10	10	10	10	50	30	740	880	84.09	
Fresado	Fresadora	2	2	0	8	4	3	4	8	8	184	352	52.27	
Limado	Limado manual	1	10	2	0.8	0.6	2.4	0.8	0.4	1.6	70	176	39.77	
	Cepillo de vaivén	1	1	3	3.2	2.4	1.6	1.2	0.6	2.4	136	176	77.27	
Ensamblaje	Matrices	1	6	0	4	1	1.6	2	16.8	0.8	105	176	59.55	
	Herramientas manuales	5	-	16	12	9	14.4	6	31.2	7.2	699	880	79.45	
Cepillado	Cepillo de puente	2	2	8	2	6	0	0	10	0	264	352	75.00	
Pulido	Pulidora	1	3	2	1.5	1	3	2.8	8	1.8	106	176	60.34	
	Esmeril	1	2	2	3.5	1	1	1.2	2	1.2	105	176	59.55	
Pintado	Compresor	1	1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	1.6	0.1	22	176	12.22	
	Pistola de pintura	1	1	0.5	3.6	1.8	1.8	1.8	6.4	0.9	98	176	55.40	
Pruebas	Pruebas de funcionamiento	1	-	1	1	2	1	1	4	2	69	176	39.20	
Producción (unidades) de cada máquina.	mensual o demanda				20	12	10	4	3	2	1	-	-	-

De acuerdo a la información de la tabla 9, ya no existirían restricciones (en ningún caso se excede el porcentaje máximo de utilización del 100%). Consecuentemente correspondió identificar si la nueva capacidad de la planta satisficará el requerimiento de la demanda. Para el efecto se hace una comparación de la producción mensual requerida versus la producción elevada la restricción, como se indica en la tabla 10:

Tabla 10. Producción mensual actual versus producción elevada la restricción.

Producto	Producción mensual requerida	Producción elevada la restricción	Déficit de la demanda (%)
Sierra Circular	20	20	0
Cepilladora de 45 cm	12	12	0
Canteadora de Plancha	10	10	0
Sierra de Cinta	4	4	0
Tupy	3	3	0
Cepillo Machimbre	2	2	0
Afiladora de Cuchillas	1	1	0
Total	52	52	0

De acuerdo a la información de la tabla 10 ya no existe déficit de la demanda para ningún tipo de máquina. El hecho que los nuevos porcentajes de utilización de todos los puestos de trabajo estén por debajo del 97% (Tabla 9) brindó la oportunidad de optimizar la producción hasta alcanzar el 100% de utilización en los puestos que están cerca de constituirse en nuevas restricciones (enderezado en prensa hidráulica y doblado).

De acuerdo a las nuevas condiciones establecidas para el problema de optimización del rendimiento en la producción de las siete máquinas de procesamiento de madera y aplicando la ecuación (7) se tiene la función a maximizar de la ecuación (9), dado que el precio de venta de las máquinas fabricadas y el costo de materiales se mantienen constantes:

$$FO = \text{Máx: } 1504.99 C_1 + 1903.58 C_2 + 1400.78 C_3 + 694.44 C_4 + 1161.17 C_5 + 4187.68 C_6 + 470.87 C_7 \tag{9}$$

Las restricciones ahora se convierten en:

a) Restricción de demanda:

$$C_1 \geq 20, C_2 \geq 12, C_3 \geq 10, C_4 \geq 4, C_5 \geq 3, C_6 \geq 2, C_7 \geq 1$$

b) La restricción en los procesos críticos para el caso del enderezado en la prensa hidráulica es:

$$4 C_1 + 2 C_2 + 4 C_3 + 2 C_4 + 2 C_5 + 4 C_6 + 4 C_7 \leq 176 \frac{h}{mes}$$

Mientras que para el caso del proceso crítico de doblado se tiene:

$$2 C_1 + 2 C_2 + 2 C_3 + 8 C_4 + 4 C_5 + 16 C_6 + 8 C_7 \leq 176 \frac{h}{mes}$$

c) Restricción de variables enteras y no negativas:

$$C_1 \geq 0, C_2 \geq 0, C_3 \geq 0, C_4 \geq 0, C_5 \geq 0, C_6 \geq 0, C_7 \geq 0$$

Al igual que en el caso anterior, la PLE se resolvió considerando las condiciones indicadas anteriormente. De esta manera la solución de la función objetivo maximizada (Ecuación (9)) es: Rendimiento máximo \$ 87769. En la tabla 11 se muestra la cantidad de máquinas a producir en la fase de identificación y análisis de una nueva restricción:

Tabla 11. Máquinas a fabricar según la PLE en la fase de identificación y análisis de una nueva restricción:

Máquina	Notación	Cantidad a producir
Sierra circular	C ₁	20
Cepilladora de 45 cm	C ₂	15
Canteadoras	C ₃	10
Sierra de Cinta	C ₄	4
Tupy	C ₅	3
Cepillo Machimbre:	C ₆	2
Afiladora de Cuchillas:	C ₇	1

En la tabla 12 se muestra el esquema óptimo que establece la solución de la PLE:

Tabla 12. Esquema óptimo mediante aplicación de la PLE.

Costos Unitarios	Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machimbre	Afiladora de Cuchillas
Costo de materiales (\$)	895.01	1496.42	799.22	455.56	638.83	1812.32	729.13
Costo mano de obra (\$)	198.86	183.83	140.27	166.70	144.70	513.41	212.20
Costos indirectos o energéticos (\$)	1.96	1.81	1.38	1.65	1.43	5.07	2.09
P.V.P. (\$)	2400	3400	2200	1150	1800	6000	1200
Rendimiento (Ri) (\$)	1504.99	1903.58	1400.78	694.44	1161.17	4187.68	470.87
Rendimiento por tiempo en la restricción (\$/h)	376.25	951.79	350.19	347.22	580.59	1046.92	117.72
Utilidad (\$)	1304.16	1717.94	1259.13	526.09	1015.05	3669.21	256.58
SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA (PLE)							
Cantidades a fabricar (u)	20	15	10	4	3	2	1
Secuencia de producción	3	2	4	6	5	1	7
Máximo rendimiento (\$)	87768.74						
Utilidades (\$)	77188.10						
SOLUCIÓN POR EL MÉTODO DE LA CONTABILIDAD DEL RENDIMIENTO							
Cantidades a fabricar (u)	20	15	10	4	3	2	1
Secuencia de producción	3	2	4	6	5	1	7
Tiempo requerido en la restricción (h)	30	5.00	2.5	8	0	1	0.33
Tiempo acumulado requerido en la restricción (h)	36.00	6.00	38.50	46.50	38.50	1.00	46.83
Tiempo disponible en la restricción (h)	176						

En la tabla 13 se presentan los nuevos porcentajes de utilización de todos los puestos de trabajo en caso de considerarse la producción de la cantidad de máquinas establecidas por la solución de la PLE. El porcentaje de incremento de la utilidad es del 12.91%.

Tabla 13. Porcentaje de utilización mensual de los puestos de trabajo según la nueva explotación y subordinación.

Proceso	Puestos de trabajo	Operarios	Tiempo unitario de producción (horas)								Capacidad mensual requerida (h)	Capacidad mensual disponible (h)	Utilización (%)
			Número de máquinas	Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machimbre	Afiladora de Cuchillas			
Diseño	Diseño	1	4	2	4	1	3	3.33	8	8.33	156	176	88.83
	Cortadora plasma CNC	1	2	1.5	0.33	0.25	2	0	0.5	0.33	47	176	26.61
Corte	Sierra de cinta	1	2	4	1.8	0.8	1.6	4.00	6.4	3.2	149	176	84.89
	Cortadora plasma CNC	1	1	2	0.75	1.67	0.75	1.33	4	1.5	84	176	47.96
Enderezado	Prensa hidráulica	1	1	4	2	4	2	2	4	4	176	176	100.00

Proceso	Puestos de trabajo	Operarios	Número de máquinas	Tiempo unitario de producción (horas)							Capacidad mensual requerida (h)	Capacidad mensual disponible (h)	Utilización (%)
				Sierra Circular	Cepilladora de 45 cm	Canteadora de Plancha	Sierra de Cinta	Tupy	Cepillo Machimbre	Afiladora de Cuchillas			
Doblado	Doblado	1	1	2	2	2	8	4	16	8	174	176	98.86
Forjado	Fragua	2	2	3	8	4	4	4	16	0	280	352	79.55
Soldado	Soldadora SMAW	1	3	2	0.8	1.2	0.8	0.8	5.6	0.8	82	176	46.36
	Soldadora MIG	2	4	8	3.2	2.8	7.2	7.2	10.4	7.2	314	352	89.32
Taladrado	Taladro de mano	1	2	2.4	2.4	1.5	2.4	3	7.2	1.6	134	176	75.91
	Taladro de pedestal	2	2	5.6	5.6	3.5	1.6	3	8.8	2.4	266	352	75.68
Torneado	Torno	5	5	16	10	10	10	10	50	30	770	880	87.50
Fresado	Fresadora	2	2	0	8	4	3	4	8	8	208	352	59.09
Limado	Limado manual	1	10	2	0.8	0.6	2.4	0.8	0.4	1.6	72	176	41.14
	Cepillo de vaivén	1	1	3	3.2	2.4	1.6	1.2	0.6	2.4	146	176	82.73
Ensamblaje	Matrices	1	6	0	4	1	1.6	2	16.8	0.8	117	176	66.36
	Herramientas manuales	5	-	16	12	9	14.4	6	31.2	7.2	735	880	83.55
Cepillado	Cepillo de puente	2	2	8	2	6	0	0	10	0	270	352	76.70
Pulido	Pulidora	1	3	2	1.5	1	3	2.8	8	1.8	111	176	62.90
	Esmeril	1	2	2	3.5	1	1	1.2	2	1.2	115	176	65.51
Pintado	Compresor	1	1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	1.6	0.1	23	176	12.90
	Pistola de pintura	1	1	0.5	3.6	1.8	1.8	1.8	6.4	0.9	108	176	61.53
Pruebas	Pruebas de funcionamiento	1	-	1	1	2	1	1	4	2	72	176	40.91
Producción mensual o demanda (unidades) de cada máquina.				20	15	10	4	3	2	1	-	-	-

La información de la tabla 13 refleja que en condiciones ideales ninguno de los puestos de trabajo tendría un porcentaje de utilización superior al 100%. Finalmente resta corroborar si el volumen de producción asignado en respuesta a la PLE satisface la demanda existente. Para el efecto en la tabla 14 se presentan las cantidades correspondientes a la producción mensual idealizada con la PLE, la producción optimizada y la capacidad de cubrir la demanda:

Tabla 14. Porcentaje de utilización mensual de los puestos de trabajo a partir de la elevación de la restricción.

Producto	Producción mensual actual	Producción optimizada	Capacidad de cubrir la demanda (%)
Sierra Circular	20	20	100
Cepilladora de 45 cm	12	15	125
Canteadora de Plancha	10	10	100
Sierra de Cinta	4	4	100
Tupy	3	3	100
Cepillo Machimbre	2	2	100
Afiladora de Cuchillas	1	1	100
Total	52	55	105.77

Según la información mostrada en la tabla 14 en todos los casos al menos se cubre la demanda existente, con la posibilidad de tener una producción excedente equivalente al 25% de cepilladoras de 45 cm.

3.6 Análisis de la inversión

Es necesario determinar el período de recuperación de la inversión realizada para llevar a cabo la fase de elevación de la restricción, en lo correspondiente al desembolso de dinero para la adquisición de la máquina cortadora de plasma CNC y la incorporación de un operario tornero (aunque esto conlleva la reducción de un trabajador en total). Para el efecto se calculó el valor actual neto (VAN), conocido también como valor presente neto (VPN), a través de la ecuación (12):

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n} \quad (12)$$

Donde:

I_0 = es la inversión inicial previa, el valor del desembolso que la empresa realiza en el momento inicial de efectuar la inversión.

F_t = son los flujos netos de efectivo, representan la diferencia entre los ingresos y gastos que se obtienen por la ejecución del proyecto de inversión.

t = son los períodos de vigencia del proyecto de inversión (mensuales).

k = tasa de descuento, costo o tasa de oportunidad, es la tasa de retorno requerida sobre la inversión. Refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.

n = Número de períodos evaluados del proyecto.

Se consideró una tasa de descuento igual a 10% anual (0.83% mensual). Al evaluar el VAN en la ecuación (10) para un período de tres meses se obtuvo:

$$VAN = -25500 + \sum_{t=1}^3 \frac{8825.42}{(1+0.0083)^t}$$

$$VAN = \$541.04$$

El VAN que se estimar conseguir a los tres meses de producción es de \$541.04. Es decir que la inversión requerida para la fase de elevación de la restricción se recuperará en tres meses de producción y partir de entonces se obtendrán ganancias, siempre y cuando se generen los volúmenes de producción estipulados en la función optimizada.

4. Discusión

En la fase de identificación de la restricción dentro de la cadena de producción se observó (Tabla 3) que los procesos de corte con sierra de mano y torneado presentaban porcentajes de utilización de 111.82% y 105.11%, respectivamente, que son superiores al 100%; esto quiere decir que la capacidad de los mencionados puestos de trabajo no abastecía el requerimiento existente. En este sentido, en la fase de explotación de la restricción se procuró maximizar la contabilidad del rendimiento de la producción mediante un modelo de PLE (Ecuación (9)), teniendo como referentes a los dos puestos de trabajo que restringían la producción, dado que presentaban una utilización superior al 100%.

Posteriormente, en la fase subordinación de todo a la restricción, se determinó (Tabla 5) que el rendimiento (*Throughput*) máximo que se alcanzaría bajo la condición de producir el número óptimo de máquinas de cada tipo sería de \$ 78469.69, lo que permitiría obtener una utilidad mensual máxima de \$ 68362.68. La secuencia de producción mostrada en la tabla 5 indica el beneficio que se podría conseguir de la fabricación de las máquinas, siendo que el mayor se obtendría en la fabricación de cepillos machimbres y el menor en la elaboración de afiladoras de cuchillas. En cuanto a los tiempos acumulados requeridos en la restricción (Tabla 5), todos son inferiores y lo más cercanos posible al tiempo disponible de 176 horas/mes en los puestos de trabajo restrictivos (corte con sierra de mano y torneado). Esto representa que se podría satisfacer las condiciones del problema, ya que en condiciones ideales ninguno de los puestos de trabajo tendría un porcentaje de utilización superior al 100% (Tabla 6) y por consiguiente no habría déficit de tiempo para el volumen de producción establecido por la PLE (Ecuación (9)). No obstante, de acuerdo a la información de la tabla 7 en la elaboración de sierras circulares existiría un déficit de 5% y en las sierras circulares de 75%, consecuentemente en esos dos tipos de productos existiría un déficit respecto a la demanda del volumen de producción. En términos generales el déficit de la capacidad de producción optimizada por medio de la PLE (Ecuación (9)) en la fase de subordinación de la restricción representó el 7.69% del volumen requerido. Por consiguiente, bajo la capacidad de producción optimizada en función de los recursos disponibles en la empresa metalmecánica no sería posible hallar una solución que satisfaga el requerimiento existente para la fabricación de máquinas de procesamiento de madera.

En la fase de elevación de la restricción y a partir de las medidas correspondientes implementadas (incorporación de una máquina cortadora de plasma CNC), la distribución de los operarios y ayudantes en los puestos de trabajo experimentó algunas modificaciones, se suprimió el proceso de trazado y se lo sustituyó con el de diseño, además se incorporó un nuevo operario tornero para subsanar el déficit existente que hacía que dicho puesto sea una restricción. Adicionalmente se reordenaron algunos operarios y ayudantes en los puestos de trabajo, lo que conllevó la disminución de un ayudante (Tabla 8). La nueva distribución del puesto dio lugar a una necesidad de actualizar el costo total de la mano de obra.

Seguidamente se efectuó la identificación y análisis de una nueva restricción con la finalidad de determinar si la capacidad de producción de la planta en función de los operarios y de las máquinas y herramientas disponibles sería capaz de satisfacer el requerimiento de tiempo. Para cada puesto de trabajo, el factor limitante fue el menor entre la cantidad de operarios y el número de máquinas. De acuerdo a la información de la tabla 9 ya no existirían restricciones, debido a que en ningún caso se excede el porcentaje máximo de utilización, que es del 100%. Al comparar la producción mensual requerida versus la producción elevada la restricción (Tabla 10) se halló que ya no existirá déficit de la demanda para ningún tipo de máquina. Es decir, ya se soluciona el problema del incumplimiento del volumen de producción requerido por la demanda durante una jornada laboral regular. Esto representa que, en condiciones de trabajo regulares, ya no existen restricciones y no será necesario recurrir a laborar en horas extras para abastecer la producción requerida.

Sin embargo, según se observa en la tabla 9, el hecho que los nuevos porcentajes de utilización de todos los puestos de trabajo estén por debajo del 97%, brindó la oportunidad de poder optimizar la producción, que en términos prácticos significa fabricar más hasta alcanzar el 100% de utilización en los puestos que están cerca de constituirse en nuevas restricciones (enderezado en la prensa hidráulica con un 96.59% y doblado con un 95.45% de utilización). Para el efecto, se volvió a determinar el mismo modelo de PLE (Ecuación (9)) dado que el precio de venta de las máquinas fabricadas y el costo de materiales se mantienen constantes, pero con la aplicación de las nuevas restricciones (Tabla 10). De acuerdo a la información indicada en la tabla 12, el rendimiento (*Throughput*) máximo que se alcanzaría bajo la condición de producir el número óptimo de máquinas de cada tipo sería de \$ 87768.74, lo que permitiría obtener una utilidad mensual máxima de \$ 77188.10. La secuencia de producción indica el beneficio que se puede conseguir de la fabricación de las máquinas, así el mayor beneficio se obtendría de la fabricación de cepillos machimbres por tener más elevados márgenes de utilidad y el menor beneficio de todos a partir de la afiladora de cuchillas. En cuanto a los tiempos acumulados requeridos en la restricción, todos son inferiores y lo más cercanos posible al tiempo disponible de 176 horas/mes en los puestos de trabajo restrictivos (enderezado en la prensa hidráulica y doblado). Esto representa que se satisfacen las condiciones del problema.

Según la información de la tabla 13, en condiciones ideales ninguno de los puestos de trabajo tendría un porcentaje de utilización superior al 100%. Esto significa que no habría déficit de tiempo para el volumen de producción establecido por la PLE y que por el contrario existirá una holgura que posibilitará la fabricación de máquinas adicionales, que podrán servir para mantener un stock o reserva. Conforme la información de la tabla 14, en todos los casos al menos se cubre la demanda existente, con la posibilidad de tener una producción excedente equivalente al 25% de cepilladoras de 45 cm. Esto representa que mensualmente se pueden elaborar un 5.77% de unidades extras para stock o reserva. Por consiguiente, bajo la capacidad de producción optimizada en función de los recursos actuales más la incorporación de la máquina cortadora plasma CNC y el reordenamiento de los operarios y ayudantes, la solución final del problema permite no solamente satisfacer la demanda existente sin necesitar de horas extras durante la jornada laboral, sino que además la opción de disponer de excedentes de máquinas cepilladoras.

En el presente estudio se optó por desarrollar un procedimiento similar al de Romero *et al.* (2019), maximizando el rendimiento con la PLE considerando la producción de los 7 tipos de máquinas de procesamiento de madera más comunes, lo que permitió obtener un incremento de la utilidad bruta, con la posibilidad de cubrir la demanda y contar con unidades de producción de reserva. Al comparar la situación actual con la propuesta, la utilidad alcanzada en la empresa metalmecánica será del 12.91% gracias al aporte brindado por la aplicación de la TOC para la optimización de los procesos operativos, porcentaje que concuerda con la utilidad obtenida en el trabajo investigativo efectuado por Herrera-Vidal *et al.* (2018), que fue de 14.5% y que también estuvo enfocado en la optimización con base en la aplicación de la TOC. Bajo estas circunstancias se corrobora que en las investigaciones referidas y en la realizada en este trabajo se alcanzó una mejora de la situación de la producción.

Adicionalmente se destaca que existen necesidades futuras de investigación que complementarían este trabajo investigativo desarrollado. Particularmente surge el interés por integrar una simulación de los distintos escenarios que podrían presentarse considerando la existencia de múltiples restricciones, de manera que se podrían determinar nuevas funciones objetivo y se obtendrían nuevos valores de maximización del rendimiento y de la utilidad, para cada caso particular. De esta manera se tendría una programación dinámica para el control del sistema de producción en la empresa.

5. Conclusiones

En el estudio realizado existían dos puestos de trabajo en la empresa metalmecánica que restringían los procesos operativos de la elaboración de máquinas de procesamiento de madera y consecuentemente eran las restricciones del sistema. A partir de la explotación de dichas restricciones con base en la aplicación de la PLE para maximizar el rendimiento y una vez subordinado todo, se determinó que el máximo rendimiento posible fue de \$ 78470, con una utilidad neta máxima de \$ 68362.68, correspondiendo una producción mensual optimizada de 19 sierras circulares, 12 cepilladoras, 10 canteadoras, 3 tupys, 2 cepillos machimbres, 1 sierra de cinta y 1 afiladora de cuchillas. Sin embargo, el volumen de producción maximizado no abastecía toda la demanda media mensual existente, con un déficit de 5% de sierras circulares y de 75% de sierras cintas.

Como parte de la elevación de la restricción se incorporó una máquina cortadora de plasma CNC para sustituir el corte con sierra de mano y se reordenó la distribución de los operarios y ayudantes en los puestos de trabajo. Al identificarse que con esos cambios ya no existirían nuevas restricciones, dado que todos los puestos de trabajo tendrán la capacidad de producir el volumen de producción mensual demandado, y que además existirá una holgura, se optó por aplicar nuevamente la función de maximización a través de la PLE. EL resultado final proyectó que se alcance un rendimiento máximo de \$ 87768.74, con una utilidad bruta de \$ 77188.10, correspondiendo una producción mensual optimizada de 20 sierras circulares, 15 cepilladoras, 10 canteadoras, 4 sierras de cinta, 3 tupys, 2 cepillos machimbres y 1 afiladora de cuchillas.

El trabajo desarrollado permitió optimizar los procesos operativos en una empresa metalmecánica, entendiéndose como tal a la maximización de la capacidad de producción en función de los recursos disponibles y la demanda existente. Para el efecto, se aplicó la TOC en cada una de sus cinco fases, conjuntamente con el empleo de un modelo de PLE que permitió establecer la cantidad máxima de unidades que potencialmente pueden ser elaboradas.

Conflicto de Interés

Los autores del presente trabajo declaran no tener ningún conflicto de interés de naturaleza alguna con los resultados publicados en el mismo.

Contribución de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz.

	Espín-Guerreo, R.	Toalombo-Rojas, B.	Moyolema-Chaglla, Á.	Altamirano-Salazar, A.
Conceptualización				
Análisis formal				
Investigación				
Metodología				
Recursos				
Validación				
Redacción – revisión y edición				

Referencias

- Abisambra-Lemus, A. J., & Mantilla-Cuadros, L. A. (2014). Aplicación de la teoría de restricciones (TOC) a los procesos de producción de la planta de fundición de Imusa. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, (2), 121-133. Recuperado de: <https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/635/RSO00019.pdf?sequence=1>
- Altumi, A., & AL-yaseer, A. (2016). The Conventional, the Theory of Constraints, and the Linear Programming: Three Approaches to the Optimum Production Mix: A Comparative Study - ProQuest. *International Journal of Computer Engineering and Information Technology*, 8(7), 125-140. Recuperado de: <https://www.proquest.com/openview/8700da7273f29047d1f29cba711a48bc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044551>
- Bermúdez, Y. (2011). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, II(7), 85-104. Recuperado de: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/Inge-Industrial/volII-n7/art6.pdf>
- Chapin, N. (1970). Flowcharting With the ANSI Standard: A Tutorial. *Computing Surveys*, 2(2), 119-146. Recuperado de: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/356566.356570>
- Cortabarría, L. A., Martínez, S. J., & Mendoza, O. H. (2016). Diseño, implementación y análisis de una metodología para aplicar TOC a empresas metalmecánicas con restricciones físicas internas – caso de aplicación: Colombia. *Revista Espacios*, 37(31), 1-30. Recuperado de: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n31/16373130.html>
- Guédez, C. (2011). Programación Lineal e Ingeniería Industrial: Una aproximación al Estado del Arte. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, II(6), 61-78.

Recuperado de: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/Inge-Industrial/VolIII-n6/art4.pdf>

- Herrera-Vidal, G., Campo-Juvinao, J., Bernal-Hernandez, J., & Tilves, R. (2018). Modelo de teoría de restricciones con consideraciones de optimización y simulación—Un caso de estudio. *Revista Espacios*, 39(3), 1-18. Recuperado de: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n03/a18v39n03p10.pdf>
- Ikeziri, L., Souza, F., Gupta, M., & De Camargo, P. (2018). Theory of constraints: Review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 57, 1-35. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1518602>
- Indrasan, Y. S., Rajput, V., & Chaware, K. (2018). ABC analysis: A literature review. *Journal For Advanced Research In Applied Sciences*, 5(5), 134-137. Recuperado de: <http://www.iaetsdjaras.org/gallery/14-may-741.pdf>
- Janosz, M. (2018). The theory of constraints as a method of results optimization in complex organization. *Archives of Foundry Engineering*, 18(4), 59-64. <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125169>
- Kumar, D. N., Siddiqui, M. T., & Suhail, M. (2020). Theory of Constraints: A Review on its Evolution and Adoption. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 12(9), 954-969. Recuperado de: <http://www.ijaema.com/gallery/112-ijaema-september-4587.pdf>
- Melendez, J. R., Zoghbe, Y. A., Malvacias, A. M., Almeida, G. A., & Layana, J. (2018). Theory of Constraints: A systematic review from the management context. *Revista Espacios*, 39(48), 1-14. Recuperado de: <http://www.revistaespacios.com/a18v39n48/18394801.html>
- Méndez, G., & López, E. (2013). Metodología para el pronóstico de la demanda en ambientes multiproducto y de alta variabilidad. *Tecnura*, 18(40), 89-102. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v18n40/v18n40a08.pdf>
- Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2014). *Niebel's methods, standards, and work design* (Thirteenth edition). New York, NY: McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-337636-3
- Pacheco, D., Antunes Junior, J. A. V., & de Matos, C. A. (2021). The constraints of theory: What is the impact of the Theory of Constraints on Operations Strategy? *International Journal of Production Economics*, 235, 1-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107955>
- Romero, J., Ortiz, V., & Caicedo, Á. (2019). La teoría de restricciones y la optimización como herramientas gerenciales para la programación de la producción. Una aplicación en la industria de muebles. *Revista de Métodos Cuantitativos para la economía y la empresa*, (27), 74-90. Recuperado de: www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2964
- Sari, R. M., Syahputri, K., Rizkya, I., & Siboro, N. (2019). Optimization in Critical Work Center Using Theory of Constraints. 648(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/648/1/012017>

- Trojanowska, J., & Dostatni, E. (2017). Application of the Theory of Constraints for Project Management. *Management and Production Engineering Review*, 8(3), 87-95. <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0031>
- Tsai, W.-H., Lai, C.-W., & Chang, J. C. (2007). An algorithm for optimizing joint products decision based on the Theory of Constraints. *International Journal of Production Research*, 45(15), 3421-3437. <https://doi.org/10.1080/00207540600891382>
- Xia, Y. (2013). Analysis of Machinery Manufacture and Production from the Metal Mechanics Perspective. *Advanced Materials Research*, 818, 193-196. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.818.193>

Apéndices.

Apéndice A: Codificación en lenguaje R.

```

# SITUACIÓN INICIAL
library(lpSolve)
# Maximizar Z= 1504.99C1+1903.58C2+1400.78C3+694.44C4+1161.17C5+4187.68C6+470.87C7
funcion_obj <- c(1504.99,1903.58,1400.78,694.44,1161.17,4187.68,470.87)
restricciones <- matrix(c(1,0,0,0,0,0,0,
                        0,1,0,0,0,0,0,
                        0,0,1,0,0,0,0,
                        0,0,0,1,0,0,0,
                        0,0,0,0,1,0,0,
                        0,0,0,0,0,1,0,
                        0,0,0,0,0,0,1,
                        8,0.8,0.4,4.8,0.1,6,0.8,
                        16,10,10,10,10,50,30),
                      nrow=9, byrow=T)
restricciones_direccion <- c("<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=", "<=")
restricciones_derecho <- c(20,12,10,4,3,2,1,176,704)
# Solución de la función objetivo.
PLE <- lp(direction="max", objective.in = funcion_obj,
         const.mat = restricciones, const.dir = restricciones_direccion, const.rhs = restricciones_derecho,
         int.vec = c(1:7), all.int = T, compute.sens = T)
PLE
PLE$solution
cat('La cantidad de Sierras Circulares a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[1])
cat('La cantidad de Cepilladoras de 45 cm a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[2])
cat('La cantidad de Canteadoras a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[3])
cat('La cantidad de Sierras de Cinta a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[4])
cat('La cantidad de Tupys a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[5])
cat('La cantidad de Cepillos Machimbres a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[6])
cat('La cantidad de Afiladoras de Cuchillas a fabricarse mensualmente es:', PLE$solution[7])
cat('La función maximizada es igual a:', round(PLE$objval,0))

%=====
# SITUACIÓN PROPUESTA
# Maximizar Z= 1504.99C1+1903.58C2+1400.78C3+694.44C4+1161.17C5+4187.68C6+470.87C7
funcion_obj2 <- c(1504.99,1903.58,1400.78,694.44,1161.17,4187.68,470.87)
restricciones2 <- matrix(c(1,0,0,0,0,0,0,
                        0,1,0,0,0,0,0,
                        0,0,1,0,0,0,0,
                        0,0,0,1,0,0,0,
                        0,0,0,0,1,0,0,
                        0,0,0,0,0,1,0,
                        0,0,0,0,0,1,0,
                        8,0.8,0.4,4.8,0.1,6,0.8,
                        16,10,10,10,10,50,30),
                      nrow=9, byrow=T)

```



```
0,0,0,0,0,1,
4,2,4,2,2,4,4,
2,2,2,8,4,16,8),
nrow=9, byrow=T)
restricciones_direccion2 <- c(">=", ">=", ">=", ">=", ">=", ">=", ">=", ">=", "<=", "<=")
restricciones_derecho2 <- c(20,12,10,4,3,2,1,176,176)
# Solución de la función objetivo.
PLE2 <- lp(direction="max", objective.in = funcion_obj2,
           const.mat = restricciones2, const.dir = restricciones_direccion2, const.rhs = restricciones_derecho2,
           int.vec = c(1:7), all.int = T, compute.sens = T)
PLE2
PLE2$solution
cat('La cantidad de Sierras Circulares a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[1])
cat('La cantidad de Cepilladoras de 45 cm a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[2])
cat('La cantidad de Canteadoras a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[3])
cat('La cantidad de Sierras de Cinta a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[4])
cat('La cantidad de Tupys a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[5])
cat('La cantidad de Cepillos Machimbres a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[6])
cat('La cantidad de Afiladoras de Cuchillas a fabricarse mensualmente es:', PLE2$solution[7])
cat('La función maximizada es igual a:', round(PLE2$objval, 0))
```