

# Optimization of Production Costs Using Integer Linear Programming in Production Planning for Raw Material Inventory Control

## Optimización de Costos de Producción con el Uso Programación Lineal Entera en la Planeación de la Producción para el Control de Inventario de Materias Primas

V.R. Quinteros<sup>1</sup>

ID 0009-0006-2572-9553

C.A. Leiva<sup>1</sup>

ID 0000-0002-8255-1337

S.J. Cárdenas<sup>1</sup> ID 0009-0007-9933-9248<sup>1</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Quito, EcuadorE-mail: [vquinteros@est.ups.edu.ec](mailto:vquinteros@est.ups.edu.ec); [cleiva@ups.edu.ec](mailto:cleiva@ups.edu.ec); [scardenasv1@est.ups.edu.ec](mailto:scardenasv1@est.ups.edu.ec)

### Abstract

This study proposes a cost reduction methodology for the manufacturing processes of sanitary faucet bodies, based on a mixed-integer linear programming (MILP) model designed to optimize production planning while maintaining inventory control within defined limits. The model integrates economic, logistical, and environmental restrictions such as import quotas, production capacity, and the reuse of brass scrap derived from machining operations. Using the R programming language and the *lpSolve* package, the optimal combination of raw materials—virgin brass ingots, rods, and recycled scrap—was determined for each product batch. The model minimizes production costs subject to constraints on material availability and storage levels. Results demonstrated a cumulative saving of USD 73,341 over six consecutive months and a reduction of average foundry inventory from 116 t to 62 t, confirming the model's efficiency in ensuring sustainable production. The methodology is scalable to other manufacturing contexts where materials have multiple processing routes or restricted supply conditions.

### Resumen

El presente estudio propone una metodología de reducción de costos en los procesos de fabricación de cuerpos de grifería sanitaria, basada en un modelo de programación lineal entera (PLE) que optimiza la planeación de la producción manteniendo el control de inventarios dentro de límites establecidos. El modelo integra restricciones económicas, logísticas y ambientales, como cupos de importación, capacidad de producción y reutilización de chatarra de latón generada en operaciones de mecanizado. Mediante la implementación del modelo en el lenguaje R y el paquete *lpSolve*, se determinó la combinación óptima de materias primas —lingotes vírgenes, varilla y material reciclado— para cada lote de producto, minimizando los costos de producción bajo condiciones de disponibilidad de material y almacenamiento. Los resultados evidenciaron un ahorro acumulado de 73 341 USD durante seis meses consecutivos y la reducción del inventario promedio de material para fundir de 116 ton a 62 ton, demostrando la efectividad del modelo para una producción sostenible. La metodología propuesta es escalable a otros contextos manufactureros con múltiples rutas o restricciones de suministro.

**Index terms**— Integer linear programming, cost optimization, inventory control, brass recycling, production planning.

**Palabras clave**— Programación lineal entera, optimización de costos, control de inventarios, reciclaje de latón, planeación de la producción.

Recibido: 07-11-2025, Aprobado tras revisión: 15-01-2026

Forma sugerida de citación: Quinteros, V.; Leiva, C.; Cárdenas, S. (2026). “Optimización de costos de producción con el uso programación lineal entera en la Planeación de la Producción para el control de inventario de materias primas”. Revista Técnica “energía”. No. 22, Issue II, Pp. 136-145

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v22.n2.2026.728>

© 2026 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



## 1. INTRODUCCIÓN

En las empresas de manufactura se tienen opciones de optimizar costo en la planeación y programación de la producción [1]. Se pueden aplicar varias metodologías para la optimización dependiendo de la función objetivo y restricciones propias de cada proceso productivo [2].

La programación lineal entera (ILP) se puede usar para la optimización del plan y programa de producción como lo realiza Rave & Alvarez [3]. Su solución se basa en la programación de 19 trabajadores y sus lugares de trabajo. Se obtuvieron significantes ahorros de costos sin compra de maquinaria ni incrementar otros turnos. En esa empresa se rompieron paradigmas que por más de 14 años los tenían en su forma de programar la producción.

Dianawati & Fatoni [4] a través de un modelo MILP optimizaron el tiempo de almacenamiento de mercancías reduciendo costos de inventario en un 8.6%.

El punto de reorden de los productos de la demanda y las materias primas impacta en el inventario [5]. En la empresa de manufactura bajo estudio, se tienen varios productos con distintas opciones de proceso y materia prima. En la actualidad para la programación de la producción no se considera las restricciones de importación de materias primas ni los niveles de inventario de materia prima reciclada. Por ello se identifica esta oportunidad de optimizar costos de producción.

Gholipoor et al.[6], con MILP optimizaron el esquema cíclico a la producción de grifería que tiene como objetivo incrementar las ganancias y ahorros medioambientales. Se validó el modelo en un caso real en el que se obtuvo un 58 % de incremento en el total de ganancias de la cadena de suministros. En el estudio también se incorpora un plan de intercambio y reciclaje de 5536 cuerpos de grifería usados que generan ahorros y beneficios medioambientales.

En la industria de la grifería se considera materia prima reciclada; las virutas metálicas generadas en los procesos de mecanizado, residuos de formas externas y tallado de roscas en las piezas de latón. Johansson et al. [7], propusieron e investigaron el reciclaje de las virutas de latón y se encontró que el tamaño de estas no tiene una influencia sustancial en la densidad del producto para tamaños de viruta de entre 0.2 y 1 mm. Adicionalmente concluyeron mediante análisis de espectrometría que el material obtenido luego de la fusión de las virutas no cambia su composición química de forma significativa.

En métodos de fabricación donde la materia prima puede ser reutilizada un ilimitado número de veces es posible obtener beneficios considerables que impacten directamente sobre el medio ambiente y las finanzas [8]. Para la fabricación de cuerpos de grifería considerados en este estudio, el latón cumple con ésta característica.

También hay beneficios medio ambientales ya que la energía requerida en las materias primas recicladas es 85% menor a la usada en materiales vírgenes, lo que reduce la generación de gases de efecto invernadero en un 65 % al compararlo con su producción primaria.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para obtener el menor costo de producción que considera las diferentes restricciones del proceso de fabricación y que permiten mantener los niveles de inventario dentro de valores determinados por la empresa, así como, el consumo máximo de varilla que definió el área financiera se establece las siguientes etapas mostradas en la Fig. 1.

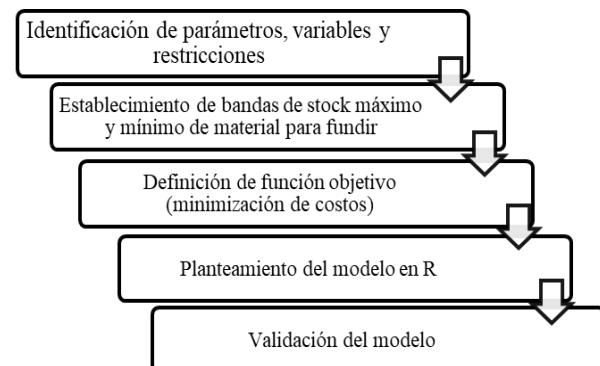


Figura 1: Metodología

La Fig. 1 muestra la metodología usada para la determinación del menor costo de fabricación de los productos que son objeto de este análisis los mismos que son parte del esquema de producción que requiere varilla para su fabricación, a éstos, se les asigna un código que permite identificarlos y asignarles las alternativas de fabricación por proceso y por materia prima.

Con esta codificación definida se procede a establecer las variables de decisión y restricciones que dependen de:

- Rutas principales y alternas
- Cupos de importación
- Saldos iniciales de materia prima virgen
- Saldos iniciales de materia prima
- Plan mensual de producción; y,
- Costo de la materia prima con base en el LME por sus siglas en inglés London Metal Exchange al inicio de cada período.

Para la determinación de la función objetivo se toman los costos de producción de cada alternativa de material calculadas con una metodología propia proporcionada por la empresa.

### 2.1 Parámetros

En la Fig. 2. se puede observar los productos y las diferentes opciones de materiales que pueden utilizarse para su fabricación. Junto a la información de los lotes de producción requeridos mensualmente por el área

comercial constituyen los parámetros utilizados para realizar la configuración del modelo.

En algunos casos como muestra la Fig. 2. un mismo producto puede ser fabricado con 3 o 4 materias primas y otros a pesar de tener solo 1 alternativa como es el caso de los productos B, C, D y E son considerados en el análisis por utilizar varilla cuya disponibilidad constituye una de las restricciones del modelo.

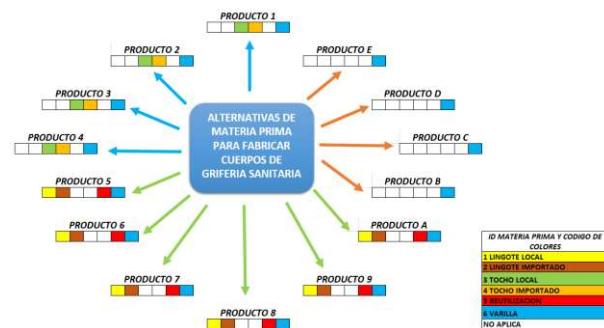


Figura 2: Productos y Opciones de Material para la Fabricación

La descripción de las materias primas que se presentan en la Fig. 2. se las incluye en Tabla 1. en la que a cada material se le asigna un identificador que será utilizado para enlazar la alternativa de fabricación con el producto y establecer las variables de decisión.

Se crean códigos específicos para los diferentes estados de materia prima para fundir y se establecen controles de inventario mensuales que permitan el control de las materias primas disponibles, definición de bandas de inventario, tiempos de reposición y volumen de reabastecimiento.

Tabla 1: Alternativas de Materia Prima para Fabricación de Grifería.

Materia Prima	Identificador	Descripción
Lingote local	1	Lingotes de latón aleación C37700 que se pueden adquirir en el mercado local
Lingote importado	2	Lingotes de latón aleación C37700 importados
Tocho local	3	Segmento de varilla de diversos diámetros fabricado con latón aleación C37700 que se encuentra cortado en diferentes longitudes y que se puede adquirir en el mercado local
Tocho importado	4	Segmento de varilla de diversos diámetros fabricado con latón aleación C37700 que se encuentra cortado en diferentes longitudes y que debe ser importado
Reciclado	5	Materia prima latón que incluye viruta, chatarra, merma, lingotes, chapa o cualquier otra presentación de latón que ingresa al inventario de material para fundir

Varilla	6	Barras de 3 o 4 m de longitud con diversos diámetros cuya aleación corresponde al latón C37700 y de origen importación
---------	---	--

De todos los materiales indicados uno de ellos, el denominado como “reciclado”, es particularmente importante debido a que se compone de los retornos de material producto de cada etapa de agregado de valor y que pueden crecer indefinidamente o consumirse sin control si no se establecen niveles de inventario que sean parte del modelo, otro de los elementos que hacen particular a esta materia prima según Asadi et al. [10], es que proporcionan beneficios económicos y medioambientales especialmente para aleaciones como el cobre, latón, aluminio.

Los demás materiales si bien son parte fundamental de este estudio, deben ser adquiridos a proveedores externos con las respectivas restricciones de carácter económico y logístico.

La aleación seleccionada en todas sus presentaciones corresponde al latón C37700, que es la óptima para el conformado en caliente al tener un índice de portabilidad de 1 y que para el caso de fabricación de componentes de grifería sanitaria contempladas en éste estudio cumple con las especificaciones de aleación definidas para elementos en contacto con agua de consumo según la norma internacional ASME A112.18, y la norma local INEN 968 de requisitos de grifería.

## 2.2 Determinación del Modelo

Para la obtención de resultados se utilizará un modelo de programación lineal entera cuya solución se obtendrá mediante el uso de un script desarrollado en software R. La matriz solución a obtener toma como datos una función objetivo de costos mínimos que tendrá como restricciones la selección de una o varias alternativas de materia prima para cumplir con el programa de producción, el cupo de importación de varilla y los máximos y mínimos de acumulación en función de los saldos iniciales de material para fundir, lo que da como resultado la alternativa de fabricación de menor costo para cada producto.

La programación lineal entera se utiliza ampliamente en las áreas tecnológicas y de ciencia, así como el transporte y la planificación de la producción. Las principales dificultades al establecer el modelo de programación lineal están relacionadas con la descripción del sistema de restricciones inherente a muchos problemas aplicados y su función objetivo[11].

La Fig. 3. muestra con un enfoque de proceso las entradas, salidas, el proceso mismo y las restricciones que permiten el planteamiento del modelo que se indica a continuación.

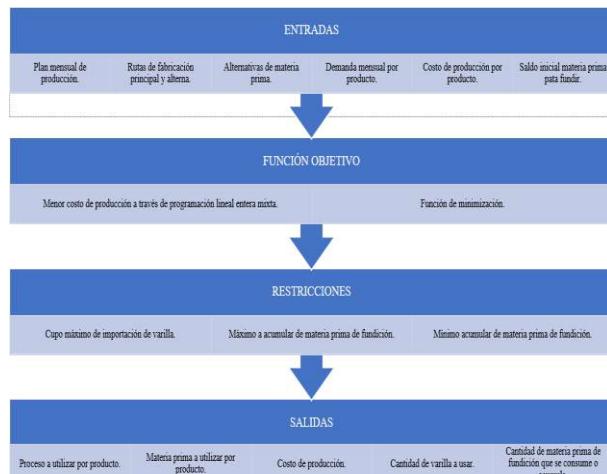


Figura 3: Diagrama de Proceso para Generación del Modelo Matemático

### 2.3 Variables de Decisión

En esta primera parte para la determinación del modelo se establecen todas las posibles combinaciones de producto con sus alternativas de materia prima definidas en Tabla 1., sin ningún tipo de discriminación según se muestra en Tabla 2:

Tabla 2: Variables de Decisión Utilizadas en el Modelo por Producto

Producto	Identificador de materia prima					
	Lingote local (1)	Lingote importado (2)	Tocho local (3)	Tocho importado (4)	Reciclado (5)	Varilla (6)
1	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>
2	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>24</sub>	X <sub>25</sub>	X <sub>26</sub>
3	X <sub>31</sub>	X <sub>32</sub>	X <sub>33</sub>	X <sub>34</sub>	X <sub>35</sub>	X <sub>36</sub>
4	X <sub>41</sub>	X <sub>42</sub>	X <sub>43</sub>	X <sub>44</sub>	X <sub>45</sub>	X <sub>46</sub>
5	X <sub>51</sub>	X <sub>52</sub>	X <sub>53</sub>	X <sub>54</sub>	X <sub>55</sub>	X <sub>56</sub>
6	X <sub>61</sub>	X <sub>62</sub>	X <sub>63</sub>	X <sub>64</sub>	X <sub>65</sub>	X <sub>66</sub>
7	X <sub>71</sub>	X <sub>72</sub>	X <sub>73</sub>	X <sub>74</sub>	X <sub>75</sub>	X <sub>76</sub>
8	X <sub>81</sub>	X <sub>82</sub>	X <sub>83</sub>	X <sub>84</sub>	X <sub>85</sub>	X <sub>86</sub>
9	X <sub>91</sub>	X <sub>92</sub>	X <sub>93</sub>	X <sub>94</sub>	X <sub>95</sub>	X <sub>96</sub>
A	X <sub>A1</sub>	X <sub>A2</sub>	X <sub>A3</sub>	X <sub>A4</sub>	X <sub>A5</sub>	X <sub>A6</sub>
B	X <sub>B1</sub>	X <sub>B2</sub>	X <sub>B3</sub>	X <sub>B4</sub>	X <sub>B5</sub>	X <sub>B6</sub>
C	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>C3</sub>	X <sub>C4</sub>	X <sub>C5</sub>	X <sub>C6</sub>
D	X <sub>D1</sub>	X <sub>D2</sub>	X <sub>D3</sub>	X <sub>D4</sub>	X <sub>D5</sub>	X <sub>D6</sub>
E	X <sub>F1</sub>	X <sub>F2</sub>	X <sub>F3</sub>	X <sub>F4</sub>	X <sub>F5</sub>	X <sub>F6</sub>

### 2.4 Función Objetivo

El costo de producción por cada alternativa de materia prima es un dato de entrada y varía cada mes en función del valor del LME por sus siglas en inglés London Metal Exchange o Bolsa de Metales de Londres que es el referente mundial que define los precios de los metales industriales y sus negociaciones.

El precio oficial al contado de la LME es un precio de referencia mundial para los productos metálicos.

Su et al. [12], en la investigación sobre la fluctuación de los precios futuros del cobre determinaron que ésta variabilidad está dada por las condiciones de la economía global, las políticas nacionales, consumo del mercado, especulación de los consumidores y cambios en los volúmenes de metal disponibles y dispuestos a poner a la venta y lo que los consumidores aceptan comprar a nivel local o mundial.

Bajo ésta premisa se plantea la siguiente función objetivo que será el resultado de la sumatoria del costo de producción por lote para cada alternativa de materia prima a la que se le asigna un valor de  $C_{ij}$  en donde  $i$  corresponde a cada uno de los 14 productos y  $j$  a cada una de las materias primas multiplicado por el resultado de cada variable de decisión como se indica en (1), con lo cual si se tiene un término  $C_{A6} x_{A6}$  será el producto del costo de fabricación del lote del producto A con la alternativa de materia prima 6, que corresponde a varilla, por su correspondiente variable de decisión cuya solución puede tener valores entre 0 y 1 incluidos.

La sumatoria del costo de fabricación por lote de todos los productos en todas sus alternativas de materia prima permite una vez resueltas las variables planteadas obtener la solución óptima a la función objetivo que resulta en el menor al costo de producción al utilizar la función de minimización.

$$FO = Z_{min} = \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 C_{ij} x_{ij} + \sum_{i=A}^E \sum_{j=1}^6 C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

### 2.5 Restricciones

Restricciones de selección de material, el primer grupo de restricciones obliga al modelo a seleccionar una alternativa de fabricación o una combinación de ellas que permita cubrir el 100 % de la producción requerida. En la Tabla 3. se observan las ecuaciones que definen la restricción que considera los productos y sus alternativas de fabricación disponibles con las alternativas de materia prima indicadas en la Fig. 2. Así para el producto 1, el modelo determinará como solución óptima una sola materia prima o una combinación de las materias primas 3, 4 o 6.

**Tabla 3: Restricciones para Selección de Material**

Producto	Restricción
1	$x_{13} + x_{14} + x_{16} = 1$
2	$x_{23} + x_{24} + x_{26} = 1$
3	$x_{33} + x_{34} + x_{36} = 1$
4	$x_{43} + x_{44} + x_{46} = 1$
5	$x_{51} + x_{52} + x_{55} + x_{56} = 1$
6	$x_{61} + x_{62} + x_{65} + x_{66} = 1$
7	$x_{71} + x_{72} + x_{75} + x_{76} = 1$
8	$x_{81} + x_{82} + x_{85} + x_{86} = 1$
9	$x_{91} + x_{92} + x_{95} + x_{96} = 1$
A	$x_{A1} + x_{A2} + x_{A5} + x_{A6} = 1$
B	$x_{B6} = 1$
C	$x_{C6} = 1$
D	$x_{D6} = 1$
E	$x_{E6} = 1$

### 2.5.1 Restricción por cupo de importación

La siguiente restricción representada en la ecuación (2), le indica al modelo el cupo máximo de uso de varilla que depende del cupo de importación  $I_{max}$  definido por la empresa en determinados períodos del año y limita el uso de varilla como alternativa de materia prima en la fabricación del lote de producción mensual para los 14 productos analizados.

Esta demanda  $V$  corresponde al peso bruto de varilla requerido para fabricar el lote mensual total de cada producto que utiliza varilla como única materia prima y que se aplica para cada uno de los 14 productos de ahí que la sumatoria toma todos los productos aplicados únicamente a su alternativa de materia prima 6 que corresponde a varilla.

$$\sum_{i=1}^9 V_{i6} x_{i6} + \sum_{i=A}^E V_{i6} x_{i6} \leq I_{max} \quad (2)$$

### 2.5.2 Restricciones máximo y mínimo a acumular

Las restricciones planteadas en las ecuaciones (3) y (4) definen la cantidad de material de reciclado que se deberá consumir o acumular con base en el saldo inicial de materia prima para fundir. El valor  $R$  representa el retorno de materia prima al inventario y está definido para cada uno de los productos al usar todas las materias

primas, éstos valores dentro de la sumatoria pueden ser negativos los que indica que en lugar de retorno se genera un consumo.

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 R_{ij} x_{ij} + \sum_{i=A}^E \sum_{j=1}^6 R_{ij} x_{ij} \leq \text{Max a acumular} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 R_{ij} x_{ij} + \sum_{i=A}^E \sum_{j=1}^6 R_{ij} x_{ij} \geq \text{Min a acumular} \quad (4)$$

El límite máximo y mínimo de inventario de material para fundir que la empresa ha determinado como necesario se encuentra establecido en un valor de 60.000 +/-10.000 Kg por lo que si este valor a inicio de mes se encuentra entre 50.000 y 65.000 Kg el valor de Max a acumular será positivo y será el valor resultante de resolver 70.000 Kg menos el saldo inicial, mientras que el valor min a acumular se define en Tabla 4 a continuación:

**Tabla 4: Mínimo a Acumular en Función de Saldo Inicial**

Saldo inicial en Kg	min a acumular en Kg
50.000 a 55.000	5.000
55.001 a 60.000	3.000
60.001 a 65.000	2.000

Si el saldo inicial de inventario de material para fundir al iniciar el mes es mayor a 65.000 Kg, entonces el valor de máximo a acumular será cero lo que indica que deberá resolverse para generar un consumo en cuyo caso el valor de mínimo a acumular será la diferencia entre 50.000 Kg menos el saldo inicial (valor negativo).

Cuando los valores de máximo y mínimo a acumular que se ingresan a la matriz de restricciones son positivos se genera una acumulación de material de reciclado que es el resultado de la viruta generada de las piezas fabricadas con varilla; mientras que, si se ingresan valores negativos el modelo genera soluciones que hacen que se genere consumo de material para fundir y se asigna como última alternativa de material para fabricar a la varilla, esto permite ingresar en un esquema cíclico que logra un inventario dentro las bandas establecidas.

Estas consideraciones que permiten establecer los valores máximo y mínimo a acumular determinan las condiciones de periodicidad que aseguran niveles de inventario dentro de los valores establecidos por la empresa con objetivos en el inventario de minimizar los costos incurridos en su manejo [13].

### 2.5.3 Restricción de no negatividad

La solución de las variables de decisión permite encontrar la materia prima o combinación de materiales seleccionados, los costos de producción, así como también, cantidad de material a consumir o acumular que



satisfagan las restricciones ingresadas al modelo, los mismos que no pueden ser negativos y que cuya condición es la indicada en (5) a continuación.

$$x_{ij} \geq 0 \quad (5)$$

Con la aplicación de modelos de inventario, niveles de servicio y punto de reorden se determina un nivel de bandas de stock de materia prima para fundir que sirven como indicador para cambiar de esquema de producción que logra siempre el menor costo posible de fabricación que evita la acumulación y la escasez. La banda superior está limitada por el nivel de inventario deseado de material que se acumula por el método de fabricación seleccionado y el aporte de viruta de latón de otras secciones de origen de la empresa que utilizan varilla de latón para la fabricación de componentes de grifería.

La banda inferior considera el stock mínimo en función de la variabilidad del lead time del proveedor de varilla y su nivel de confiabilidad de manera que no se genere desabastecimiento. El funcionamiento de los sistemas de inventario es clave en los resultados favorables de las industrias manufactureras, lo que lo convierte en un ámbito de gran relevancia para la optimización.

Una vez obtenidos los resultados entregados por el software, éstos serán comparados con el costo de producción que se obtiene con el programa de producción enviado por del área destinada de la organización que entrega la información de cuanto y cuando fabricar vs los resultados entregados por el modelo; así como, la verificación de no haber superado el cupo de importación y el cumplimiento de la acumulación de materia prima para fundición deseada en función de los saldos iniciales y su ubicación dentro de las bandas de stock; debe tenerse presente que si la acumulación es negativa la misma representa consumo.

## 2.6 Programación en R

En la Fig. 4. se presenta un esquema en donde se observa de forma ordenada como se introduce la información en el script de R, información que puede ingresarse directamente en forma de matriz o importarse desde un archivo con formato .xlsx o .csv, esto es válido para la matriz de restricciones y la matriz que contiene la información para la función objetivo, una vez que éstas se encuentran ingresadas se procede a extraer de la matriz que contiene las restricciones solo la variables de decisión y de la misma forma se extraen las soluciones de cada una de esas restricciones. Una vez se extraen las matrices indicadas en las variables res y sol se crea una nueva matriz que contiene las direcciones de las ecuaciones e inecuaciones que son solución de las restricciones.

Con estos valores ingresados al script se procede mediante la función lp a correr el programa y obtener las

soluciones que permiten obtener el costo de producción óptimo y valores para variables de decisión que indiquen la mejor alternativa de materia prima o combinación de éstas que satisfagan las restricciones indicadas.

En ocasiones el modelo puede no tener soluciones posibles y generar una matriz nula en cuyo caso se pueden ajustar el cupo máximo de importación y/o el mínimo a acumular hasta que el modelo genere una matriz de solución diferente a la nula. Esta definición la toma la empresa en función de los saldos de varilla existentes y de los saldos iniciales de material para fundir.

El modelo matemático planteado es escalable a varios niveles de restricciones y se pueden incorporar a éste, productos adicionales que tengan la misma característica de utilizar varilla como materia prima.

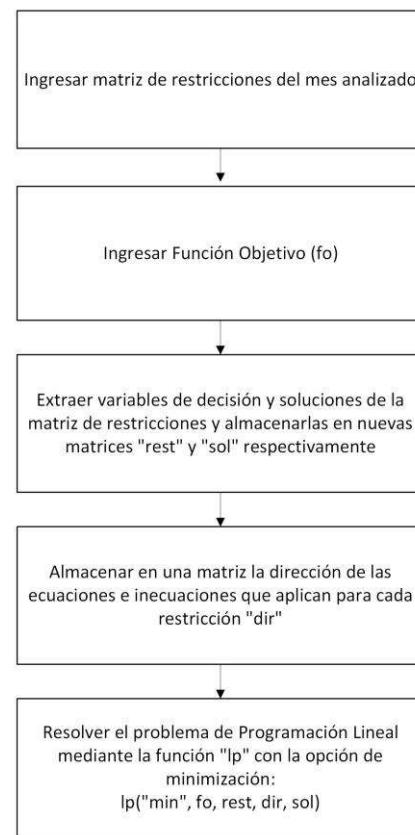


Figura 4: Esquema de Programa en R

## 3. RESULTADOS

El modelo propuesto fue resuelto usando Rstudio con ayuda del paquete “lpSolve” y su función “lp” para minimización el cual genera como solución una matriz de 6 x 14 con los valores de cada variable de decisión que definen la proporción de cada lote a producir por tipo de materia prima y que se presenta en la Tabla 5. que corresponde a 1 mes continuo de producción.

En la tabla indicada se observan los valores que tomarán las variables de decisión que permiten obtener el menor costo de producción al aplicarse sobre la función

objetivo (1). Adicional estos valores aplicados a (2), (3) y (4) consiguen satisfacer las restricciones de cupo de importación y el consumo o acumulación de material lo que permite mantener los niveles de inventario dentro de las bandas de inventario máximo y mínimo.

**Tabla 5: Resumen Semestral de Resultados del Modelo de Programación Lineal**

PRODUCTO	Resultado de Tipo de Materia Prima para Producción en mes 1.			
	Lingote local (%)	Tocho importado (%)	Reciclado (%)	Varilla (%)
1	0	0	0	100
2	0	0	0	100
3	0	0	0	100
4	0	0	0	100
5	0	55	45	0
6	0	0	0	100
7	0	0	0	100
8	0	0	0	100
9	0	0	0	100
A	0	0	0	100
B	0	0	0	100
C	0	0	0	100
D	0	0	0	100
E	0	0	0	100

Los resultados obtenidos en el modelo de programación de cada mes se aplican sobre (1) en donde el valor de C que es parte de esta ecuación está directamente relacionado con la variación del precio del cobre y del zinc, el mismo que se encuentra dado por el LME y que para los meses que se analizan son los de la Tabla 6.

**Tabla 6: LME en USD/Kg para Cobre y Zinc**

Mes	Cu	Zn
Mes 1	8.100	2.602
Mes 2	8.041	2.480
Mes 3	8.456	2.465
Mes 4	8.476	2.640

Mes 5	8.513	2.551
Mes 6	8.389	2.382

La Tabla 7. presenta el costo de producir sin optimización, es decir fabricar todos los productos con varilla respecto a la fabricación óptima con base en los resultados del modelo de optimización propuesto Adicional en esta Tabla 7. se incluye el ahorro que se obtiene al aplicar esta solución en la programación mensual y el cupo de importación asignado para el mes.

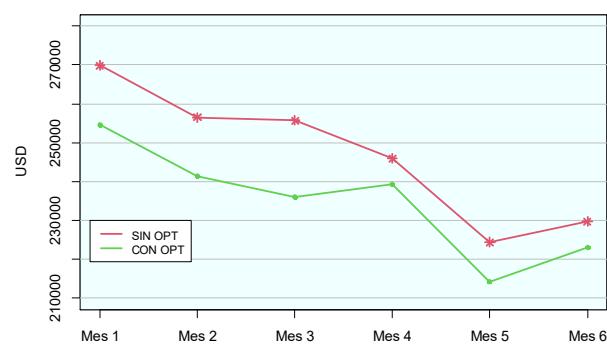
**Tabla 7: Costo en USD de Producir con Optimización Respecto a Producción sin Optimización**

Mes	Sin optimización (USD)	Con optimización (USD)	Ahorro (USD)	Cupo de importación (Kg)
Mes 1	269.793	254.68	15.113	36
Mes 2	256.526	241.37	15.156	36
Mes 3	255.656	236.117	19.539	36
Mes 4	245.987	239.202	6.785	27
Mes 5	224.419	214.359	10.06	27
Mes 6	229.729	223.041	6.688	27

El costo de producir al aplicar las soluciones del modelo de optimización en la función objetivo en todos los meses analizados presenta un ahorro, y aunque este es variable, siempre es menor que el que se obtiene al fabricar únicamente de varilla.

Esta variabilidad se da básicamente como consecuencia de mantener el inventario de materia prima para fundir dentro de los límites especificadas por la empresa.

La variación en USD del costo de producción se puede visualizar en Fig. 5. en donde para cada mes en el que se aplica el modelo este valor es menor.



**Figura 5: Costo de Producción con Modelo de Optimización y sin Optimización [USD]**

A continuación, en la Fig. 6., se presenta el inventario en Kg al inicio de cada mes de materia prima para fundir al aplicarse el modelo regular de producción (SIN OPT) y el inventario al aplicar el modelo de optimización (CON OPT) en el que se observa la tendencia creciente de los niveles de inventario cuando se adopta el esquema de producción regular entregado por el del área destinada de la organización que entrega la información de cuanto y cuando fabricar en el cual solo se utiliza varilla para la fabricación, es decir sin optimización.

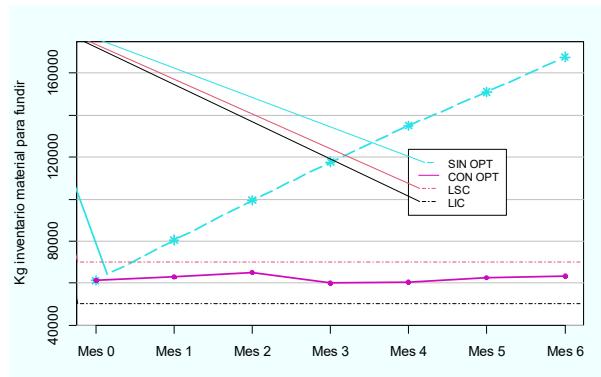


Figura 6: Inventario de Material para Fundir [Kg]

Por otra parte, al aplicar la solución del modelo de optimización se observa como los saldos de inventario de material para fundir se mantienen dentro de las bandas establecidas y que tienen como límite inferior de control (LIC) 50.000 Kg y como límite de control superior (LSC) 70.000 Kg, se muestra en la Fig. 7.

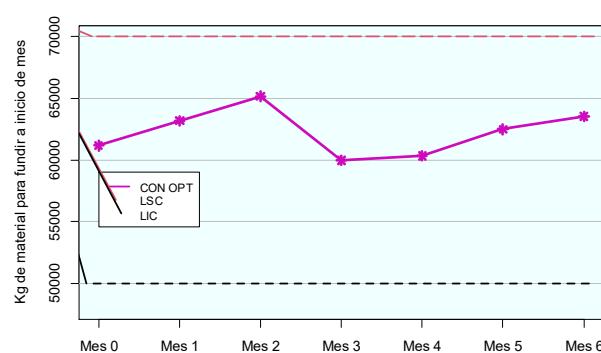


Figura 7: Inventario de Material para Fundir con Optimización [Kg]

#### 4. CONCLUSIONES

El método de programación lineal propuesto en el estudio permitió encontrar la solución de menor costo de producción, cumpliendo además con las restricciones de cupos de importación y nivel de inventario establecido en 50 ton como nivel de inventario mínimo y 70 ton como inventario máximo.

Una vez aplicadas las soluciones del modelo para la selección de material o materiales requeridos para el cumplimiento de los lotes de producción se obtuvo un ahorro acumulado de USD 73.341 durante 6 meses

consecutivos y se logró pasar de un inventario promedio de material para fundir de 116 ton con el esquema original de producción a 62 ton con el plan de producción optimizado.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la carrera de Ingeniería Mecánica y al Grupo de Investigación en Ingeniería, Productividad y Simulación Industrial (GIIPSI) de la Universidad Politécnica Salesiana

#### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. S. Chauhan and P. Kotecha, "An efficient multi-unit production planning strategy based on continuous variables," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 68, pp. 458–477, 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.03.012.
- [2] G. Bayá, P. Sartor, F. Robledo, E. Canale, and S. Nesmachnow, *A Case Study of Smart Industry in Uruguay: Grain Production Facility Optimization*, vol. 1555 CCIS. 2022. doi: 10.1007/978-3-030-96753-6\_8.
- [3] J. I. P. Rave and G. P. J. Álvarez, "Application of mixed-integer linear programming in a car seat assembling process," *Pesquisa Operacional*, vol. 31, no. 3, pp. 593–610, 2011, doi: 10.1590/S0101-74382011000300011.
- [4] F. Dianawati and H. Fatoni, "Determining the optimal inventory holding time using mixed integer linear programming (MILP) in a forwarder company," in *AIP Conference Proceedings*, 2024. doi: 10.1063/5.0242084.
- [5] J. M. Izar Landeta, C. B. Ynzunza Cortés, and O. Guarneros García, "Variabilidad de la demanda del tiempo de entrega, existencias de seguridad y costo del inventario," *Contaduría y Administración*, vol. 61, no. 3, pp. 499–513, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.cya.2015.11.008.
- [6] A. Gholipoor, M. M. Paydar, and A. S. Safaei, "A faucet closed-loop supply chain network design considering used faucet exchange plan," *J Clean Prod*, vol. 235, pp. 503–518, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.346.
- [7] J. Johansson, L. Ivarsson, J. E. Ståhl, V. Bushlya, and F. Schultheiss, "Hot Forging Operations of Brass Chips for Material Reclamation after Machining Operations," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2017, pp. 584–592. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.152.
- [8] V. Agrawal, R. P. Mohanty, S. Agarwal, J. K. Dixit, and A. M. Agrawal, "Analyzing critical success factors for sustainable green supply chain management," *Environ Dev Sustain*, vol. 25, no. 8, pp. 8233–8258, 2023, doi: 10.1007/s10668-022-02396-2.

- [9] A. Loibl and L. A. Tercero Espinoza, "Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America," *Resour Conserv Recycl*, vol. 169, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105462.
- [10] P. Asadi, M. Akbari, A. Armani, M. R. M. Aliha, M. Peyghami, and T. Sadowski, "Recycling of brass chips by sustainable friction stir extrusion," *J Clean Prod*, vol. 418, no. June, p. 138132, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138132.
- [11] A. I. Kibzun and V. A. Rasskazova, "Linear Integer Programming Model as Mathematical Ware for an Optimal Flow Production Planning System at Operational Scheduling Stage," *Automation and Remote Control*, vol. 84, no. 5, pp. 529–542, 2023, doi: 10.1134/S0005117923050065.
- [12] H. Su, N. Zhou, Q. Wu, Z. Bi, and Y. Wang, "Investigating price fluctuations in copper futures: Based on EEMD and Markov-switching VAR model," *Resources Policy*, vol. 82, May 2023, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103518.
- [13] J. M. Izar Landeta, C. B. Ynzunza Cortés, and E. Zermeño Pérez, "Calculation of reorder point when lead time and demand are correlated," *Contaduría y Administración*, vol. 60, no. 4, pp. 864–873, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.cya.2015.07.003.
- [14] Patrão, R. L., & Napoleone, A. (2024). Decision Making under Uncertainty for Reconfigurable Manufacturing Systems: A framework for uncertainty representation. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.102>
- [15] Napoleone, A., Andersen, A.-L., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. (2023). Towards human-centric reconfigurable manufacturing systems: Literature review of reconfigurability enablers for reduced reconfiguration effort and classification frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.014>
- [16] Barrera-Díaz, C. A., Nourmohammadi, A., Smedberg, H., Aslam, T., & Ng, A. H. C. (2023). An Enhanced Simulation-Based Multi-Objective Optimization Approach with Knowledge Discovery for Reconfigurable Manufacturing Systems. *Mathematics*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/math11061527>
- [17] Ang, C. W., Yahaya, S. H., Salleh, M. S., & Cahyadi, N. (2025). A Comprehensive Review of Different Approaches used by Manufacturing Industries in Handling Capacity Planning under Demand Uncertainties. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 50(1), 88–106. <https://doi.org/10.37934/araset.50.1.88106>
- [18] Moghaddam, S. K., Houshmand, M., Saitou, K., & Fatahi Valilai, O. (2020). Configuration design of scalable reconfigurable manufacturing systems for part family. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2974–2996. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1620365>
- [19] Imseitif, J., & Nezamoddini, N. (2020). Macro and micro-production planning for reconfigurable manufacturing systems. *Proceedings of the 2020 IISE Annual Conference*, 784–789.
- [20] Gainanov, D. N., Berenov, D. A., Nikolaev, E. A., & Rasskazova, V. A. (2022). Integer Linear Programming in Solving an Optimization Problem at the Mixing Department of the Metallurgical Production. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 13621 LNCS. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24866-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24866-5_12)
- [21] Rasskazova, V. A. (2024). LIP Model in Solving RCPSP at the Flow Type Production. In *Communications in Computer and Information Science*: Vol. 1913 CCIS. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48751-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48751-4_6)
- [22] Angizeh, F., Montero, H., Vedpathak, A., & Parvania, M. (2020). Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning. *Computers and Electrical Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106609>
- [23] Coronado-Hernandez, J. R., de la Hoz, L., Leyva, J., Ramos, M., & Zapatero, O. (2020). Linear programming model to minimize the production costs of an adhesive tape company | Modelo programación lineal para minimizar los costos de producción de una empresa de cintas adhesivas. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.369>
- [24] Vanli, A. S., & Karas, M. H. (2025). Material and Process Modification to Improve Manufacturability of Low-Lead Copper Alloys by Low-Pressure Die Casting Method. *Metals*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/met15020205>
- [25] Ying, K.-C., Lin, S.-W., Pourhejazy, P., & Lee, F.-H. (2025). Production scheduling of additively manufactured metal parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 57, 100–115. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2025.01.005>

- [26] Yang, Z., & Liu, S. (2025). Fairness-oriented multi-objective optimization of supply chain planning under uncertainties. *Socio-Economic Planning Sciences*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102198>



**Vinicio Quinteros.** - Nació en Otavalo en 1978. Alcanzó su título de Ingeniero Mecánico en el 2011 y de Magíster en Producción en Operaciones Industriales en el 2024 en la Universidad Politécnica Salesiana. Actualmente se desempeña como Supervisor en la

empresa FV Area Andina con 23 años de experiencia, es auditor de los sistemas ISO 9001, 14001, auditor del sistema de seguridad BASC. Aplica sus conocimientos y experiencia enfocando en cambiar la metodología de empresas centradas en la producción a empresas centradas en la gente para lo cual se convierte en un generador de entornos y continúa impulsando un desarrollo sostenible, responsable con el medio ambiente, la comunidad, pero sobre todo liderando su equipo de trabajo hacia nuevos horizontes.



**Cristian Leiva.** - Nació en Quito en 1980. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE 2003. Y su título de Magíster en Materiales, Diseño y Producción en la Escuela Politécnica Nacional en Ecuador.

Tiene 12 años de experiencia en empresas manufactureras como Jefe de Planta, Producción, Mantenimiento y Proyectos. Actualmente más de 10 años como docente investigador en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus campos de investigación son Materiales y Optimización en Planeación de la Producción.



**Steven Cárdenas.** – Nació en Ibarra en 2003. Actualmente cursa la carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad Politécnica Salesiana. Su formación se orienta hacia el desarrollo de conocimientos en el área de la ingeniería aplicada y los sistemas mecánicos.