

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería



**PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA
EMPRESA SIDERÚRGICA USANDO PROGRAMACIÓN
LINEAL ENTERA MIXTA**

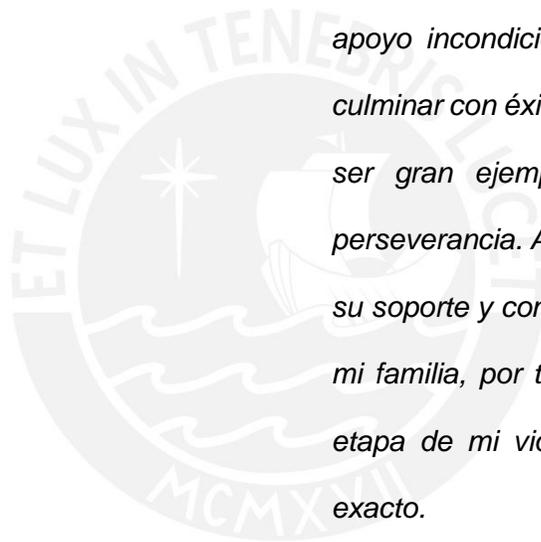
Tesis para optar el Título de **Ingeniero Industrial**, que presenta el bachiller:

Enrique Abel Roca Silva

ASESOR: Ingeniero Miguel Hermógenes Mejía Puente

San Miguel, 22 de abril de 2019

A mis padres, por su gran amor, esfuerzo y apoyo incondicional que hoy me permiten culminar con éxito esta etapa de mi vida, por ser gran ejemplo de lucha, sacrificio y perseverancia. A mi hermano Sebastian, por su soporte y compañía en todo momento. A mi familia, por todo su apoyo durante esta etapa de mi vida, en la medida y tiempo exacto.



RESUMEN

La industria del acero en Perú, así como en varios países de América y Europa, viene atravesando en los últimos años por una aguda crisis, originada principalmente por la sobreproducción de acero y la desaceleración de la economía china, lo cual ha generado que el país oriental aumente sus exportaciones a mercados extranjeros ofreciendo productos a precios muy bajos (en ocasiones menores al costo de producción) que afectan directamente a las siderúrgicas locales.

En vista de lo anterior, el precio y calidad se convierten en factores determinantes al momento de optar por un producto u otro, lo que ha llevado a las empresas (no sólo siderúrgicas) a buscar alternativas de producción que permitan obtener el equilibrio entre costo y calidad, a fin de poder contrarrestar ante la aparición de nuevos competidores.

Alineado con una política de reducción de costos, se plantea un modelo matemático cuyo objetivo será obtener la mezcla de ingredientes de menor costo que satisfaga las condiciones de calidad exigidas en las operaciones de fundición. Este modelo aparece como alternativa a los modelos tradicionales de programación de la producción que se soportan en la experiencia y habilidad de los funcionarios. Asimismo, se incluirá en el modelo la recuperación y reutilización de residuos y mermas dentro del proceso a fin de lograr un ahorro máximo.

En el presente proyecto, se revisarán brevemente aplicaciones similares en otras empresas, se buscará adaptar el modelo a las necesidades particulares de la empresa analizada y la herramienta propuesta será validada en dos periodos de prueba, obteniendo ahorros por \$911,520 en el primer periodo y \$731,980 en el segundo, valores significativos que contrastan notablemente en relación a los costos de implementación necesarios, lo cual se verá reflejado en los indicadores económicos obtenidos (VAN= \$1,566,132). Además, se presentará como valor agregado una interfaz amigable al usuario, la cual le permitirá actualizar la información del proceso sin necesidad de realizar cambios en el código de programación, lo que genera que el modelo sea de fácil acceso para todo el personal de la empresa.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial

ALUMNO : ENRIQUE ABEL ROCA SILVA

CÓDIGO : 2009.0259.12

PROPUESTO POR : Dr. Miguel Hermógenes Mejía Puente

ASESOR : Dr. Miguel Hermógenes Mejía Puente

TEMA : PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA
EMPRESA SIDERÚRGICA USANDO PROGRAMACIÓN
LINEAL ENTERA MIXTA

Nº TEMA : 1290

FECHA : San Miguel, 22 de abril de 2019

JUSTIFICACIÓN:

Las industrias dedicadas a la fundición han experimentado en los últimos años un serio problema ante la aparición de nuevos competidores; en ese sentido, los precios y la calidad de los productos se convierten en factores determinantes al momento de optar por la compra de un producto sobre otro. De ese modo, las empresas (y no sólo las siderúrgicas) buscan obtener un equilibrio entre calidad y precio de los insumos.

El modelo propuesto ofrece una alternativa para minimizar los costos de la mezcla de ingredientes en operaciones de fundición; es una propuesta ante las técnicas de programación tradicionales por campañas o lotes, que busca lograr ahorros significativos en la etapa de planificación de las operaciones.

En esta metodología, se consideran los ahorros que pudieran generarse al emplear los residuos o mermas generadas como parte del proceso de fundición, siempre y cuando cuenten con las características requeridas para poder ser reprocesados. En algunos casos, la recuperación de estos materiales puede representar hasta el 3% de la composición general del mix de carga que será empleado para la producción del acero.

Una adecuada selección de los materiales que configuran el mix de carga puede traducirse en ahorros de energía eléctrica durante las operaciones de fundición en el horno eléctrico. De ese modo, se estima que una disminución del 1% del rendimiento de la chatarra reciclada empleada, principalmente debido a la presencia de componentes no metálicos y otros compuestos no favorables para el proceso, podría tener un impacto en el aumento del consumo energético de aproximadamente 6kWh/Tm de acero líquido. Por otro lado, la disposición de los materiales seleccionados al interior del horno, podrían provocar variaciones hasta de 20kWh/Tm de acero líquido.

Asimismo, se busca optimizar la manera de programar la producción mediante el empleo de técnicas de programación lineal, a diferencia de los softwares tradicionales que emplean programación de la producción por lotes o campañas de producción; se busca de este modo reducir el tiempo necesario para la programación de las actividades, las cuales en ocasiones requieren de múltiples iteraciones para obtener programaciones a largo plazo.

OBJETIVO GENERAL:

Planificar a largo plazo la producción de una empresa siderúrgica mediante el uso de programación lineal entera mixta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desarrollar un adecuado marco teórico.
- Describir la situación actual de la empresa en estudio.
- Diseñar un modelo de optimización de recursos utilizando programación lineal entera mixta.
- Presentar las ventajas de la programación a largo plazo sobre la programación por lotes o campañas.

PUNTOS A TRATAR

a. Marco teórico

Se hará una breve introducción a la programación lineal, los pasos a seguir para la formulación de un modelo de programación y su aplicación en problemas de mezcla de ingredientes. Asimismo, presentará dos aplicaciones de modelos de optimización aplicados en empresas reales, los cuales servirán como base para la formulación del modelo propio.

b. Descripción y diagnóstico de la empresa

Se describirá brevemente la empresa sobre la cual se aplicará el trabajo, así como el proceso principal que lleva a cabo. Además, se identificarán los aspectos que deben ser considerados al momento de programar las operaciones en una acería.

c. Diseño de un modelo de programación lineal entera mixta

Se explicará el modelo que se tomará como base para la optimización de la mezcla de ingredientes; luego, se expondrán las características particulares del proceso que se lleva a cabo en la empresa y se formulará el modelo de programación lineal final.

d. Propuesta de mejora

Se expondrán los resultados de las pruebas realizadas con el modelo planteado, comparándolos con los obtenidos mediante los métodos empleados en la empresa estudiada.

e. Evaluación económica

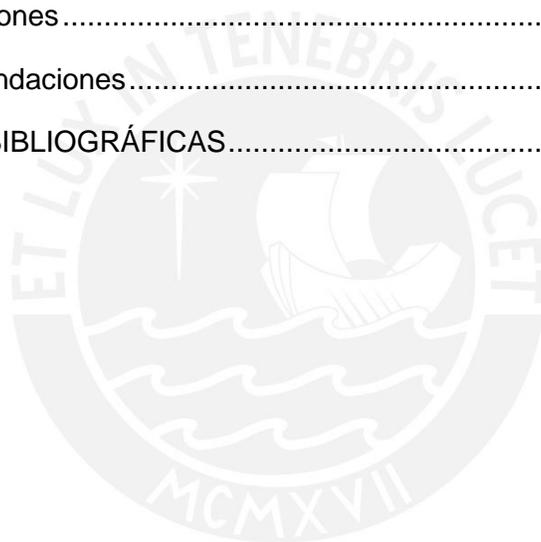
Se presentará el análisis económico de la propuesta de mejora, indicando los costos incurridos para su aplicación y los beneficios esperados.

f. Conclusiones y recomendaciones

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE GRÁFICOS	v
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Investigación de operaciones	1
1.1.1. Programación lineal.....	1
1.1.2. Formulación de un modelo de programación lineal.....	2
1.2. Aplicaciones en problemas de mezcla.....	3
1.2.1. Modelo de optimización de Kim y Lewis	4
1.2.2. Modelo de optimización de Sakalli y Birgoren.....	15
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA	20
2.1. Descripción de la empresa	20
2.2. Descripción del proceso principal	21
2.3. Programación de la producción	24
2.4. Elaboración de la mezcla y carga de materiales	29
2.5. Diagnóstico de la situación actual.....	32
2.5.1. Análisis de causas.....	34
2.5.2. Propuestas de Solución.....	36
2.5.3. Problemática identificada.....	37
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA	40
3.1. Variables de decisión y parámetros	40
3.2. Función objetivo	45
3.3. Restricciones.....	49
3.4. Compilación del modelo matemático	58
CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE MEJORA	66

4.1. Resultados	66
4.2. Análisis de Sensibilidad	74
4.2.1. Variaciones de los coeficientes de costo de los ingredientes.....	74
4.2.2. Variaciones de los lados derechos de las restricciones	79
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA	86
5.1. Costos	86
5.2. Beneficios.....	87
5.3. Flujo de caja proyectado.....	88
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
6.1. Conclusiones.....	89
6.2. Recomendaciones.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Esquema tradicional de una fundición	6
Ilustración 1.2 Interfaz del usuario diseñada por Sakali y Birgoren	17
Ilustración 2.1 Esquema de producción	22
Ilustración 2.2 Diagrama de macro proceso: programación de la producción	28
Ilustración 2.3 Análisis de causas de problemática analizada	35

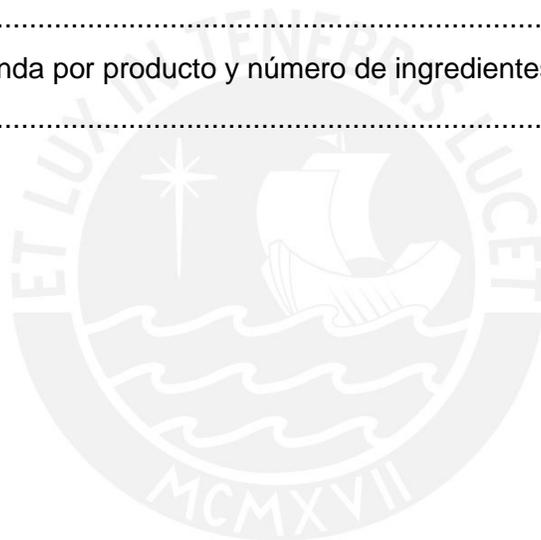


ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Pruebas realizadas en la planta de fundición de acero	15
Tabla 1.2 Resultados del modelo de mezcla simple de Sakali y Birgoren.....	18
Tabla 2.1 Factores y criterios de evaluación de la matriz FACTIS	36
Tabla 2.2 Evaluación de propuestas de solución	37
Tabla 3.1 Ingredientes que componen el mix de carga metálica.....	48
Tabla 3.2 Cantidad porcentual de cada componente por ingrediente de carga.....	54
Tabla 3.3 Calidades de acero fabricadas en la empresa Siderúrgica S.A.	57
Tabla 4.1 Resultados de pruebas realizadas	67
Tabla 4.2 Variaciones permisibles de los coeficientes de costo de los ingredientes en la prueba N°1	75
Tabla 4.3 Variaciones permisibles de los coeficientes de costo de los ingredientes en la prueba N°2	76
Tabla 4.4 Costos reducidos y variaciones permisibles de los coeficientes de costos de los ingredientes no empleados en la prueba N°1	80
Tabla 4.5 Costos reducidos y variaciones permisibles de los coeficientes de costos de los ingredientes no empleados en la prueba N°2.....	80
Tabla 4.6 Variaciones permisibles de los lados derechos de las restricciones de la prueba N°1	82
Tabla 4.7 Variaciones permisibles de los lados derechos de las restricciones de la prueba N°2	83
Tabla 5.1 Inversión inicial para la implementación del modelo.....	86
Tabla 5.2 Resultados de rendimiento de las pruebas N°1 y N°2.....	87
Tabla 5.3 Ahorro total generado en las pruebas N°1 y N°2.....	88
Tabla 5.4 Flujo de caja proyectado en dólares americanos (\$)	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Composición del costo de producción de la barra de construcción.....	33
Gráfico 4.1 Consumo por ingrediente en prueba N°1.....	68
Gráfico 4.2 Consumo por ingrediente en prueba N°2.....	69
Gráfico 4.3 Consumo por ingrediente y número de productos en los que se consumen de la prueba N°1.....	70
Gráfico 4.4 Consumo por ingrediente y número de productos en los que se consumen de la prueba N°2.....	71
Gráfico 4.5 Consumo por grupo de ingredientes en prueba N°1.....	72
Gráfico 4.6 Consumo por grupo de ingredientes en prueba N°2.....	72
Gráfico 4.7 Demanda por producto y número de ingredientes que los componen de la prueba N°1.....	73
Gráfico 4.8 Demanda por producto y número de ingredientes que los componen de la prueba N°2.....	73



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se hará una breve introducción a la programación lineal y su aplicación en problemas de mezcla de ingredientes. También se presentarán ejemplos de aplicaciones en empresas reales que servirán de guía para la formulación del modelo propuesto.

1.1. Investigación de operaciones

La investigación de operaciones, tal y como se conoce actualmente, tiene sus orígenes en la Segunda Guerra Mundial, cuando existía una necesidad urgente de asignar recursos escasos a las diversas operaciones militares en la forma más efectiva. Hasta antes de esa época, las decisiones se basaban en la intuición y la experiencia; sin embargo, durante la guerra las milicias americana y británica reúnen un grupo de científicos para aplicar el método científico a problemas estratégicos y tácticos de carácter militar (Hillier y Lieberman 2004:1). Luego de la guerra, las ideas formuladas en operaciones militares se utilizaron y adaptaron para lograr mayor eficiencia y productividad en el sector civil; hoy en día, las técnicas de la investigación operativa ya no se limitan a uno o dos sectores, sino que se han convertido en una herramienta indispensable para la toma de decisiones en casi todos los campos de la ciencia moderna (Taha 2004:1).

Así, se puede definir la investigación de operaciones como “un enfoque científico en la toma de decisiones que busca el mejor diseño y operar un sistema, por lo regular en condiciones que requieran la asignación de recursos escasos” (Winston 2004:1). Es decir, aplicar técnicas y herramientas que permitan optimizar el uso de recursos con el objetivo de lograr los mejores resultados posibles para la solución de un determinado problema. La optimización de estos recursos se puede lograr mediante una herramienta llamada Programación Lineal.

1.1.1. Programación lineal

Un modelo de programación lineal (PL) obedece a técnicas matemáticas que abarcan el problema general de asignar recursos limitados entre actividades que compiten entre ellas por consumir dichos recursos de mejor manera posible (es decir, de forma óptima). El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas descritas en el modelo son funciones lineales (Hillier y Lieberman 2004:24).

Un modelo de programación lineal consta de los siguientes elementos:

- Variables de decisión: son los factores o parámetros determinantes de la decisión sobre un problema.
- Función objetivo: expresa la relación que existe entre las variables de decisión y el objetivo del problema. Los tipos de función objetivo más comúnmente empleados en la programación lineal son los de maximización (por lo general de utilidad/beneficio) y minimización (por lo general de costos).
- Restricciones: expresiones que permiten limitar el uso de los recursos; son funciones de las variables de decisión del problema.
- Rango de existencia: es el rango de posibles valores que pueden tomar las variables de decisión.

Según Gonzales (2003:13), un modelo de programación lineal debe contar con las siguientes características:

- Externas
 - El problema planteado debe tener varias soluciones posibles
 - Se debe fijar algún criterio de decisión
 - Interdependencia entre las variables de decisión que conforman la función objetivo y las restricciones del problema
- Internas
 - Las variables deben ser del tipo lineal
 - La función objetivo debe ser lineal
 - Las relaciones de las variables deben ser de tipo lineal

1.1.2. Formulación de un modelo de programación lineal

La resolución de un problema de programación lineal, según lo explica Gonzales (2003:12), comprende tres partes:

- El planteamiento del modelo
- La resolución del problema
- El análisis económico de los resultados

Sin duda, el objetivo primordial es el análisis de los resultados, y cómo su interpretación afecta sobre las decisiones que se tomarán sobre el problema en cuestión.

Asimismo, Winston (2004:5) sugiere siete pasos para la construcción y elección del modelo de programación lineal:

- Paso 1: Plantear el problema. Se define el problema que se quiere atacar, donde se debe incluir el objetivo que se desea lograr con la solución del mismo.
- Paso 2: Observar el sistema. Se refiere a la recolección de información y situación actual que definen la problemática del sistema.
- Paso 3: Formular el modelo matemático. Se utilizan las técnicas de programación lineal para elaborar un modelo matemático; incluye la definición de las variables de decisión, presentación de la función objetivo y las restricciones del problema.
- Paso 4: Verificación del modelo. Se procede a validar el modelo; se realizan pruebas y se observa si los resultados cumplen con las condiciones del problema y si se ajustan a la realidad.
- Paso 5: Selección de la opción adecuada. Debido a que un problema puede tener varias soluciones posibles, se selecciona la más conveniente, es decir, la que cumple mejor con los objetivos del problema planteado.
- Paso 6: Análisis de los resultados. Se analizan e interpretan las soluciones al problema arrojadas por el modelo, y de acuerdo a los resultados, se elige la más conveniente.
- Paso 7: Puesta en marcha. De aceptar los resultados en el paso 6, se implementa y ejecuta la solución mostrada; requiere de seguimiento y control de los resultados reales dentro del sistema.

1.2. Aplicaciones en problemas de mezcla

Los problemas de mezcla surgen a partir de la necesidad de un administrador de decidir qué recursos (materias primas) mezclar y cómo hacerlo para la obtención de uno o más productos. En estos casos, los recursos contienen ciertos ingredientes necesarios que deben mezclarse en ciertas proporciones para obtener un producto final. En la mayoría de los casos, el administrador encargado de la mezcla debe decidir cuánto deberá comprar de cada recurso, de manera que logre satisfacer las necesidades de ingredientes del producto final; sin embargo, el problema se vuelve más complejo cuando el administrador debe obtener dichos recursos al menor costo posible.

La programación lineal resulta una herramienta útil para la resolución del problema de mezcla, donde se busca minimizar el costo de la mezcla de los ingredientes. Así, podemos definir de la siguiente manera un problema genérico de mezcla de ingredientes:

$$\text{MIN } Z = C \cdot X$$

Sujeto a las restricciones

$$A \cdot X = B$$

En las ecuaciones mostradas, Z representa el costo de la mezcla que se quiere minimizar; C constituye el costo de cada uno de los recursos o materias primas que forman parte de la mezcla; X representan los recursos que ingresarán a la mezcla; A representa la matriz que contiene la composición de cada recurso; y finalmente B es el vector que representa los requerimientos de cada ingrediente necesarios para cada uno de los productos.

Una forma conveniente de definir las variables de decisión en un problema de mezcla es emplear la matriz A , en donde las filas correspondan a los ingredientes y las columnas a los productos finales.

El empleo de este enfoque tiene dos ventajas. En primer lugar, proporciona una manera sistemática de definir las variables de decisión para cualquier problema genérico de mezcla; y segundo, permite obtener una imagen visual de las variables de decisión en función de la forma en que se relacionan con los ingredientes, los productos finales y entre ellos mismos.

1.2.1. Modelo de optimización de Kim y Lewis

Kim y Lewis (1987) propusieron la construcción de un modelo matemático que permitiera reducir los costos de producción en operaciones de fundición. La finalidad del trabajo fue determinar la mezcla óptima de recursos a seleccionar en una operación de fundición durante un horizonte de planificación determinado, así como demostrar la utilidad del modelo propuesto para la toma de decisiones.

Según los autores, la industria de la fundición, basado en el deseo de lograr una productividad siempre mayor, debe ser flexible y estar preparada para la utilización de técnicas de administración científica. Así, su trabajo describe la aplicación de la programación lineal para determinar la mezcla óptima (de menor costo) de recursos en

operaciones de fundición genéricas; es decir, este modelo busca ser útil para todo tipo de operaciones de fundición, a pesar de que la aplicación directa del modelo se haya desarrollado en una fundición de acero.

A partir de lo anterior, definen tres propósitos para su trabajo:

- Desarrollar un modelo para la operación de fundición, empleando técnicas de programación lineal, que considere una cantidad variada de aleaciones que serán producidas en un horizonte de producción prolongado.
- Emplear software comercial para la resolución del modelo de programación lineal.
- Comparar la eficiencia del modelo propuesto contra la que se obtiene por software diseñado para hallar el costo mínimo de carga.

Sobre el último propósito, al referirse al software diseñado para hallar el costo mínimo de carga se refiere a una herramienta que calcula el costo mínimo de la mezcla de ingredientes para un lote a la vez; es decir, no se considera el impacto de los retornos futuros (chatarra generada internamente), políticas de control de inventarios y exactitud en el cálculo de las cantidades de cada ingrediente que compone la mezcla.

Por el contrario, el modelo propuesto por Kim y Lewis propone integrar la relación que existe entre lotes consecutivos de producción, incluyendo en el modelo la chatarra generada internamente, ya que consideran este factor como determinante para obtener el costo mínimo de la operación de fundición.

De este modo, los autores analizan los trabajos de sus predecesores como Pehlke, Giszczack, Barrick, Mikelonis y la Sociedad Americana de Fundidores. En relación con los autores citados, si bien aportan herramientas para obtener mezclas de ingredientes a menores costos, no consideran el efecto de la carga de un lote de producción sobre el siguiente, así como no incluyen los retornos que podrían generarse durante el horizonte de planificación determinado.

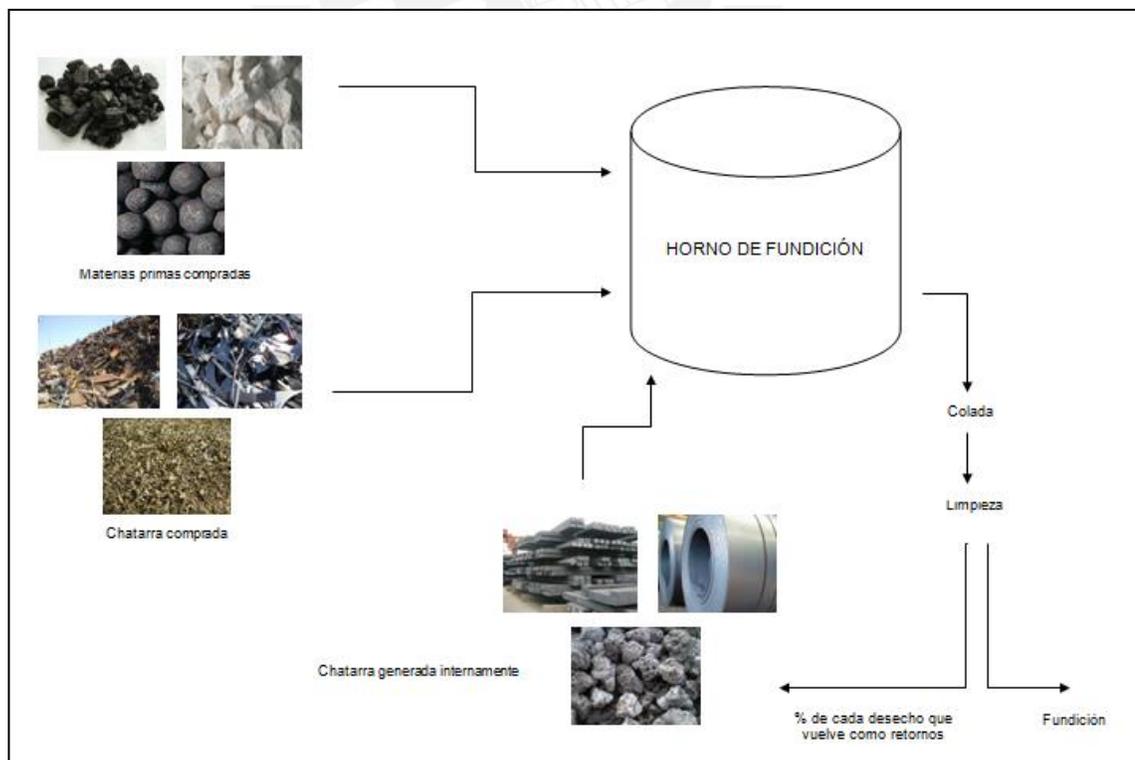
Sin embargo, los autores aclaran que existe cierto riesgo en el empleo de la chatarra, no solo la generada internamente, sino también en aquella que se compra en el mercado, el cual tiene que ver con la incertidumbre en la composición química. Debido a esto, es importante considerar la composición y tipo de chatarra que será incluida dentro de la mezcla, e identificar las proporciones adecuadas de cada tipo. Es conveniente clasificar

los tipos de chatarra y separarlos; a pesar de ello, dentro de los mismos tipos de chatarra, el contenido de ingredientes en los materiales puede diferir uno de otros, por lo cual resulta difícil un análisis exacto de las composiciones químicas para cada tipo de chatarra, y dicha incertidumbre se trasfiere a la mezcla de chatarra que se agrega a la carga de fundición.

Considerando lo anterior, Kim y Lewis señalan que, a fin de considerar un enfoque global dentro del horizonte de planificación, todos los costos de los lotes de producción deberán ser calculados al mismo tiempo, lo cual permitirá evaluar el costo-beneficio entre los recursos empleados con el sistema de “lote a lote” y el propuesto (Kim y Lewis 1987: 736-737).

Para la formulación del modelo, se aprecia en la Ilustración 1.1 un esquema que los autores presentan donde se puede apreciar la forma tradicional en la que opera una planta de fundición, mostrando los flujos de ingredientes que se añaden a la mezcla de fundición y las salidas generadas tras el proceso en el horno de fundición (en el flujo se incluyen los retornos).

Ilustración 1.1 Esquema tradicional de una fundición



Fuente: Kim y Lewis (1987) / Elaboración propia.

A partir de dicho diagrama, proponen un modelo matemático que pueda adaptarse a los diversos tipos de fundición, donde consideran tres tipos principales de ingredientes: la materia prima comprada, la chatarra comprada y la chatarra generada internamente.

El modelo de Kim y Lewis se basa principalmente en las siguientes restricciones:

- Demanda y/o capacidad del horno: no se debe exceder una capacidad determinada de horno ni la demanda del cliente.
- Disponibilidad de materiales: no se debe exceder el uso de los recursos disponibles en ningún momento en el tiempo.
- Balance químico del metal: se debe mantener la composición química apropiada en el trabajo de un lote.

Asimismo, indican que existen suposiciones en todo modelo matemático. Para el suyo, indican que existen siete supuestos:

- Todos los materiales de carga pueden ser utilizados o no al máximo de su disponibilidad. El porcentaje del material disponible para el trabajo en un lote determinado se denomina factor de utilización del material.
- Los materiales de carga se pierden durante el proceso de fundición, dado que una porción de los mismos se evapora o queda atrapada dentro de la escoria generada. Se asume este porcentaje conocido y se le denomina ratio de recuperación.
- Se asume que cada tipo de aleación tiene un cierto porcentaje que regresa como retorno, el cual se denomina ratio de chatarra. Estos retornos estarán disponibles para la operación de fundición luego de cierto tiempo, al cual se conoce como tiempo de retorno.
- Las chatarras internas de composición similar se almacenan juntas y se utiliza la composición química promedio de cada grupo para cada aleación.
- Si la demanda es menor que la capacidad del horno, entonces se permite la subutilización del mismo, es decir, que no se emplee al 100% de su capacidad.
- El programa de producción dentro del horizonte de planificación es conocido, por lo que se asume conocidos también las cantidades y tiempos necesarios para cada aleación.
- La cantidad de recursos disponibles es conocido a lo largo del horizonte de planificación, así como posibles ingresos y salidas durante el periodo analizado.

Bajo estos supuestos y las restricciones antes mencionadas, Kim y Lewis formulan el siguiente modelo de programación lineal (Kim y Lewis 1987:737-740):

Variables de decisión

$X_{i,j,k}$ = cantidad de materia prima comprada i utilizada para producir el lote j en el día k .

Unidad: toneladas.

i : índice de tipo de materia prima. $i=1, 2, \dots, L$ (L indica el número total de tipos de materias primas que se compran).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, M_k$ (M_k indica el número de lotes que serán producidos en el día k).

k : índice de día. $k=1, 2, \dots, N$ (N indica el total de días en el horizonte de planificación).

$Y_{l,j,k}$ = cantidad de chatarra comprada l utilizada para producir el lote j en el día k .

Unidad: toneladas.

l : índice de tipo de chatarra. $l=1, 2, \dots, O$ (O indica el número total de tipos de chatarra que se compran).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, M_k$.

k : índice de día. $k=1, 2, \dots, N$.

$Z_{m,j,k}$ = cantidad de chatarra interna m utilizada para producir el lote j en el día k .

Unidad: toneladas.

m : índice de tipo de chatarra interna que representa una composición química de cierto tipo de aleación. Por ejemplo, $Z_{1,j,k}$ representaría el retorno generado por una aleación tipo 1; $Z_{2,j,k}$ representaría el retorno generado por una aleación tipo 2, y así sucesivamente. $m=1, 2, \dots, T$ (T indica el número total de tipos de aleaciones que serán producidas en el horizonte de planificación).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, M_k$.

k : índice de día. $k=1, 2, \dots, N$.

Coeficientes de costo

CP_i = costo de comprar la materia prima i .

CS_l = costo de comprar la chatarra l .

CH_m = costo estimado de generar la chatarra interna m .

Todos los coeficientes están expresados en dólares por tonelada (\$/t).

Constantes del lado derecho

$M_{j,k}$ = cantidad demandada del lote j en el día k o capacidad para el lote j en el día k . Esto significa que si la demanda del lote j es menor que la capacidad del horno de fundición, $M_{j,k}$ representará la cantidad demandada; caso contrario, representaría la capacidad del horno de fundición, pues la carga total no puede exceder la capacidad del horno de fundición.

Unidad: toneladas.

$B_{i,k}$ = cantidad de materia prima comprada i disponible en el día k .

Unidad: toneladas.

$D_{l,k}$ = cantidad de chatarra comprada l disponible en el día k .

Unidad: toneladas.

$S_{m,k}$ = cantidad de chatarra interna proveniente del lote m disponible en el día k .

Unidad: toneladas.

$R^1_{h,j,k}$ = cantidad mínima requerida en porcentaje del componente químico h para producir el lote j en el día k .

$R^2_{h,j,k}$ = cantidad máxima requerida en porcentaje del componente químico h para producir el lote j en el día k .

h : índice de componentes químicos requeridos para el lote j . $h=1, 2, \dots, W$.

Parámetros misceláneos

R = parámetro de tiempo de retorno-número de días después de la colada en que los retornos podrán ser utilizados.

M_k = número de materiales de carga utilizados en el día k .

Coeficientes variables

$AP_{h,i}$ = cantidad en porcentaje del componente químico h que contiene la materia prima comprada i .

$AD_{h,l}$ = cantidad en porcentaje del componente químico h que contiene la chatarra comprada l .

$AS_{h,m}$ = cantidad en porcentaje del componente químico h que contiene la chatarra interna m .

$Scrap$ = porcentaje de cada tonelada fundida que retornará a la tienda de fundición como retorno para ser utilizada después como material de carga.

UP_i = porcentaje de utilización de la materia prima comprada i .

US_l = porcentaje de utilización de la chatarra comprada l .

$U_{h,m}$ = porcentaje de utilización de la chatarra interna m .

W_h = ratio de recuperación en porcentaje del elemento químico h .

Función objetivo

Una vez definidas las variables, Kim y Lewis proponen la siguiente función objetivo para minimizar el costo de la configuración de la carga de materiales.

Minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N \left(\begin{array}{l} \text{Costo de} \\ \text{comprar la} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de materia prima} \\ \text{comprada } i \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\ & + \sum_{l=1}^O \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N \left(\begin{array}{l} \text{Costo de} \\ \text{comprar la} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada } l \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\ & + \sum_{m=1}^T \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N \left(\begin{array}{l} \text{Costo estimado} \\ \text{de generar la} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna } m \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \end{aligned}$$

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N (CP_i)(X_{i,j,k}) + \sum_{l=1}^O \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N (CS_l)(Y_{l,j,k}) + \sum_{m=1}^T \sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k=1}^N (CH_m)(Z_{m,j,k})$$

Restricciones

Se presentan tres principales tipos de restricciones:

Restricciones de demanda y capacidad: indican que existe un límite superior para la capacidad física diaria en los hornos. Asimismo, si la demanda es mayor o igual a la capacidad diaria, entonces el horno deberá ser cargado a su capacidad máxima; por el contrario, si la demanda es menor a la capacidad del horno, se tomará como utilización del horno solo lo que la demanda requiera.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^L \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de materia prima} \\ \text{comprada i utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) + \sum_{l=1}^O \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada l utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) \\ & + \sum_{m=1}^T \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna m utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) \\ & = \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad demandada} \\ \text{del lote j en el día k} \end{array} \right) \text{ ó } \left(\begin{array}{l} \text{Capacidad para el} \\ \text{lote j en el día k} \end{array} \right) \end{aligned}$$

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\sum_{i=1}^L (X_{i,j,k}) + \sum_{l=1}^O (Y_{l,j,k}) + \sum_{m=1}^T (Z_{m,j,k}) = M_{j,k} \text{ para todo } j, k$$

Restricciones de disponibilidad de recursos: este grupo de restricciones está destinado a definir un límite superior al total de recursos disponibles diariamente, por cada tipo de material (materia prima comprada, chatarra comprada y chatarra interna). Asimismo, se deberá incluir el factor de utilización de cada tipo de material, y considerar el tiempo de recuperación de la chatarra interna.

Restricciones de disponibilidad de material para la materia prima comprada

$$\sum_{j=1}^{M_k} \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de materia prima} \\ \text{comprada i utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de materia} \\ \text{prima comprada i} \\ \text{disponible en el día k} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Porcentaje de} \\ \text{utilización de la} \\ \text{materia prima} \\ \text{comprada i} \end{array} \right)$$

Para todas las materias primas y días.

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\sum_{j=1}^{M_k} (X_{i,j,k}) \leq (B_{i,k})(UP_i) , \text{ para todo } i, k$$

Debe notarse que las llegadas programadas de nuevos envíos en cualquier día k dentro del horizonte de planificación se puede considerar añadiéndolo al lado derecho de la restricción.

Restricciones de disponibilidad de material para la chatarra comprada

$$\sum_{j=1}^{M_k} \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada l utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada l} \\ \text{disponible en el día k} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Porcentaje de} \\ \text{utilización de la} \\ \text{chatarra} \\ \text{comprada l} \end{array} \right)$$

Para todas las chatarras compradas y días.

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\sum_{j=1}^{M_k} (Y_{l,j,k}) \leq (D_{l,k})(US_l) , \text{ para todo } l, k$$

Al igual que las materias primas, las llegadas de nuevos envíos de chatarra comprada pueden agregarse también en la parte derecha de las restricciones a lo largo del horizonte de planificación, representando la política de compra de los recursos.

Restricciones de disponibilidad de material para la chatarra interna

La chatarra generada internamente estará disponible sólo después de un cierto periodo de tiempo, el cual varía dependiendo del tamaño de la colada, las condiciones de la tienda de fundición y el estilo de las operaciones de fundición. Generalmente, cuanto mayores sean las coladas, mayor será el tiempo necesario para que los retornos estén disponibles para futuras fundiciones. Nótese que diferentes tiempos de retorno pueden ser incluidos en el modelo especificando un tiempo diferente de retorno R para cada lote.

$$\sum_{j=1}^{M_k} \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna m utilizada para} \\ \text{producir el lote j en el día k} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna proveniente} \\ \text{del lote m disponible} \\ \text{en el día k} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Porcentaje de} \\ \text{utilización de la} \\ \text{chatarra} \\ \text{interna m} \end{array} \right)$$

Para todas las chatarras internas y días.

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\sum_{j=1}^{M_k} \sum_{k'=1}^N (Z_{m,j,k'}) \leq (S_{m,k'})(Uh_m), \text{ para todo } m, k'$$

Donde

$$S_{m,k'} = \sum_{p=1}^{k'-R} (M_{m,p}) (\text{Scrap}), \text{ para todo } k' > R$$

$$S_{m,k'} = 0, \text{ para todo } k' \leq R$$

Restricciones de balance químico: permite asegurar que se obtenga la composición química apropiada para todos los lotes producidos dentro del horizonte de planificación. Se tienen límites superiores e inferiores para cada elemento de la composición química deseada. Deberá considerarse el ratio de recuperación de cada componente.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^L \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la materia} \\ \text{prima comprada } i \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de materia prima} \\ \text{comprada } i \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\ & + \sum_{l=1}^o \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la chatarra} \\ \text{comprada } l \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada } l \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\ & + \sum_{l=1}^o \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la chatarra} \\ \text{interna } m \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna } m \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\ & \geq \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad mínima requerida} \\ \text{en porcentaje del componente} \\ \text{químico } h \text{ para producir} \\ \text{el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad demandada} \\ \text{del lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \end{aligned}$$

Para todos los componentes químicos, lote y días.

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^L (W_h) (AP_{h,i}) (X_{i,j,k}) + \sum_{l=1}^o (W_h) (AD_{h,l}) (Y_{l,j,k}) + \sum_{l=1}^o (W_h) (AS_{h,m}) (Z_{m,j,k}) \\ & \geq (R^1_{h,j,k}) (M_{j,k}), \text{ para todo } h, j, k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^L \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la materia} \\ \text{prima comprada } i \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de materia prima} \\ \text{comprada } i \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\
& + \sum_{l=1}^o \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la chatarra} \\ \text{comprada } l \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{comprada } l \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\
& + \sum_{m=1}^o \left(\begin{array}{c} \text{Ratio de recuperación} \\ \text{en porcentaje del} \\ \text{elemento químico } h \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad en porcentaje} \\ \text{del componente químico } h \\ \text{que contiene la chatarra} \\ \text{interna } m \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad de chatarra} \\ \text{interna } m \text{ utilizada para} \\ \text{producir el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \\
& \leq \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad máxima requerida} \\ \text{en porcentaje del componente} \\ \text{químico } h \text{ para producir} \\ \text{el lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad demandada} \\ \text{del lote } j \text{ en el día } k \end{array} \right)
\end{aligned}$$

Para todos los componentes químicos, lote y días.

Empleando la definición de variables anterior, se tiene:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^L (W_h) (AP_{h,i}) (X_{i,j,k}) + \sum_{l=1}^o (W_h) (AD_{h,l}) (Y_{l,j,k}) + \sum_{m=1}^o (W_h) (AS_{h,m}) (Z_{m,j,k}) \\
& \leq (R^2_{h,j,k}) (M_{j,k}), \text{ para todo } h, j, k
\end{aligned}$$

Tras la formulación del modelo, Kim y Lewis realizaron pruebas en una planta de fundición de acero local, donde compararon los resultados obtenidos del modelo propuesto y el software empleado por la empresa, el cual calculaba los costos lote por lote.

Los autores realizaron cuatro pruebas, cada una más compleja que la otra. En la Tabla 1.1 se aprecian las características de las tres primeras pruebas realizadas. La cuarta prueba se realizó para demostrar que el modelo podría resolver un problema de gran escala, a diferencia del programa empleado en la planta, que hubiera requerido ejecutarlo unas 240 veces.

Con base en a los resultados de las pruebas, Kim y Lewis resaltan tres ventajas importantes del modelo planteado:

- El modelo planteado puede resultar útil en la programación de largo plazo, ya que abarca una instalación completa de la fundición, que permitirá tomar decisiones en temas como políticas de inventarios y pedidos de materiales.
- Permite programar el uso de los retornos en producciones futuras, con lo cual podría ahorrarse en términos de compra de materias primas.
- Puede ser empleado para cultivar en los proveedores una filosofía de “justo a tiempo”, puesto que, si se conocen los recursos a ser empleados dentro del horizonte de planificación, y con exactitud qué días y en qué cantidades cada día, la empresa podría optar por pedidos de compra mejor planificados, en las cantidades justas, evitando así la posesión de grandes inventarios.

Tabla 1.1 Pruebas realizadas en la planta de fundición de acero

	Número de prueba		
	1	2	3
Días de planificación	1	20	10
Lotes trabajados por día	1	12	12
Tipos de materias primas compradas utilizadas	9	9	10
Tipos de chatarra compradas utilizadas	1	1	3
Número de variables	10	5,280	3,001
Número de restricciones	26	4,701	2,830
Costo obtenido con el software de la empresa (\$)	6,302	937,262	520,738
Costo obtenido con el modelo propuesto (\$)	6,301	816,002	424,033

Fuente: Kim y Lewis (1987) / Elaboración propia.

En términos económicos, los resultados mostraron que se lograban ahorros entre el 10% y 15%, e incluso mayores en pruebas más complejas, que involucraban mayores tiempos de planificación y mayor utilización de recursos (ver tabla 1).

1.2.2. Modelo de optimización de Sakalli y Birgoren

Sakalli y Birgoren (2009) aplicaron un modelo de programación lineal para lograr mejorar las operaciones de mezcla en una fábrica de latón a partir de cobre amarillo, ubicada en Turquía. Al igual que el modelo de Kim y Lewis, el objetivo era obtener la mezcla óptima de ingredientes para el proceso de fundición.

Los autores resaltan dentro de su trabajo la aparición de ciertos problemas relacionados con el uso e implementación de herramientas matemáticas en las industrias. Mencionan que no todos los administradores e ingenieros poseen experiencia en la formulación de modelos matemáticos que permitan aplicarlos a sus actividades dentro de la planta, y mucho menos interpretar los resultados obtenidos a través de dichas herramientas. A ello, suman la dificultad de que los encargados de las labores de fundición están a cargo de operarios, los cuales no cuentan con formación ingenieril de ningún tipo. Además, recalcan que a todo lo anterior se suma el hecho de que en la industria actual ya no se produce un solo tipo de aleación en una planta, sino que las empresas fabrican variedades y calidades distintas, lo cual vuelve más complejo el problema (2009:725).

Ante esto, Sakalli y Birgoren presentan el modelo en dos partes: uno enfocado al problema de mezcla simple, es decir, a una sola operación de fundición (el símil con el modelo de Kim y Lewis sería la producción por lote que mencionan en su trabajo); por otro lado, la segunda parte se enfoca en un problema multimezcla, que es la combinación de varios tipos de aleaciones, los cuales deben ser fabricados en un periodo de planificación determinado. La segunda parte del modelo tiene como objetivo determinar políticas de compra adecuadas de materiales, ya que conociendo los requerimientos se podrán programar los ingresos de materiales a futuro, evitando de ese modo realizar pedidos repetitivos del mismo material, cuando se podría efectuar uno de mayor volumen que anticipe los requerimientos de todo el periodo de planificación.

Adicionalmente, para combatir la problemática identificada en los administradores e ingenieros para poder interpretar directamente los resultados obtenidos mediante la programación lineal, proponen el uso de una interfaz en MS Excel, la cual se puede apreciar en la Ilustración 1.2. Esta fue diseñada como una hoja de cálculo simple que se interconecta vía VBA (Visual Basic para aplicaciones) con el software Lingo. Durante la etapa de diseño del proceso, los autores afirman haber contado con gran soporte de los ingenieros de la fábrica, a fin de definir de manera más precisa los coeficientes que serán ingresados en el modelo de programación lineal.

Esta interfaz contiene los coeficientes definidos en el modelo de programación lineal diseñado para esta situación; prácticamente, los usuarios no requieren de ningún conocimiento en programación lineal, ya que el modelo de mezcla se genera y es resuelto automáticamente sin que el usuario observe lo que sucede en el intermedio. Lo

único que se muestra al usuario son los resultados óptimos obtenidos por el modelo, los cuales se muestran en la interfaz.

Ilustración 1.2 Interfaz del usuario diseñada por Sakali y Birgoren

a) Interfaz de los datos de materiales, b) Interfaz de los tipos de fundiciones y sus especificaciones.

a

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	MATERIALS	On Hand Quantity (kg)	Minimum Quantity (kg)	Maximum Quantity (kg)	Optimal Quantity (kg)	Cost (YTL/kg)	% Cu	% Zn	% Pb	% Fe	% Sn	% Al	% Sb	% Ni
1	Unused Cu cable	0	0	0	0.000	2.700	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	Cu cable	20.000	0	20.000	0.000	1.900	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	Scrap Cu cable	0	0	0	0.000	0.830	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	Oxidize Phone Cable	0	0	0	0.000	2.700	99.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	Pure Zn	0	0	0	0.000	2.930	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	Pure Pb	10.000	0	10.000	37.172	1.450	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	Scrap brass material	0	0	0	0.000	1.100	60.000	37.380	2.000	0.200	0.350	0.000	0.020	0.050
8	Scrap Bronze	0	0	0	0.000	2.750	90.000	0.000	0.000	0.000	10.000	0.000	0.000	0.000
9	Bronze shavings	100.000	0	100.000	0.000	0.120	83.000	5.000	3.000	1.000	7.000	0.500	0.000	0.500
10	Reganya wedge	10.000	0	10.000	0.000	1.850	62.000	33.020	2.500	0.100	2.200	0.005	0.025	0.150
11	Reganya Soil	0	0	0	0.000	1.900	62.000	33.020	2.500	0.100	2.300	0.005	0.025	0.050
12	Scrap Cu	15.000	0	15.000	0.000	1.400	88.000	4.500	3.500	0.000	4.000	0.000	0.000	0.000
13	Scrap detanator	10.000	0	10.000	1.000.000	2.000	70.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	Steel barrets	0	0	0	0.000	2.100	70.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	Scrap Zn	0	0	0	0.000	0.400	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	Scrap Radiator	219.390	50	219.390	480.000	1.000	97.500	0.000	1.250	0.000	1.250	0.000	0.000	0.000
17	Yikanti	0	0	0	0.000	0.000	64.000	35.470	0.500	0.010	0.000	0.000	0.000	0.020
18	% 63 work in process	0	0	0	0.000	4.220	63.000	36.500	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	Ingot Zn	100.000	0	100.000	482.828	2.930	0.000	99.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	Brass-bronze scrap	0	0	0	0.000	2.750	67.000	20.000	1.500	1.000	8.000	1.000	0.500	1.000
21	Leaded detanator	30.000	0	30.000	0.000	2.100	70.000	27.000	2.000	0.050	0.950	0.000	0.000	0.000
22														

b

DIN 17660 1984			% of the Metals in Brass Alloy			
ELEMENT	Optimal % Value	% MIN	% MAX		CALCULATE	
Cu	58.40	57.2	58.4			
Sn	0.30	0	0.3			
Pb	2.40	1.5	2.4			
Fe	0.00	0	0.35			
Al	0.00	0	0.05			
Ni	0.00	0	0.37			
Zn	38.90	None	None			
Sb	0.00	0	0.03			

46	DIN 17660 1984	
47	<input type="radio"/> MS 56	<input type="radio"/> MS 60
48	<input checked="" type="radio"/> MS 58 CuZn40Pb2	<input type="radio"/> MS 63 CuZn37
49	<input type="radio"/> MS 58 CuZn39Pb3	<input type="radio"/> MS 63 CuZn36
50	<input type="radio"/> MS 58 CuZn39Pb2	<input type="radio"/> MS 67
51	<input type="radio"/> MS 60 Pb 1.5	<input type="radio"/> MS 70
52	<input type="radio"/> MS 60 Pb 0.5	<input type="radio"/> MS 72
53	<input type="radio"/> CuZn36	<input type="radio"/> MS 80
54	<input type="radio"/> MS 63 Pb 1.5	<input type="radio"/> MS 85
55	<input type="radio"/> MS 63 Pb 0.5	<input type="radio"/> MS 90
56		<input type="radio"/> MS 95
57		
58		
59		
60		
61		
62		
63		
64	ENTER TOTAL PRODUCTION QUANTITY	2,000
65		
66		
67	TOTAL COST (YTL)	3,949
68		

OPTIMAL PERCENTAGES

COMPONENTS

Fuente: Sakali y Birgoren (2009).

Para este sistema, se aplica el concepto de “caja negra”: el usuario sabe qué datos se ingresan (costos de materiales, composición, rendimiento de los materiales), sabe qué datos salen (cantidad de materiales a emplear) y sabe qué función cumple el programa (calcula la mezcla óptima de los materiales a emplear, al menor costo); sin embargo, no sabe lo que realmente sucede dentro del sistema, es decir, qué pasos se siguen dentro del modelo para obtener el resultado final (Sibille: 2013).

Sakali y Birgoren lograron implementar el modelo de mezcla simple y los probaron en la producción de una calidad de latón, para lo cual realizaron tres pruebas. Los resultados se observan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Resultados del modelo de mezcla simple de Sakali y Birgoren

	Specifications (DIN limits)		Specifications (tighter implementation)		Optimal % value	Test result 1	Test result 2	Test result 3
	Lower	Upper	Lower	Upper				
Cu	57	59	57	57.5	57.5	57.400	57.36	57.18
Sn	0	0.3	0	0.25	0.25	0.220	0.2	0.19
Pb	1.5	2.5	1.8	2.3	2.3	2.220	2.12	2.18
Fe	0	0.4	0	0.2	0.0419	0.040	0.24	0.22
Al	0	0.1	0	0.05	0.0187	0.030	0.03	0.02
Ni	0	0.4	0	0.37	0.0168	0.020	0.05	0.04
Zn	None	None	None	None	39.869	40.060	39.985	40.157
Sb	0	0.02	0	0.02	0.0037	0.010	0.015	0.013

Fuente: Sakali y Birgoren (2009).

Para la calidad de latón MS-58, realizaron tres pruebas distintas para tres coladas realizadas en distintos días. Los resultados que se verificaron fueron que las composiciones químicas de las tres coladas, cuya configuración de carga se realizó empleando el modelo propuesto por los autores, estuvieron dentro de los límites establecido por la norma DIN; inclusive, se emplearon límites superiores e inferiores mucho más ajustados para cada tipo de componente, y los resultados obtenidos estuvieron siempre dentro de las tolerancias establecidas.

Respecto al trabajo realizado y a los resultados de su modelo, los autores hacen mención de los siguientes puntos a tomar en cuenta:

- Si la cantidad y variedad de materias primas se mantienen en niveles adecuados, reflejados a través de una adecuada gestión de compras, cualquier tipo de latón podrá ser producido cuando la demanda lo requiera.
- Las composiciones de las materias primas no son siempre fijas, poseen cierta variación en sus componentes; por lo tanto, al momento de definir las propiedades de los materiales es conveniente trabajar con valores promedios.
- Las materias primas pueden ser o no utilizadas en su máximo porcentaje.
- Cierta cantidad de algunos ingredientes se pierden por evaporación o quedan atrapados en la escoria, durante el proceso de fundición. Estos ratios deberán considerarse al momento de diseñar el modelo de programación.

- La utilización (o también llamado rendimiento) de los materiales al interior de la mezcla dependerán de los equipos y tecnologías de producción aplicadas en la planta de fundición.

Se observa que los tres últimos puntos son comunes con los supuestos propuestos por Kim y Lewis, lo cual indica que es importante la consideración de dichos factores dentro la planificación de las operaciones.



CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

El presente capítulo tiene como objetivo presentar a la empresa que llamaremos Siderúrgica S.A., así como explicar el proceso productivo principal, el cual está compuesto por tres procesos principales: Reducción Directa, Acería y Laminación. De estos tres procesos, se describirá con mayor detalle las operaciones realizadas en la Acería, dado que el modelo que se propone permitirá programar sus operaciones en un periodo de tiempo determinado.

2.1. Descripción de la empresa

Siderúrgica S.A. es una empresa peruana dedicada a la producción y comercialización de acero. Fue fundada en 1964 en la ciudad de Arequipa e inició sus operaciones en 1966 produciendo y comercializando perfiles y barras lisas de acero para las industrias metal-mecánica, construcción y carpintería metálica. Por la alta calidad de sus productos, se convirtieron rápidamente en el principal abastecedor en todo el Perú. Actualmente, sus productos son comercializados en su mayoría en el territorio nacional, y en menor proporción en Bolivia, Brasil, Colombia y Norteamérica.

La empresa nace y se desarrolla creyendo y apostando por el Perú. Más de cuatro décadas después de creada, es hoy en día una empresa modelo, con capital y personal íntegramente peruano, comprometida con el país, que ha logrado introducir al Perú en el siglo XXI del acero, liderando un sector altamente competitivo, con la satisfacción de haber conseguido una fórmula calidad-precio-servicio acorde con los niveles más altos de exigencia del mercado internacional.

El desarrollo y crecimiento de la compañía están basados en una clara visión empresarial, valores, capital humano, innovación tecnológica, calidad total, preocupación por el cuidado del medio ambiente y aporte a la comunidad.

La contribución de la compañía va más allá de ser simplemente un productor local de acero, para convertirse en un importante representante de la actividad económica del país, que ha demostrado ser capaz de desarrollar una empresa que crece, agrega valor y desarrolla a todos sus vinculados: accionistas, personas, clientes, proveedores y comunidad.

2.2. Descripción del proceso principal

El acero nace de la fusión de diferentes cargas metálicas, con contenido de hierro, ferroaleaciones y carbono, las cuales determinan su estructura molecular. A continuación, se explicará el proceso de producción de Siderúrgica S.A., empresa peruana líder en la fabricación y comercialización de productos de acero en el Perú. En la Ilustración 2.1 se muestra una visión general del proceso de producción.

Las principales cargas metálicas con contenido de hierro utilizadas en la producción del acero son el hierro esponja y el acero reciclado fragmentado. Estas cargas metálicas luego se fusionarán con el carbono para producir el acero.

En su planta de reducción directa, Siderúrgica S.A. produce el hierro esponja, una de las cargas metálicas utilizadas en la producción del acero. Se le denomina hierro esponja porque al mineral de hierro se le extrae el oxígeno, convirtiéndose en un material sumamente liviano. La materia prima empleada para la producción del hierro esponja es el mineral de hierro, el cual llega en forma de pellets o como calibrado, y se almacena en silos junto con el carbón y la caliza.

El hierro esponja se produce en dos modernos hornos rotatorios que posee la empresa. Los pellets de mineral de hierro, junto con el carbón y la caliza, ingresan a los hornos rotatorios a una velocidad controlada. El interior de los hornos está cubierto de material refractario, debido a las altas temperaturas que debe soportar. Por efecto de la combustión, se produce monóxido de carbono, el cual favorece la reducción de los pellets de mineral de hierro; es decir, pierden oxígeno, obteniéndose así el hierro esponja. Para mantener la combustión, se dispone de ventiladores a lo largo de los hornos, los que brindan el aire necesario para la combustión del carbón.

El hierro esponja obtenido pasa luego al enfriador rotatorio, donde se le suministra externamente agua, mediante aspersores, para su refrigeración.

Otra carga metálica, con contenido de hierro utilizado en la producción del acero, es el acero reciclado fragmentado (chatarra). En el parque de metálicos, se almacena la chatarra de compra nacional e importada, según su carga residual y su densidad, las cuales son determinadas por una junta calificadora. La compra de acero en desuso, viene generando un importante mercado de trabajo en nuestro país y contribuye además al cuidado del medio ambiente.

El acero reciclado pasa por un proceso de corte y triturado en la planta fragmentadora de la empresa. Al interior de la máquina fragmentadora, poderosos martillos reducen el acero reciclado a un tamaño apropiado. Luego, a través de una faja transportadora, la chatarra fragmentada pasa por una serie de rodillos magnéticos que seleccionan todo el material metálico; los materiales que no lo son, se desvían por otro conducto para su almacenamiento o disposición final. Al final, la chatarra fragmentada se almacena en la bahía de consumo, la cual es un área designada donde se apila la chatarra, se separa por calidades, y esta espera a ser utilizada. Asimismo, ciertos tipos de chatarra no necesitan ser fragmentados, ya que por sus dimensiones y características son directamente almacenados en la bahía de consumo.

En la zona de carga, se mezclan ambas cargas metálicas con contenido de hierro: el hierro esponja y la chatarra fragmentada. El hierro esponja se deposita en una cesta y se le añade la chatarra fragmentada. Además, se agregan el carbón y la cal; esta última permitirá eliminar las impurezas generadas durante la fundición de los materiales. Esta mezcla se lleva a la planta de acería, para iniciar el proceso de fusión y obtener así el acero líquido.

En la planta de acería, se encuentra el horno eléctrico. Cuando la mezcla de hierro esponja, chatarra y carbono ingresa al horno, la puerta principal del horno es cubierta con una masa selladora, lo cual evita el ingreso excesivo de aire y permite mantener mejor el calor. En el interior del horno eléctrico, la principal energía usada para fundir la carga es la energía eléctrica, producida por tres electrodos, que generan temperaturas por encima de los 3000° a 5000°. También se produce energía química producto de la oxidación. La mezcla se funde aproximadamente a 1600° C, obteniéndose así el acero líquido.

Luego de 40 minutos de combustión, el acero líquido pasa al horno cuchara, donde otros tres electrodos realizan el afino, que consiste en ajustar la composición química del acero, de acuerdo a las características de la aleación que se esté fabricando, mediante la adición de ferroaleaciones a través de distribuidores ubicados en la parte superior del horno cuchara.

Luego, a través de la buza, un orificio ubicado en la parte inferior del horno cuchara, el acero pasa a la colada continua. Se inicia vertiendo el acero líquido de la cuchara al tundish o distribuidor, que permite reducir la turbulencia del flujo y lleva el acero líquido

por cuatro líneas de colada o moldes oscilatorios, en donde se le da una refrigeración primaria, para solidificarla superficialmente. Luego, mediante sprays y toberas, se realiza la refrigeración secundaria. Esta barra solidificada es cortada y se obtiene así la palanquilla, la cual representa el producto final de la acería y la materia prima para el siguiente proceso de laminación.

Todo este proceso es muy importante, porque de ello depende la calidad del acero y del producto final. La modernización del horno, el proceso a puertas cerradas y el uso de metálicos y residuos, le ha permitido a la empresa incrementar la productividad de la planta de acería. Para asegurar la calidad de los productos fabricados, la empresa cuenta con estrictos controles de calidad en todo el proceso de producción. Actualmente, la empresa ha adecuado su sistema de calidad a las nuevas exigencias de la norma ISO 9001:2000.

La última parte del proceso de fabricación del acero es la laminación en caliente, donde las palanquillas se transforman en los diferentes productos de acero largos, que el mercado nacional e internacional exige.

La laminación empieza con el calentamiento de las palanquillas en el horno recalentador, a una temperatura de trabajo, que varía entre los 1100°C y los 1200°C. De ahí, las palanquillas pasan al tren de laminación, donde se inicia el estiramiento de la palanquilla, a través de cajas de desbaste y rodillos, formando así las barras y perfiles, según el tipo de rodillo acabador que se haya colocado y de acuerdo al largo que se desee obtener. El producto pasa a la mesa de enfriamiento, donde se corta y empaqueta. Si se desea obtener alambión, el acero laminado se transfiere caliente al tren de alambión, donde se produce en diferentes diámetros y luego pasa al bobinador que forma los rollos.

Finalizado el proceso de laminación, todos los productos de Siderúrgica S.A. pasan por un estricto control de calidad para luego ser entregados al mercado debidamente empaquetados y etiquetados, con un código de barras que permiten conocer sus características que evita así errores en la entrega y asegurando el total control de la calidad del producto.

2.3. Programación de la producción

El área de Acería se encarga de fabricar las palanquillas, principal materia prima de los procesos de laminación. Para la programación de la producción en la Acería, se recibe

como entrada principal el programa de producción de las plantas de laminación con las que cuenta la empresa. A partir de estos programas y sus requerimientos, el programador tiene la función de elaborar los cronogramas de trabajo del área de Acería, elaborando programas mensuales, semanales y hasta diarios, en los cuales se indican las cantidades y calidades de acero líquido a producir en cada jornada.

El proceso comienza mediante la recepción del programa de producción del área de Laminación. En este se indican los productos que serán fabricadas durante un periodo correspondiente (se emplean programas mensuales). Cada producto está asociado a una calidad determinada de acero, para lo cual el área de Acería deberá fabricar palanquillas de dicha calidad. A manera de resumen, se muestran los datos más relevantes que aporta el programa de laminación:

- Producto
- Cantidad de producto
- Fecha de inicio de fabricación del producto
- Calidad de acero asociada
- Peso estándar de la palanquilla: peso de cada palanquilla de 14 m de largo, con un perfil de 130x130 mm².

Con estos datos, se determina las calidades y cantidades de acero líquido que deberán fabricarse durante el período definido en el programa de laminación. Sin embargo, como en todo proceso, existen mermas que afectan el rendimiento de los procesos. Se ha estimado que el rendimiento de la planta de laminación es alrededor del 90%, por lo cual se emplea un factor de seguridad que permita calcular qué cantidad de acero líquido deberá fabricarse en la Acería, de modo que el proceso de laminación pueda cumplir con los objetivos de su programa.

Previo a la elaboración del programa de Acería, se verifican los stocks disponibles de cada una de las calidades de acero requeridas por el área de laminación. De acuerdo a los stocks, se determinan qué tipo de aceros deberán producirse con mayor prioridad, de modo que se cumpla el requerimiento de la planta laminadora.

Una vez verificado los stocks, los responsables de las áreas involucradas, PCP y Acería, se reúnen para actualizar los ratios de ritmo de producción de cada una de las calidades de acero requeridas por el área de Laminación. El ritmo de producción se refiere a la velocidad de fabricación de cada calidad de acero, y se expresa en toneladas de acero

líquido por hora. Asimismo, se actualizan los ratios de consumo de materiales, los cuales se expresan en tonelada requeridos de cierto material por tonelada de cierta calidad de acero.

Luego de recabada esta información, se da inicio a la elaboración del programa de producción del área de Acería. Para ello, se emplean ciertos criterios que permiten seguir una secuencia de pasos ordenados para determinar qué calidades de acero deberán fabricarse en un determinado día:

- En primer lugar, se identifican en el programa de Laminación aquellos productos cuyas calidades asociadas sean especiales. Se denominan calidades especiales de acero a aquellas cuyos requerimientos de composición química y especificaciones técnicas son más exigentes que las calidades normales. Además, se diferencian de estas últimas debido a que reciben tratamientos especiales luego de su fabricación en la Acería.
- Asimismo, debido a políticas definidas por el área de Acería, las calidades especiales solo se fabrican en ciertos días de la semana, por lo que se contempla también que la fabricación de una calidad especial se realice en uno de los días dispuestos por el área de Acería.
- Luego de identificar las calidades especiales, se tienen las calidades normales, las cuales son destinadas a la fabricación de barras de construcción y/o perfiles. Estas calidades se incluyen dentro del programa de producción indistintamente, pero siempre que se respeten las fechas de inicio de fabricación propuestas por el área de Laminación.
- Por último, se consideran las calidades denominadas “de mezcla”. Estas calidades son aquellas que se usan para realizar la transición en la fabricación de una calidad de palanquilla a otra. El objetivo es que esta transición entre las calidades no sea tan brusca, en términos de calidad y composición química. Las calidades de mezcla poseen características similares en su composición química tanto de las calidades fabricadas antes como después de las mismas.

Una consideración importante que no se mencionó anteriormente, es la disponibilidad de recursos del área de Acería, en particular, el tiempo disponible para la fabricación de palanquillas. A la vez que se va elaborando el programa de producción, deben considerarse los ritmos de producción acordados anteriormente con el área de Acería, a fin de determinar el tiempo que tomará producir cierta cantidad de toneladas de acero

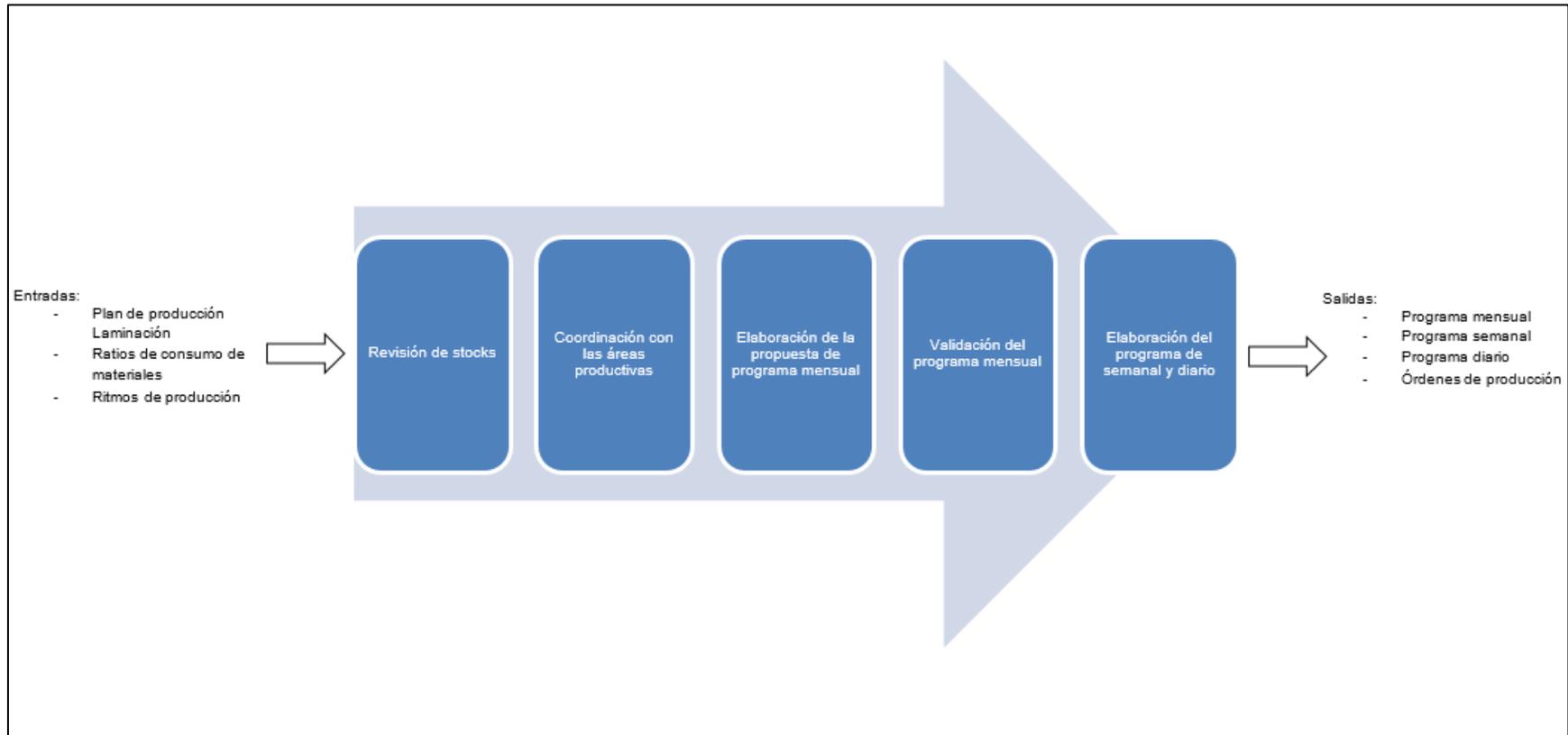
líquido. Asimismo, se consideran las paradas programadas entre la fabricación de diferentes calidades, debido a la limpieza de los hornos de fundición o mantenimiento preventivo que se realiza cada cierto tiempo de funcionamiento de los hornos.

Para el cálculo del tiempo de fabricación disponible diario, se toma como base las 24 horas disponibles del día de producción (la producción es continua), se restan los tiempos considerados por las paradas programadas y se obtiene como resultado el tiempo neto disponible para la fabricación. Respecto a ese tiempo neto disponible, se programan en un determinado día la fabricación de determinadas calidades de palanquilla y las cantidades a producir de cada una. Si ocurriese el caso que el requerimiento de cierta calidad de palanquilla sea muy grande, entonces la fabricación se divide, programando producciones parciales en días distintos, siempre que se cumpla con las fechas indicadas en el programa de Laminación. Así también, se presentan casos donde el tiempo disponible diario no es aprovechado en su totalidad; en estos casos, el saldo de tiempo disponible es prorrateado entre las coladas programadas para dicho día, permitiendo una mayor holgura en el tiempo de fabricación de cada colada.

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, se elabora una primera propuesta del programa de producción mensual de Acería. Este programa es remitido a los encargados de la producción el área de Acería, quienes deberán aprobar dicho programa o presentar las observaciones y/o modificaciones que crean convenientes. En algunas ocasiones las modificaciones implican el no cumplimiento de las fechas establecidas en el programa original definido por Laminación, para lo cual ambas partes deben acordar realizar modificaciones en ambos programas que permitan a ambas áreas cumplir con los requerimientos solicitados.

Una vez aprobado el programa mensual, este será empleado para la elaboración de los programas de producción semanales y diarios. En estos programas se detallan con mayor precisión la secuencia de producción de cada calidad de acero, así como la hora de inicio y fin de fabricación de cada una. Asimismo, se visualizan los tiempos establecidos para mantenimiento y limpieza de los equipos, los cuales conforman las denominadas paradas programadas. Para una visión global del proceso de planificación de Acería, la Ilustración 2.2 presenta el mapa del macro proceso que describe la programación de la producción.

Ilustración 2.2 Diagrama de macro proceso: programación de la producción



Fuente: Siderúrgica S.A / Elaboración propia.

Luego de establecer la programación de las operaciones, la fabricación de cada una de las calidades deberá traducirse en órdenes de producción en el sistema ERP que maneja la empresa. Para ello, el área de Programación y Control de la Producción se encarga de crear dichas órdenes de producción en el sistema ERP. En dichas órdenes, se incluyen los ratios de consumo de materiales necesarios para producir una determinada calidad de palanquilla, de acuerdo al mix de carga proporcionado por el área de Acería. Cabe decir que estos ratios de consumo incluidos dentro de las órdenes de producción serán actualizados posteriormente por el área de Acería, una vez que se tenga el resultado de los consumos reales; de ese modo, estos datos reales servirán para recalcular los ratios de consumo que se emplearán para la programación del siguiente período de planificación.

2.4. Elaboración de la mezcla y carga de materiales

La determinación de la mezcla de materiales o mix de carga está a cargo del departamento de Metálicos, parte del área de Acería de la empresa Siderúrgica S.A. El mix de carga metálica es la combinación de los materiales necesarios para producir cierta calidad de acero líquido que será fabricado en la Acería, determinando las cantidades y proporciones de cada material empleado en la producción de una colada de cierta calidad, de modo que permitan cumplir con los requerimientos de composición química de la calidad de acero que se fabrica.

Para establecer el mix de carga metálica de las calidades de acero, aquellas calidades que son afines y que presentan composiciones químicas similares, son agrupadas en clases. Cada clase tiene establecido un mix de carga estándar, el cual se emplea para producir cualquiera de las calidades que pertenecen a la misma clase. Posteriormente, durante el proceso de afino que se realiza en el horno cuchara, mediante la adición de ferroaleaciones se otorgarán las características propias que diferencian a cada una de las calidades pertenecientes a una misma clase.

Sin embargo, el mix estándar definido para cada clase de acero sufre variaciones cada mes, debido a que los encargados de elaborar el mix de carga mensual para cada una de las clases de acero toman en consideración tres criterios, los cuales se listan a continuación:

- Especificaciones del producto (composición química)
- Stock disponible de materiales

- Costos de los materiales

Tomando en consideración los criterios antes mencionados, los encargados de elaborar el mix verifican la disponibilidad de los materiales requeridos para cumplir con el estándar; así también, buscan configurar la mezcla de materiales al menor costo posible, combinando diferentes tipos de chatarra que hay disponible en ese momento en el parque de metálicos. Sin embargo, no siempre se dispone del mismo tipo de chatarra en el parque, puesto que ésta depende del precio y la disponibilidad de la misma en el mercado.

Tras revisar y configurar la mezcla de materiales, esta se remite al área de PCP, quien las incluirá dentro de la explosión de materiales de cada calidad de acero al momento de crear las órdenes de producción en el sistema ERP.

Es importante mencionar también que dentro de la elaboración del mix de carga metálica se establece el orden de carga de cada uno de los materiales dentro de las cestas de carga, ya que una adecuada selección de la ubicación de cada uno de los materiales dentro de la cesta, permitirá mejorar la eficiencia del posterior proceso de fundición en el horno eléctrico. Asimismo, se determinan cuántas cestas de cargas serán necesarias para la elaboración de una colada. Se estima que de cada colada se obtienen alrededor de 60 toneladas de acero líquido, mientras que las cestas de cargas tienen una capacidad máxima de 35 toneladas de material, por lo cual generalmente se emplean dos cestas de carga para la producción de una colada¹.

Para la carga de los materiales y su posterior traslado hacia el proceso de fundición en el horno eléctrico, se emplean las cestas de carga, las cuales son trasladadas mediante un sistema de rieles hasta una zona contigua a la bahía de consumo, donde se encuentran las diferentes calidades de chatarra en espera de ser cargadas. Los materiales como el carbón, mineral de hierro y las cales son trasladadas desde las zonas de almacenamiento y ubicadas en una zona cercana a las cestas de carga.

¹ Los casos en los que se acostumbra emplear solo una cesta de carga se da en la fabricación de calidades de mezcla o de limpieza, donde la demanda de una colada por lo general es menor a 10 toneladas.

Posteriormente, se emplea una grúa puente para cargar los materiales dentro de la cesta, según el orden de carga establecido.

Por lo general, en la primera de las cestas que se traslada hacia el horno de fundición se carga los materiales como el carbón, la cal y el mineral de hierro, y el resto de la capacidad con chatarra de baja densidad, mientras que en la segunda cesta se carga principalmente con chatarra pesada.

Esta distribución se realiza para reducir el tiempo de fusión y energía, ya que, por conducción, cuanto mayor sea la cantidad de acero líquido en el horno, menor tiempo tardará la chatarra en fundirse.

Hay que tener en cuenta que un horno de arco eléctrico suele tener un volumen de unos 40 m³. En un primer momento durante la carga de la primera cesta tenemos chatarra (baja densidad) en el horno que ocupa mucho volumen. Durante la carga de la segunda cesta, tenemos parte de acero líquido dentro del horno de la fusión de la primera con una densidad de 7,8 kg/m³, y parte de la chatarra que se introduce (0,8-3 kg/m³), por lo que la carga a introducir tiene que ser menor en volumen.

Para llevar un control dentro de la operación de fundición, se emplean ciertos indicadores. Para definir la productividad por colada dentro del horno se utilizan dos parámetros:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Acero líquido}}{\text{Chatarra cargada}}$$

$$\text{Merma (\%)} = \frac{\text{Chatarra cargada} - \text{Acero líquido}}{\text{Acero líquido}}$$

El indicador de rendimiento determina la cantidad de chatarra que se aprovecha en el horno y el indicador de merma determina la cantidad perdida en cada colada. Se utiliza en ambas fórmulas a la chatarra como representación de todos los materiales cargados al interior del horno de fundición. Esto debido a que la chatarra compone en peso alrededor del 95% del peso total de la carga de materiales; además, es la chatarra el material que mayores impurezas contiene y que determina en gran medida el rendimiento de las coladas al interior del horno.

Estos valores de rendimiento y merma dependen de:

- La calidad de la chatarra, ya que en función del porcentaje de pureza de la misma (si incluye plásticos, tejidos, maderas, tierra, etc.) pueden existir mayores o menores mermas.
- De la oxidación, ya que las sobreoxidaciones dan lugar al aumento de óxidos, que van a parar a la escoria elevando la merma.
- De una baja energía eléctrica o una deficiente oxidación, ya que pueden permanecer infundidos en el horno al finalizar la colada.

2.5. Diagnóstico de la situación actual

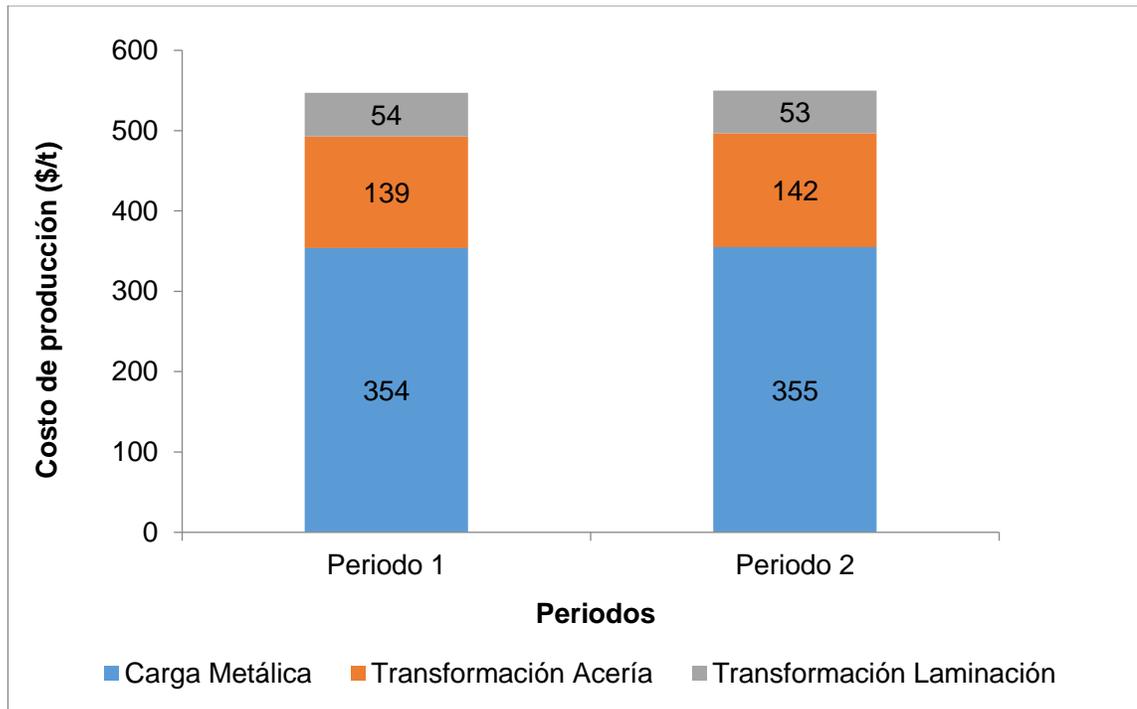
Como parte del planeamiento estratégico, la compañía ha definido cuatro prioridades, sobre las cuales se establecen las estrategias, objetivos, indicadores e iniciativas de mejora de la compañía. Estas prioridades se listan a continuación:

1. Fortalecer el capital humano y la organización
2. Incrementar la participación de mercado
3. Reducir costos y gastos
4. Maximizar el retorno sobre el capital invertido

En los últimos años, se ha puesto especial énfasis en la tercera prioridad, la reducción de costos y gastos. Se ha impulsado el desarrollo de iniciativas de mejora como círculos de calidad y equipos de alto desempeño, así como también se ha fomentado la participación y consulta de los colaboradores a través de un programa de sugerencias donde se premian aquellas iniciativas que al implementarse generan mayores ahorros.

Alineado con esta prioridad, es importante analizar cómo se compone el costo de fabricación de la compañía. En el Gráfico 2.1 se puede observar cómo se distribuyen los costos de producción de la barra de construcción, principal producto que fabrica la compañía, para dos periodos consecutivos. La carga metálica, conformada en su mayoría por chatarra ferrosa, representa aproximadamente el 65% del costo total de producción de la compañía, por lo que potenciales mejoras sobre los procesos que involucren el uso de estos materiales y su rendimiento dentro del proceso supondrán un impacto importante sobre los costos de fabricación. En segundo lugar, está el costo de transformación de acería, que incluye el proceso de fundición y colada continua hasta que la carga metálica se transforma en palanquillas. Por último, se encuentra el costo de transformación de la laminadora, donde las palanquillas son transformadas en producto terminado.

Gráfico 2.1 Composición del costo de producción de la barra de construcción



Fuente: Siderúrgica S.A / Elaboración propia.

Tras analizar la composición del costo de fabricación, se ha optado por enfocarse en el mayor de estos componentes: el mix de carga metálica. Como se aprecia en el Gráfico 2.1, se evidencia un incremento en el costo del mix de carga metálica, por lo que el objetivo planteado es determinar alguna solución que permita disminuir el costo de este mix.

Como ya se explicó en el punto 2.2 del presente capítulo, el mix de carga metálica está compuesto principalmente por dos componentes, el hierro esponja y el acero reciclado. En el caso del primero, es fabricado en la planta de la compañía, mientras que el segundo se obtiene en el mercado nacional y extranjero.

Para la fabricación del hierro esponja, la materia prima principal son los pellets de mineral de hierro, el cual se adquiere a nivel local de un proveedor único, con el cual se pactan acuerdos trimestrales en función de la variación de los precios en el mercado internacional.

En el caso de la chatarra de compra, los precios locales también responden al comportamiento de los precios internacionales. Siderúrgica S.A. logra captar

aproximadamente el 70% de la chatarra nacional disponible en el mercado, mientras que el otro 30% lo capta su principal competidor y algunas fundiciones más pequeñas. Sin embargo, a pesar de contar con la participación mayoritaria del mercado nacional, esta resulta insuficiente para satisfacer la demanda de la compañía, por lo cual se requiere importar el faltante de países como Estados Unidos, Brasil, Bolivia y Chile, siendo estos productos mucho más costosos.

Además de los costos de estos materiales, para obtener el costo de mix de carga se cargan los costos de los procesos de habilitación, industrialización y manipuleo de estos materiales, además de costos administrativos y otros costos indirectos del proceso.

2.5.1. Análisis de causas

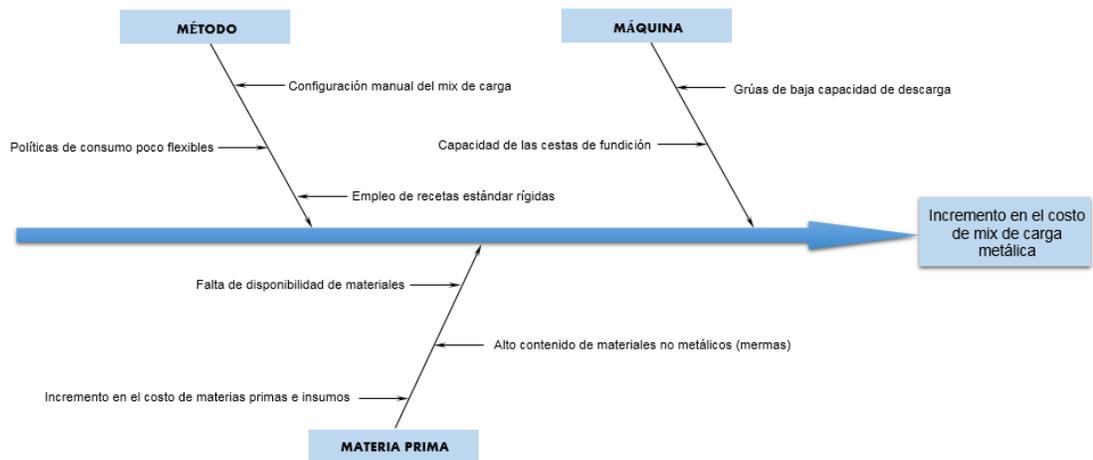
A fin de plantear alternativas de solución que permitan reducir el costo del mix de carga, es necesario conocer las causas del incremento de los costos. En la Ilustración 2.3 se representan mediante un diagrama de Ishikawa las posibles causas de un incremento en el costo de configuración del mix de carga metálica.

En relación al equipo y maquinaria, se han identificado dos causas que incrementan el costo del mix de carga. Por un lado, la compañía posee grúas para la descarga de chatarra local e importada de poca capacidad, limitándose a piezas de máximo una tonelada de peso. Esto retrasa las operaciones de descarga lo cual deriva en mayores costos de manipulación. Asimismo, restringe en cierta manera la capacidad de captación de chatarra, ya que por la misma naturaleza de la materia prima esta se encuentra en diversas formas y tamaños; para los casos donde llegan piezas sobredimensionadas se requiere contratar una grúa de mayor capacidad, lo que incrementa también los costos de manipulación de estos materiales. Por otro lado, la capacidad de las cestas empleadas para la carga de materiales al horno de fundición también impacta en el costo de manipuleo, al tener que emplear más de una cesta para llenar el horno de fundición.

Luego, con relación al método empleado para configurar el mix de carga metálica, como se explicó en el punto 2.4 del presente capítulo, se tienen recetas estándar para la fabricación de las diversas calidades de chatarra. Estas recetas fueron elaboradas por un trabajador de la compañía en base a su experiencia y con el pasar de los años se han realizado ajustes, siempre basados en la experiencia de los usuarios. Sumado a esto, el área de planificación de operaciones ha establecido políticas de consumo e inventario en función de información histórica y proyecciones de los tipos de chatarra

que consume la compañía, a pesar que es difícil pronosticar los tipos (calidades) de materiales que se captarán a futuro, ya que en el mercado de chatarra se busca captar por volumen más que por calidad. Sumado a esto, la configuración del mix se realiza manualmente en archivos de hojas de cálculo, tomando como premisa las recetas y políticas de inventario. No existe una herramienta automatizada que permita actualizar la configuración del mix según la disponibilidad de materiales en un momento determinado.

Ilustración 2.3 Análisis de causas de problemática analizada



Fuente: Elaboración propia.

Por último, en los últimos meses se ha evidenciado una tendencia al alza en los precios internacionales de las materias primas. La chatarra, principal materia prima de la compañía, tiene el comportamiento de un *commoditie*, por lo que la variabilidad de los precios en el mercado dependerá de muchos factores externos que no necesariamente pueden ser controlados o mitigados. Como se explicó anteriormente, al ser un bien escaso en el mercado nacional, la compañía se ve en la necesidad de importar este material a un mayor costo y en función de los precios del momento. Por otro lado, la chatarra es un material que contiene ciertas impurezas o materiales no metálicos que no son adecuados para el proceso de producción de la compañía, los cuales se ha estimado que pueden llegar a niveles entre 7% y 9%, significando mermas al proceso y pérdidas de rendimiento, lo cual se traduce en un mayor costo de materiales.

2.5.2. Propuestas de Solución

Una vez identificadas las principales causas del incremento del costo del mix de carga metálica, se han propuesto 3 soluciones para atacar estos problemas, los cuales se listan a continuación:

- Buscar nuevas fuentes de abastecimiento de materias primas e insumos a nivel nacional e internacional
- Implementación de una herramienta o aplicación para determinar la mezcla óptima de materiales que conforman el mix
- Renovación de maquinaria y ampliación de la capacidad de cestas de carga

Propuestas las soluciones, estas son evaluadas empleando la matriz FACTIS. Para ello, en la Tabla 2.1 se pueden apreciar los criterios de evaluación para cada uno de los factores de la matriz, los cuales han sido definidos por parte de la empresa Siderúrgica S.A como parte de su metodología de mejora de procesos. Asimismo, se muestran los pesos relativos a considerar por cada factor de evaluación.

Tabla 2.1 Factores y criterios de evaluación de la matriz FACTIS

Factores de evaluación		Puntajes			Peso
		1	3	5	
F	Facilidad para solucionarlo	Muy difícil	Difícil	Fácil	23%
A	Afecta a otras áreas de la organización	Si	Algo	Nada	10%
C	Mejora de la calidad	Poco	Medio	Alto	14%
T	Tiempo que implica la implementación	Largo plazo	Mediano Plazo	Corto Plazo	23%
I	Inversión requerida	Alta	Media	Baja	23%
S	Mejora la seguridad industrial	Poco	Media	Alto	6%

Fuente: Siderúrgica S.A. / Elaboración propia.

Luego de evaluar las alternativas de solución propuestas, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.2. De esta manera, determinamos que la mejora alternativa es la de implementar una herramienta o aplicación para la determinación de la mezcla óptima de materiales.

Tabla 2.2 Evaluación de propuestas de solución

	F	A	C	T	I	S	
Propuesta Solución	23%	10%	14%	23%	23%	6%	Puntaje
Nuevas fuentes de abastecimiento	1	5	5	3	3	1	2.91
Herramienta para configuración de carga	3	3	5	5	5	1	4.11
Renovación de maquinaria y aumento de capacidad	1	1	5	1	1	5	1.80

Fuente: Siderúrgica S.A. / Elaboración propia.

2.5.3. Problemática identificada

A continuación, y tomando como enfoque principal la función de programación de operaciones, elaboración de mix de materiales y carga de los mismos, se espera que la implementación de la herramienta propuesta pueda atacar los siguientes problemas identificados en la planificación de la producción:

- En la elaboración del programa mensual de Acería, se ha identificado que al momento de establecer qué calidades de acero y qué cantidades de las mismas serán fabricadas en un determinado día, no se aprovecha todo el tiempo disponible diario, sino que se prorratea el tiempo en exceso sobre las calidades que serán fabricadas. Si bien esto otorga una mayor holgura para la fabricación en cada día, podemos atribuir esta deficiencia en la programación al no emplear una herramienta que permita identificar la mejor combinación de productos que deberían fabricarse dentro del mismo día, sino que se deja en manos del programador, quien trabaja con base en su experiencia y los requerimientos del programa de laminación.
- La determinación del mix de carga metálica se elabora según la experiencia del personal de la Acería. No se emplea ningún software ni herramienta matemática que permita determinar la mezcla óptima de materiales a emplear para cada calidad de chatarra. Lo que se maneja actualmente es una hoja de cálculo en MS

Excel, donde el encargado de elaborar el mix indica el porcentaje de cada tipo de chatarra que deberá emplearse para la elaboración de determinada clase de aceros, tomando como referencia el mix estándar de cada clase y con base en los tres criterios mencionados para determinar el mix de carga en cada periodo de planificación (especificaciones, stocks y costo).

- La selección de las distintas calidades de chatarra para la configuración del mix de carga representa un factor clave. Se estima que una disminución de un 1 % en el rendimiento de la chatarra causa un incremento de demanda de energía de 10 kWh/Tm de acero líquido. Dicha energía se emplea normalmente en la fusión de componentes no ferrosos presentes en la chatarra. Compuestos no ferrosos como aceites, plásticos o madera suponen un aporte de energía al producir reacciones exotérmicas. Compuestos como el Fe_3O_4 (óxido con alto punto de fusión) incrementan el gasto energético en 13kWh/Tm de acero líquido por cada 1% en peso de este óxido presente en la chatarra. La presencia de agua incrementa la demanda de energía en 6 kWh/Tm de acero líquido por cada 1 % en peso de agua cargada con la chatarra, por lo que el clima influirá en el consumo energético.
- Asimismo, la forma y dimensiones de la chatarra que se introduce al horno afecta al tiempo de fusión y, en consecuencia, al consumo energético al interior del horno eléctrico. Se considera una longitud óptima aquella que se encuentre entre 100 y 1000 mm, con una densidad entre 0,6 y 0,9 Tm/m³.
- La disposición de la chatarra en las cestas y por tanto en el horno afecta a la relación entre la fusión por radiación y la fusión por convección en el baño, aunque también depende la distribución de la altura desde la que se vacían las cestas. En ese sentido, debe colocarse abajo la chatarra más pesada y arriba la más ligera para minimizar el consumo de energía ya que puede provocar variaciones de hasta 20kWh/Tm de acero líquido.
- Un mayor tiempo de colada implica indiscutiblemente un mayor consumo de energía por lo que debe intentar minimizarse en la medida de lo posible el tiempo de calentamiento, y principalmente los retrasos. Debido a que la eficiencia térmica es mayor durante la fusión que durante el calentamiento, un retraso durante la segunda fase supone aproximadamente 0,4 kWh/t por minuto y mientras que durante el calentamiento supone 1,7 kWh/t por minuto. Una

selección adecuada de los materiales que conformarán el mix de carga ayudará a reducir el tiempo de fusión en el horno eléctrico.

Como se puede apreciar en los aspectos antes mencionados, el principal impacto que tiene una adecuada selección de materiales como parte de la configuración del mix de carga será un ahorro significativo en el consumo materiales y mejora del rendimiento de las coladas, así como una reducción del consumo de energía eléctrica al interior del horno de fundición. Además, al emplear materiales de carga cuyas composiciones químicas contengan los principales componentes de las calidades que serán fabricadas, podría suponer un menor empleo de ferroaleaciones en el proceso de afino en el horno cuchara, al ser menores las desviaciones respecto a la composición requerida para cada calidad.



CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

Este capítulo presentará el diseño de un modelo de programación lineal entera mixta que permitirá obtener el mix de carga metálica de menor costo posible, con el objetivo de reducir los costos de fabricación actuales del área de Acería. Para el mismo, tomaremos como base el modelo planteado por Kim y Lewis (1987), y se realizarán las modificaciones pertinentes que permitan ajustar el modelo a las exigencias del proceso analizado.

3.1. Variables de decisión y parámetros

Variables de decisión

$X1_{a,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente a (tipo 1) utilizadas para producir un lote del producto j .

a : índice del ingrediente tipo 1. $a=1, 2, \dots, A$ (A indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de producto. $j=1, 2, \dots, J$ (J indica el número de productos que serán producidos en el horizonte de planificación).

$X2_{b,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente b (tipo 2) utilizadas para producir un lote del producto j .

b : índice del ingrediente tipo 2. $b=1, 2, \dots, B$ (B indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, J$.

$X3_{c,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente c (tipo 3) utilizadas para producir un lote del producto j .

c : índice del ingrediente tipo 3. $c=1, 2, \dots, C$ (C indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, J$.

$X_{4,d,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente d (tipo 4) utilizadas para producir un lote del producto j .

d : índice del ingrediente tipo 4. $d = 1, 2, \dots, D$ (D indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j = 1, 2, \dots, J$.

$X_{5,e,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente e (tipo 5) utilizadas para producir un lote del producto j .

e : índice del ingrediente tipo 5. $e = 1, 2, \dots, E$ (E indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j = 1, 2, \dots, J$.

$X_{6,f,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente f (tipo 6) utilizadas para producir un lote del producto j .

f : índice del ingrediente tipo 6. $f = 1, 2, \dots, F$ (F indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j = 1, 2, \dots, J$.

$X_{7,g,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente g (tipo 7) utilizadas para producir un lote del producto j .

g : índice del ingrediente tipo 7. $g = 1, 2, \dots, G$ (G indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j = 1, 2, \dots, J$.

$X_{8,h,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente h (tipo 8) utilizadas para producir un lote del producto j .

h : índice del ingrediente tipo 8. $h = 1, 2, \dots, H$ (H indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j = 1, 2, \dots, J$.

$X_{9,i,j}$ = cantidad en toneladas del ingrediente i (tipo 9) utilizadas para producir el producto j .

i : índice del ingrediente tipo 9. $i=1, 2, \dots, I$ (I indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, J$.

$X10_{kj}$ = cantidad en toneladas del ingrediente k (tipo 10) utilizadas para producir un lote del producto j .

k : índice del ingrediente tipo 10. $k=1, 2, \dots, K$ (K indica el número total de este tipo de ingredientes).

j : índice de lote. $j=1, 2, \dots, J$.

Parámetros

Coeficientes de costo

$CX1_a$ = costo en dólares del ingrediente a (tipo 1).

$CX2_b$ = costo en dólares del ingrediente b (tipo 2).

$CX3_c$ = costo en dólares del ingrediente c (tipo 3).

$CX4_d$ = costo en dólares del ingrediente d (tipo 4).

$CX5_e$ = costo en dólares del ingrediente e (tipo 5).

$CX6_f$ = costo en dólares del ingrediente f (tipo 6).

$CX7_g$ = costo en dólares del ingrediente g (tipo 7).

$CX8_h$ = costo en dólares del ingrediente h (tipo 8).

$CX9_i$ = costo en dólares del ingrediente i (tipo 9).

$CX10_k$ = costo en dólares del ingrediente k (tipo 10).

Coeficientes de rendimiento

$RX1_a$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente a (tipo 1).

$RX2_b$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente b (tipo 2).

$RX3_c$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente c (tipo 3).

$RX4_d$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente d (tipo 4).

$RX5_e$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente e (tipo 5).

$RX6_f$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente f (tipo 6).

$RX7_g$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente g (tipo 7).

$RX8_h$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente h (tipo 8).

$RX9_i$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente i (tipo 9).

$RX10_k$ = porcentaje de rendimiento del ingrediente k (tipo 10).

Coeficientes de composición química

$QX1_{a,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente a (tipo 1).

$QX2_{b,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente b (tipo 2).

$QX3_{c,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente c (tipo 3).

$QX4_{d,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente d (tipo 4).

$QX5_{e,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente e (tipo 5).

$QX6_{f,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente f (tipo 6).

$QX7_{g,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente g (tipo 7).

$QX8_{h,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente h (tipo 8).

$QX9_{i,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente i (tipo 9).

$QX10_{k,p}$ = cantidad en porcentaje del componente químico p que contiene el ingrediente k (tipo 10).

Límites de composición química

$TS_{j,p}$ = cantidad máxima permitida en porcentaje del componente químico p para producir el lote del producto j en el horizonte de planificación.

p : índice de componentes químicos requeridos para el lote j . $p = 1, 2, \dots, P$.

Límites de consumo por grupo de ingredientes

LIX_n = mínimo consumo total en toneladas del grupo de ingredientes del tipo n para todo el horizonte de planificación.

n : índice de tipo de ingrediente. $n = 1, 2, \dots, N$ (N indica el número total de tipos ingredientes).

LSX_n = máximo consumo total en toneladas del grupo de ingredientes del tipo n para todo el horizonte de planificación.

n : índice de tipo de ingrediente. $n = 1, 2, \dots, N$

Disponibilidad de ingredientes

$SX1_a$ = cantidad de toneladas del ingrediente a (tipo 1) disponible en el horizonte de planificación.

$SX2_b$ = cantidad de toneladas del ingrediente b (tipo 2) disponible en el horizonte de planificación.

$SX3_c$ = cantidad de toneladas del ingrediente c (tipo 3) disponible en el horizonte de planificación.

$SX4_d$ = cantidad de toneladas del ingrediente d (tipo 4) disponible en el horizonte de planificación.

$SX5_e$ = cantidad de toneladas del ingrediente e (tipo 5) disponible en el horizonte de planificación.

$SX6_f$ = cantidad de toneladas del ingrediente f (tipo 6) disponible en el horizonte de planificación.

$SX7_g$ = cantidad de toneladas del ingrediente g (tipo 7) disponible en el horizonte de planificación.

$SX8_h$ = cantidad de toneladas del ingrediente h (tipo 8) disponible en el horizonte de planificación.

$SX9_i$ = cantidad de toneladas del ingrediente i (tipo 9) disponible en el horizonte de planificación.

$SX10_k$ = cantidad de toneladas del ingrediente k (tipo 10) disponible en el horizonte de planificación.

Constantes de lado derecho

Y_j = número de lotes a fabricar del producto j en el horizonte de planificación.

M_j = tamaño del lote de fabricación del producto j en el horizonte de planificación.

Z = capacidad de horno de fundición.

3.2. Función objetivo

Minimizar

$$\begin{aligned}
 & \sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J (CX1_a)(X1_{a,j})(Y_j) + \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^J (CX2_b)(X2_{b,j})(Y_j) + \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J (CX3_c)(X3_{c,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J (CX4_d)(X4_{d,j})(Y_j) + \sum_{e=1}^E \sum_{j=1}^J (CX5_e)(X5_{e,j})(Y_j) + \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J (CX6_f)(X6_{f,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J (CX7_g)(X7_{g,j})(Y_j) + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J (CX8_h)(X8_{h,j})(Y_j) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CX9_i)(X9_{i,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (CX10_k)(X10_{k,j})(Y_j)
 \end{aligned}$$

Comentarios informativos

1. Sobre la minimización de costos:

Como se aprecia en la fórmula descrita, el principal objetivo es lograr la disminución de los costos de producir diferentes calidades de acero líquido en la planta de acería durante un período de tiempo determinado. Para este caso, se ha tomado como base

la función objetivo del modelo de Kim y Lewis (1987), ya que esta se ajusta a la situación analizada.

2. Sobre los tipos de ingredientes:

En el modelo de Kim y Lewis (1987) se tienen como materiales las materias primas compradas, la chatarra comprada y la chatarra interna; para nuestro caso, en la elaboración del mix de carga metálica de la Acería se tienen los siguientes tipos de ingredientes:

- Tipo 1. Chatarra fragmentada nacional: se refiere a la chatarra que se compra en el mercado nacional y que al interior de la planta ha sido sometida a un proceso de acondicionamiento llamado fragmentado de metálicos.
- Tipo 2. Chatarra fragmentada importada: se refiere a la chatarra que se compra en el extranjero, la cual ha sido procesada previamente en el lugar de origen.
- Tipo 3. Chatarra Heavy Melting: es la chatarra importada que por sus características físicas no es fragmentable.
- Tipo 4. Chatarra cortada: se refiere a la chatarra que se compra en el mercado nacional y que al interior de la planta ha sido sometida a un proceso de acondicionamiento llamado oxicorte.
- Tipo 5. Chatarra nacional de carga directa: se refiere a la chatarra que se compra en el mercado nacional y que por sus características físicas se carga directamente a las cestas de consumo.
- Tipo 6. Chatarra regional de carga directa: se refiere a la chatarra que proviene de Chile y Bolivia, y que por sus características físicas se carga directamente a las cestas de consumo.
- Tipo 7. Hierro esponja nacional: se refiere al hierro esponja generado en la planta de Reducción Directa que posee la empresa.
- Tipo 8. Hierro esponja importado: se refiere al hierro esponja que se compra en el extranjero.
- Tipo 9. Fierro metálico en escoria: se refiere a la chatarra que se recupera del proceso de chancado de escoria al interior de planta.
- Tipo 10. Chatarra de recuperación: se refiere a la chatarra que se genera en las diversas etapas de fabricación de la empresa (acería, laminación, etc).

Para el caso específico del modelo, y según la definición de variables antes descrita, se tienen los siguientes valores: $A=3$, $B=1$, $C=1$, $D=2$, $E=16$, $F=2$, $G=2$, $H=1$, $I=1$ y $K=3$. En la Tabla 3.1 se muestran todos los ingredientes empleados en la fabricación de acero y el tipo de ingrediente al que pertenecen.

3. Sobre los tipos de chatarra generados internamente y recuperados del proceso de chancado de escoria:

En el modelo de Kim y Lewis (1987) se consideran como el tercer tipo de materiales a los tipos de chatarra generados a partir de la producción de ciertos lotes, y de los cuales una fracción de la misma será reutilizada posteriormente. Para el caso de nuestro modelo, tenemos tres de estos materiales. Sin embargo, el modelo de Kim y Lewis considera a este tipo de materiales como recirculantes, es decir, que ingresan en un primer momento formando parte de una mezcla y luego son reutilizados en coladas posteriores. A diferencia de dicho modelo, el propuesto no considerará el carácter recirculante de los ingredientes, ya que estos se componen del conjunto de muchos restos que son agrupados en un mismo inventario, por lo cual al mezclarse entre ellos no se tiene la trazabilidad adecuada de a qué lote perteneció en un primer momento el residuo generado, y por tanto la composición química que se emplea es un estándar proporcionado por los expertos de planta.

4. Sobre los costos de los ingredientes:

Los costos de cada uno de los materiales empleados en las diferentes calidades de acero líquido fueron obtenidos del personal autorizado de la empresa Siderúrgica S.A. Los costos brindados están dados en dólares por tonelada de material y consideran costos incurridos para tener el material disponible para la producción (compra, tratamientos, transportes, manipulación, etc). Cabe mencionar que los precios son actualizados mensualmente por el área de Planificación de la empresa, a fin de realizar una proyección de los costos de fabricación para el período planificado.

Tabla 3.1 Ingredientes que componen el mix de carga metálica

		N°	Descripción
Ingredientes mix de carga metálica	Fragmentada nacional	1	Chatarra de tarros de leche compactada
		2	Chatarra de tarros de leche separado
		3	Chatarra fragmentada nacional
	Fragmentada Importada	4	Chatarra fragmentada importada
	Heavy Melting	5	Chatarra heavy melting 1y2 (80/20)
	Chatarra cortada	6	Chatarra pesada > 1/4" (tipo "a") especial
		7	Chatarra cortada
	Chatarra nacional C/D	8	Chatarra viruta
		9	Chatarra liviana
		10	Chatarra de tarros de leche
		11	Chatarra pesada
		12	Chatarra preparada
		13	Chatarra de embutición
		14	Chatarra liviana compactada
		15	Chatarra de recorte industrial
		16	Recorte industrial compactado
		17	Chatarra compactada tercera
		18	Chatarra compactada embutición tipo "a"
		19	Magnético de recuperación fragmentadora
		20	Chatarra compactada paquete
		21	Chatarra de tarros de leche separado
		22	Chatarra maquila tubos
	23	Magnético recuperado PPRF	
	Chatarra regional C/D	24	Chatarra pesada importada
		25	Chatarra paquete importado
	Hierro esponja nacional	26	Mezcla de hierro esponja de pellets
		27	Mezcla de hierro esponja de pellets y mineral
	Hierro esponja importado	28	Hierro esponja importado (D.R.I.)
	Fierro metálico en escoria	29	Fierro metálico de escoria
	Chatarra recuperación	30	Chatarra recuperación producción acería
		31	Chatarra recuperación producción laminado
		32	Chatarra de recuperación de planta

Fuente: Siderúrgica S.A. / Elaboración propia.

3.3. Restricciones

Restricciones de demanda y capacidad

Restricciones de tamaño de lote

$$\begin{aligned} & \sum_{a=1}^A (X1_{a,j})(RX1_a) + \sum_{b=1}^B (X2_{b,j})(RX2_b) + \sum_{c=1}^C (X3_{c,j})(RX3_c) + \sum_{d=1}^D (X4_{d,j})(RX4_d) \\ & + \sum_{e=1}^E (X5_{e,j})(RX5_e) + \sum_{f=1}^F (X6_{f,j})(RX6_f) + \sum_{g=1}^G (X7_{g,j})(RX7_g) + \sum_{h=1}^H (X8_{h,j})(RX8_h) \\ & + \sum_{i=1}^I (X9_{i,j})(RX9_i) + \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k) = M_j, \text{ para todo } j \end{aligned}$$

Restricciones de capacidad del horno

$$\begin{aligned} & \sum_{a=1}^A (X1_{a,j})(RX1_a) + \sum_{b=1}^B (X2_{b,j})(RX2_b) + \sum_{c=1}^C (X3_{c,j})(RX3_c) + \sum_{d=1}^D (X4_{d,j})(RX4_d) \\ & + \sum_{e=1}^E (X5_{e,j})(RX5_e) + \sum_{f=1}^F (X6_{f,j})(RX6_f) + \sum_{g=1}^G (X7_{g,j})(RX7_g) + \sum_{h=1}^H (X8_{h,j})(RX8_h) \\ & + \sum_{i=1}^I (X9_{i,j})(RX9_i) + \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k) \leq Z, \text{ para todo } j \end{aligned}$$

Comentarios informativos

1. Sobre la variable M_j y Z :

En el modelo de Kim y Lewis (1987) se indica que no siempre se emplea el máximo de la capacidad del horno de fundición. Esto significa que si la demanda del lote j es menor que la capacidad del horno de fundición, $M_{j,k}$ representará la cantidad demandada; caso contrario, representaría la capacidad del horno de fundición, pues la carga total no puede exceder la capacidad del horno de fundición.

2. Sobre la capacidad y demanda:

En la planta en estudio, se busca maximizar la utilización de la capacidad del horno de fundición, ya que al solo contar con un horno para alimentar tres plantas

laminadoras (la demanda no satisfecha de las laminadoras se compensa con la adquisición de producto semi-terminado) es importante que ese produzca al máximo de su capacidad. En general, una colada empleando al máximo la capacidad del horno puede generar en promedio 60 toneladas de acero líquido.

La demanda requerida por cada tipo de calidad de acero líquido será una entrada del modelo, el cual provendrá de la programación que realiza el área de PCP de la empresa, de modo que se pueda cumplir con los requerimientos del programa de Laminación. Para el modelo planteado, se asumirá que todos los productos a fabricar en el período de planificación se fabrican en lotes de 60 toneladas, es decir, que, para todo j , $M_j = 60$.

Asimismo, la configuración de carga no deberá exceder la capacidad del horno. Como se mencionó en el capítulo anterior, para la fabricación de un lote o colada de acero líquido se cargan dos cestas de 35 toneladas, por lo que asumiremos que el mix de carga para cada producto no deberá exceder las 70 toneladas ($Z=70$).

3. Sobre los parámetros $RX1_a$, $RX2_b$, $RX3_c$, $RX4_d$, $RX5_e$, $RX6_f$, $RX7_g$, $RX8_h$, $RX9_i$ y $RX10_k$:

El empleo de los parámetros UP_i , US_j y Uh_m en el modelo de Kim y Lewis hace mención al porcentaje de utilización de los materiales empleados para la fabricación de un lote específico. Sin embargo, se ha visto conveniente cambiar el término de utilización a rendimiento, ya que este último concepto representa lo que sucede al interior del horno de fundición producto de las reacciones que ahí se llevan a cabo. Por rendimiento se entiende que, al ingresar cierta cantidad de materiales al horno de fundición, la sumatoria de los pesos de estos no necesariamente será igual al peso final del producto requerido, puesto que muchos de los materiales se pierden en el proceso en forma de vapores o residual. Por ello, se ha visto conveniente el empleo del término rendimiento para definir las variables $RX1_a$, $RX2_b$, $RX3_c$, $RX4_d$, $RX5_e$, $RX6_f$, $RX7_g$, $RX8_h$, $RX9_i$ y $RX10_k$.

Restricciones de disponibilidad de ingredientes

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 1

$$\sum_{j=1}^J (X1_{a,j})(Y_j) \leq SX1_a, \text{ para todo } a$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 2

$$\sum_{j=1}^J (X_{2,b,j})(Y_j) \leq SX_{2_b}, \text{ para todo } b$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 3

$$\sum_{j=1}^J (X_{3,c,j})(Y_j) \leq SX_{3_c}, \text{ para todo } c$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 4

$$\sum_{j=1}^J (X_{4,d,j})(Y_j) \leq SX_{4_d}, \text{ para todo } d$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 5

$$\sum_{j=1}^J (X_{5,e,j})(Y_j) \leq SX_{5_e}, \text{ para todo } e$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 6

$$\sum_{j=1}^J (X_{6,f,j})(Y_j) \leq SX_{6_f}, \text{ para todo } f$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 7

$$\sum_{j=1}^J (X_{7,g,j})(Y_j) \leq SX_{7_g}, \text{ para todo } g$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 8

$$\sum_{j=1}^J (X_{8,h,j})(Y_j) \leq SX_{8_h}, \text{ para todo } h$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 9

$$\sum_{j=1}^J (X_{9,i,j})(Y_j) \leq SX_{9_i}, \text{ para todo } i$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 10

$$\sum_{j=1}^J (X_{10_{k,j}})(Y_j) \leq SX_{10_k}, \text{ para todo } k$$

Comentarios informativos

1. Sobre la disponibilidad de los ingredientes:

Es incorrecto afirmar que la disponibilidad diaria de cada tipo de material corresponda a la cantidad almacenada en toda la planta, ya que la misma cuenta con un abastecimiento continuo de insumos y materias primas, que le permiten mantener inventarios de seguridad de acuerdo a la política establecida en la planta. Por ello, las variables de stock incluyen los ingresos estimados en el horizonte de planificación y se asume que los materiales estarán disponibles en el momento que se tenga que fabricar un determinado producto cuya composición requiera el consumo de un ingrediente específico.

2. Sobre el uso de las disponibilidades y el valor a colocar en el modelo:

Las cantidades que se coloquen como disponibilidad deben ser lo suficientemente grandes para poder permitir con las metas de producción de la planta. Es decir, la sumatoria de los pesos de los ingredientes disponibles diariamente deben ser, en el peor de los casos (y luego de aplicar el factor de rendimiento), igual a la sumatoria de los pesos de los productos o lotes solicitados para el horizonte de planificación. Para ello, debe asegurarse de colocar valores que permitan cumplir con las metas de producción, pero que a la vez no permitan el uso indiscriminado de cierto tipo de material.

3. Sobre la variable de retorno de tiempo y el porcentaje de retorno:

En el modelo de Kim y Lewis (1987) se considera la variable *Scrap* como la variable que representa el porcentaje de cada tonelada fundida que retornará a la fundición para ser utilizada posteriormente como material de carga. Sin embargo, como se explicó anteriormente en el comentario 3 de la de la definición de la función objetivo, el modelo no considerará el carácter recirculante de estos ingredientes.

Del mismo modo, la variable *R* que representa el tiempo que debe pasar para que la chatarra generada como parte del proceso productivo pueda estar disponible

nuevamente como material de carga, resulta difícil de calcular por los motivos antes expuestos.

Restricciones de balance químico

Límites superiores

$$\begin{aligned}
 & \sum_{a=1}^A (X1_{a,j})(RX1_a)(QX1_{a,p}) + \sum_{b=1}^B (X2_{b,j})(RX2_b)(QX2_{b,p}) + \sum_{c=1}^C (X3_{c,j})(RX3_c)(QX3_{c,p}) \\
 & + \sum_{d=1}^D (X4_{d,j})(RX4_d)(QX4_{d,p}) + \sum_{e=1}^E (X5_{e,j})(RX5_e)(QX5_{e,p}) + \sum_{f=1}^F (X6_{f,j})(RX6_f)(QX6_{f,p}) \\
 & + \sum_{g=1}^G (X7_{g,j})(RX7_g)(QX7_{g,p}) + \sum_{h=1}^H (X8_{h,j})(RX8_h)(QX8_{h,p}) + \sum_{i=1}^I (X9_{i,j})(RX9_i)(QX9_{i,p}) \\
 & + \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k)(QX10_{k,p}) \leq (TS_{j,p})(M_j) , \text{ para todo } j, p
 \end{aligned}$$

Comentarios informativos

1. Sobre el subíndice h :

Como parte del proceso de control de calidad, se cuenta con sensores que se sumergen al interior de las mezclas en los hornos de fundición y que se encargan de medir la composición química de la mezcla. De este modo, en el área de metálicos al momento de configurar el mix de carga se identifican cuatro elementos químicos residuales ($P=4$), cuya relevancia resulta significativa a la hora de medir la calidad de los diferentes productos fabricados en la Acería. Asimismo, según lo indicado por los encargados del proceso, en esta etapa del proceso solo se considera la restricción del límite superior, ya que en una etapa posterior (en el horno cuchara) se realiza el afino de las composiciones al agregar aditivos y ferroaleaciones. Estos componentes y el porcentaje dentro de cada ingrediente se aprecian en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Cantidad porcentual de cada componente por ingrediente de carga

N°	Descripción	Elementos químicos			
		%Cr	%Ni	%Cu	%Sn
1	Chatarra de tarros de leche compactada	0.03	0.03	0.03	0.50
2	Chatarra de tarros de leche separado	0.03	0.03	0.03	0.50
3	Chatarra fragmentada nacional	0.06	0.06	0.10	0.08
4	Chatarra fragmentada importada	0.12	0.07	0.40	0.02
5	Chatarra heavy melting 1y2 (80/20)	0.30	0.08	0.30	0.10
6	Chatarra pesada > 1/4" (tipo "a") especial	0.10	0.10	0.20	0.05
7	Chatarra cortada	0.12	0.12	0.30	0.02
8	Chatarra viruta	0.10	0.10	0.30	0.05
9	Chatarra liviana	0.05	0.03	0.10	0.08
10	Chatarra de tarros de leche	0.03	0.03	0.03	0.50
11	Chatarra pesada	0.10	0.10	0.20	0.05
12	Chatarra preparada	0.10	0.10	0.20	0.05
13	Chatarra de embutición	0.02	0.02	0.02	0.00
14	Chatarra liviana compactada	0.02	0.02	0.02	0.00
15	Chatarra de recorte industrial	0.03	0.03	0.03	0.25
16	Recorte industrial compactado	0.03	0.03	0.03	0.25
17	Chatarra compactada tercera	0.02	0.02	0.02	0.00
18	Chatarra compactada embutición tipo "a"	0.02	0.02	0.02	0.00
19	Magnético de recuperación fragmentadora	0.10	0.10	0.30	0.05
20	Chatarra compactada paquete	0.02	0.02	0.02	0.00
21	Chatarra de tarros de leche separado	0.03	0.03	0.03	0.50
22	Chatarra maquila tubos	0.15	0.15	0.15	0.03
23	Magnético recuperado PPRF	0.10	0.10	0.30	0.05
24	Chatarra pesada importada	0.03	0.03	0.10	0.02
25	Chatarra paquete importado	0.04	0.01	0.00	0.01
26	Mezcla de hierro esponja de pellets	0.00	0.01	0.00	0.01
27	Mezcla de hierro esponja de pellets y mineral	0.00	0.01	0.00	0.01
28	Hierro esponja importado (D.R.I.)	0.00	0.01	0.00	0.01
29	Fierro metálico de escoria	0.15	0.15	0.50	0.06
30	Chatarra recuperación producción acería	0.15	0.15	0.65	0.06
31	Chatarra recuperación producción laminado	0.15	0.15	0.65	0.06
32	Chatarra de recuperación de planta	0.15	0.15	0.65	0.06

Fuente: Siderúrgica S.A. Elaboración propia de la tabla.

Restricciones de políticas de inventarios

Política de inventario para los ingredientes de tipo 1

$$LIX1 \leq \sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J (X1_{a,j})(Y_j) \leq LSX1$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 2

$$LIX2 \leq \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^J (X2_{b,j})(Y_j) \leq LSX2$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 3

$$LIX3 \leq \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J (X3_{c,j})(Y_j) \leq LSX3$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 4

$$LIX4 \leq \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J (X4_{d,j})(Y_j) \leq LSX4$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 5

$$LIX5 \leq \sum_{e=1}^E \sum_{j=1}^J (X5_{e,j})(Y_j) \leq LSX5$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 6

$$LIX6 \leq \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J (X6_{f,j})(Y_j) \leq LSX6$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 7

$$LIX7 \leq \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J (X7_{g,j})(Y_j) \leq LSX7$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 8

$$LIX8 \leq \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J (X8_{h,j})(Y_j) \leq LSX8$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 9

$$LIX9 \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (X9_{i,j})(Y_j) \leq LSX9$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 10

$$LIX10 \leq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (X10_{k,j})(Y_j) \leq LSX10$$

Comentarios informativos

1. Sobre las políticas para los ingredientes:

Este es un concepto no introducido en el modelo de Kim y Lewis (1987). Consiste en la política de control de inventarios establecida por el área de Planeamiento y Operaciones de la empresa Siderúrgica S.A, en la cual se busca mantener niveles de inventario de ciertos grupos de ingredientes, basándose en políticas de seguridad (para definir los niveles máximos de consumo) y en capacidad física de las zonas de almacenamiento (para definir los niveles mínimos de consumo). Estos datos son actualizados cada vez que se realiza la programación de las operaciones, en función de los niveles de inventario actuales en planta. Así, las variables LIX_n y LSX_n indican el mínimo y máximo consumo respectivamente para cada uno de los grupos de ingredientes durante el horizonte de planificación.

Restricciones de calidades especiales

Consumo de chatarra fragmentada importada

$$X2_{1,j} = 0 \text{ , para } j = 37, 38, 41, 42, 43, 44, 46 \text{ y } 47$$

Consumo de chatarra de embutición

$$X5_{6,j} \geq 8 \text{ , para } j = 37 \text{ y } 38$$

Consumo de hierro esponja importado (D.R.I)

$X_{8,j} \geq 30$, para $j = 37$ y 38

$X_{8,j} \geq 15$, para $j = 41, 42, 43, 44, 46$ y 47

Comentarios informativos

1. Sobre las calidades especiales:

Este es un concepto no introducido en el modelo de Kim y Lewis (1987). Las calidades especiales, como se mencionó en el capítulo anterior, son calidades de acero cuyos requerimientos de composición química y especificaciones técnicas son más exigentes que el resto, además de recibir tratamientos especiales luego de su fabricación en la Acería. En el modelo planteado, se tienen 8 calidades especiales de un total de 53 tipos de acero, las cuales corresponden a los códigos de producto 37, 38, 31, 42, 43, 44, 46 y 47 de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Calidades de acero fabricadas en la empresa Siderúrgica S.A.

Productos					
N°	Código de Producto	N°	Código de Producto	N°	Código de Producto
1	1535-1	19	A706-2RO	37	DIN9SMn28-1
2	1535-1EXP	20	NBR7480CA50-1	38	DIN9SMn28-2
3	1535-1L1	21	NBR7480CA50-2	39	1080-1
4	1535-1/2	22	NBR7480CA50-3	40	1080-VA
5	1535-2	23	NBR7480CA50-6	41	1008A2
6	1535-2EXP	24	A615G75Nb-V1	42	1008AA
7	1530V	25	A615G75V	43	1008C
8	1535-6	26	1020B	44	1008SXA
9	1525	27	1020B1	45	SAE1013
10	1525-1	28	1020B2	46	1008MQ
11	1535-1/2RO	29	1020B9	47	1008DQ
12	1535-2RO	30	1020P3-V1	48	1535-1B
13	1535-5/8RO	31	1020Nb-V2	49	1535-2B
14	1535-1/2ROEXP	32	1020Nb-V3	50	1020P3/1
15	1535-2ROEXP	33	1018-1	51	NBR7480CA50-2A
16	A615G40-1	34	1018-2	52	NBR7480CA50-2B
17	A706-1	35	1045-1	53	1065
18	A706-2	36	1045-2		

Fuente: Siderúrgica S.A. / Elaboración propia de la tabla.

2. Sobre la chatarra importada, la chatarra de embutición y el hierro esponja importado (D.R.I):

Estos materiales se emplean de forma especial en la fabricación de calidades especiales debido a que poseen características físicas que permiten un adecuado tratamiento posterior a la etapa de fabricación, favorecen el rendimiento de las coladas y evitan la generación de porosidades en las palanquillas.

3.4. Compilación del modelo matemático

Función objetivo

Minimizar

$$\begin{aligned}
 & \sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J (CX1_a)(X1_{a,j})(Y_j) + \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^J (CX2_b)(X2_{b,j})(Y_j) + \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J (CX3_c)(X3_{c,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J (CX4_d)(X4_{d,j})(Y_j) + \sum_{e=1}^E \sum_{j=1}^J (CX5_e)(X5_{e,j})(Y_j) + \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J (CX6_f)(X6_{f,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J (CX7_g)(X7_{g,j})(Y_j) + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J (CX8_h)(X8_{h,j})(Y_j) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CX9_i)(X9_{i,j})(Y_j) \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (CX10_k)(X10_{k,j})(Y_j)
 \end{aligned}$$

Restricciones de demanda y capacidad

Restricciones de tamaño de lote

$$\begin{aligned}
 & \sum_{a=1}^A (X1_{a,j})(RX1_a) + \sum_{b=1}^B (X2_{b,j})(RX2_b) + \sum_{c=1}^C (X3_{c,j})(RX3_c) + \sum_{d=1}^D (X4_{d,j})(RX4_d) \\
 & + \sum_{e=1}^E (X5_{e,j})(RX5_e) + \sum_{f=1}^F (X6_{f,j})(RX6_f) + \sum_{g=1}^G (X7_{g,j})(RX7_g) + \sum_{h=1}^H (X8_{h,j})(RX8_h) \\
 & + \sum_{i=1}^I (X9_{i,j})(RX9_i) + \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k) = M_j \text{ para todo } j
 \end{aligned}$$

Restricciones de capacidad del horno

$$\begin{aligned} & \sum_{a=1}^A (X1_{a,j})(RX1_a) + \sum_{b=1}^B (X2_{b,j})(RX2_b) + \sum_{c=1}^C (X3_{c,j})(RX3_c) + \sum_{d=1}^D (X4_{d,j})(RX4_d) \\ & + \sum_{e=1}^E (X5_{e,j})(RX5_e) + \sum_{f=1}^F (X6_{f,j})(RX6_f) + \sum_{g=1}^G (X7_{g,j})(RX7_g) + \sum_{h=1}^H (X8_{h,j})(RX8_h) \\ & + \sum_{i=1}^I (X9_{i,j})(RX9_i) + \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k) \leq Z \text{ para todo } j \end{aligned}$$

Restricciones de disponibilidad de ingredientes

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 1

$$\sum_{j=1}^J (X1_{a,j})(Y_j) \leq SX1_a, \text{ para todo } a$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 2

$$\sum_{j=1}^J (X2_{b,j})(Y_j) \leq SX2_b, \text{ para todo } b$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 3

$$\sum_{j=1}^J (X3_{c,j})(Y_j) \leq SX3_c, \text{ para todo } c$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 4

$$\sum_{j=1}^J (X4_{d,j})(Y_j) \leq SX4_d, \text{ para todo } d$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 5

$$\sum_{j=1}^J (X5_{e,j})(Y_j) \leq SX5_e, \text{ para todo } e$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 6

$$\sum_{j=1}^J (X_{6f,j})(Y_j) \leq SX_{6f}, \text{ para todo } f$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 7

$$\sum_{j=1}^J (X_{7g,j})(Y_j) \leq SX_{7g}, \text{ para todo } g$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 8

$$\sum_{j=1}^J (X_{8h,j})(Y_j) \leq SX_{8h}, \text{ para todo } h$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 9

$$\sum_{j=1}^J (X_{9i,j})(Y_j) \leq SX_{9i}, \text{ para todo } i$$

Restricciones de disponibilidad para los ingredientes de tipo 10

$$\sum_{j=1}^J (X_{10k,j})(Y_j) \leq SX_{10k}, \text{ para todo } k$$

Restricciones de Balance Químico

Límites superiores

$$\begin{aligned} & \sum_{a=1}^A (X_{1a,j})(RX_{1a})(QX_{1a,p}) + \sum_{b=1}^B (X_{2b,j})(RX_{2b})(QX_{2b,p}) + \sum_{c=1}^C (X_{3c,j})(RX_{3c})(QX_{3c,p}) \\ & + \sum_{d=1}^D (X_{4d,j})(RX_{4d})(QX_{4d,p}) + \sum_{e=1}^E (X_{5e,j})(RX_{5e})(QX_{5e,p}) + \sum_{f=1}^F (X_{6f,j})(RX_{6f})(QX_{6f,p}) \\ & + \sum_{g=1}^G (X_{7g,j})(RX_{7g})(QX_{7g,p}) + \sum_{h=1}^H (X_{8h,j})(RX_{8h})(QX_{8h,p}) + \sum_{i=1}^I (X_{9i,j})(RX_{9i})(QX_{9i,p}) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k=1}^K (X10_{k,j})(RX10_k)(QX10_{k,p}) \leq (TS_{j,p})(M_j) \quad \text{para todo } j, p$$

Restricciones de políticas de inventarios

Política de inventario para los ingredientes de tipo 1

$$LIX1 \leq \sum_{a=1}^A \sum_{j=1}^J (X1_{a,j})(Y_j) \leq LSX1$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 2

$$LIX2 \leq \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^J (X2_{b,j})(Y_j) \leq LSX2$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 3

$$LIX3 \leq \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J (X3_{c,j})(Y_j) \leq LSX3$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 4

$$LIX4 \leq \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J (X4_{d,j})(Y_j) \leq LSX4$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 5

$$LIX5 \leq \sum_{e=1}^E \sum_{j=1}^J (X5_{e,j})(Y_j) \leq LSX5$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 6

$$LIX6 \leq \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J (X6_{f,j})(Y_j) \leq LSX6$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 7

$$LIX7 \leq \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J (X7_{g,j})(Y_j) \leq LSX7$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 8

$$LIX8 \leq \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J (X8_{h,j})(Y_j) \leq LSX8$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 9

$$LIX9 \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (X9_{i,j})(Y_j) \leq LSX9$$

Política de inventario para los ingredientes de tipo 10

$$LIX10 \leq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (X10_{k,j})(Y_j) \leq LSX10$$

Restricciones de calidades especiales

Consumo de chatarra fragmentada importada

$$X2_{1,j} = 0 \text{ , para } j = 37, 38, 41, 42, 43, 44, 46 \text{ y } 47$$

Consumo de chatarra de embutición

$$X5_{6,j} \geq 8 \text{ , para } j = 37 \text{ y } 38$$

Consumo de hierro esponja importado (D.R.I)

$$X8_{1,j} \geq 30 \text{ , para } j = 37 \text{ y } 38$$

$$X8_{1,j} \geq 15 \text{ , para } j = 41, 42, 43, 44, 46 \text{ y } 47$$

El modelo de programación lineal planteado se diseñó empleando el lenguaje de modelado del software LINGO 11.0 y también empleando una interfaz en MS Excel, esto último con la finalidad de mostrar los resultados al personal de la planta, quienes no manejan a detalle el funcionamiento de un modelo de programación lineal. Para esto se aplica el concepto de “caja negra”, donde los encargados de configurar el mix de carga no saben con detalle qué es lo que sucede al interior del modelo, pero si saben los datos que deben ingresar en la hoja de MS Excel e interpretar los resultados obtenidos, los cuales son presentados en una interfaz más conocida y amigable.

A continuación, se muestra el modelo de programación en el lenguaje de modelado de LINGO:

MODEL:

SETS:

```
INGREDIENTE: COSTO, STOCK, CONSUMO, RENDIMIENTO;
PRODUCTO: DEMANDA;
ELEMENTO:;
MIX(INGREDIENTE, PRODUCTO): P;
LIMITE(PRODUCTO, ELEMENTO): LS, ESPFINAL;
COMPOSICION(INGREDIENTE, ELEMENTO): Q;
POLITICA/1..10/: POLITICAMIN, POLITICAMAX;
```

ENDSETS

DATA:

```
INGREDIENTE=@OLE('Dirección de archivo origen'2);
PRODUCTO=@OLE('Dirección de archivo origen');
ELEMENTO=@OLE('Dirección de archivo origen');
COSTO, STOCK, RENDIMIENTO, DEMANDA, LS, Q=@OLE('Dirección de archivo
origen');
POLITICAMIN, POLITICAMAX=@OLE('Dirección de archivo origen');
@OLE('Dirección de archivo destino'3)=P, CONSUMO, ESPFINAL;
LOTE=60;
CAPHORNO=70;
```

ENDDATA

!FUNCION OBJETIVO;

```
[FUNCION_OBJETIVO] MIN=@SUM(INGREDIENTE(I): COSTO(I) * CONSUMO(I));
```

!RESTRICCIONES DE CAPACIDAD;

```
@FOR(PRODUCTO(J): [TAM_LOTE] @SUM(MIX(I, J): P(I, J) * RENDIMIENTO(I)) =
LOTE);
```

```
@FOR(PRODUCTO(J): [CAP_HORNO] @SUM(MIX(I, J): P(I, J)) <= CAPHORNO);
```

!RESTRICCIONES DE DISPONIBILIDAD;

```
@FOR(INGREDIENTE(I): [STK_DISP] CONSUMO(I) <= STOCK(I));
```

```
@FOR(INGREDIENTE(I):
```

```
CONSUMO(I) = @SUM(MIX(I, J): P(I, J) * DEMANDA(J));
```

² Corresponde a la dirección del archivo MS Excel donde se encuentra los datos de entrada (parámetros y constantes) para la solución del problema.

³ Corresponde a la dirección del archivo MS Excel donde se mostrarán los resultados del programa y que podrán visualizar los usuarios.

```

!RESTRICCIONES DE COMPOSICIÓN QUÍMICA;
@FOR (LIMITE (J, H) : [LIM_SUP] @SUM (INGREDIENTE (I) : P (I, J) * Q (I, H) * REND
IMIEN TO (I) ) /LOTE <= LS (J, H) ) ;
@FOR (LIMITE (J, H) : ESPFINAL (J, H) = @SUM (INGREDIENTE (I) : P (I, J) * Q (I, H)
* RENDIMIENTO (I) ) /LOTE) ;

!RESTRICCIONES PARA CALIDADES ESPECIALES;

!CONSUMO DE CHATARRA FRAGMENTADA IMPORTADA;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#37: [FR_IMP_DIN9SMn28_1] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#38: [FR_IMP_DIN9SMn28_2] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#41: [FR_IMP_1008A2] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#42: [FR_IMP_1008AA] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#43: [FR_IMP_1008C] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#44: [FR_IMP_1008SXA] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#46: [FR_IMP_1008MQ] P (I, J) = 0) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#4#AND#J#EQ#47: [FR_IMP_1008DQ] P (I, J) = 0) ;

!CONSUMO DE CHATARRA EMBUTICIÓN;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#13#AND#J#EQ#37: [CH_EMB_DIN9SMn28_1]
P (I, J) >= 8) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#13#AND#J#EQ#38: [CH_EMB_DIN9SMn28_2] P (I, J) >= 8)
;

!CONSUMO DE CHATARRA DE D.R.I;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#37: [DRI_DIN9SMn28_1] P (I, J) >= 30) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#38: [DRI_DIN9SMn28_2] P (I, J) >= 30) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#41: [DRI_1008A2] P (I, J) >= 15) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#42: [DRI_1008AA] P (I, J) >= 15) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#43: [DRI_1008C] P (I, J) >= 15) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#44: [DRI_1008SXA] P (I, J) >= 15) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#46: [DRI_1008MQ] P (I, J) >= 15) ;
@FOR (MIX (I, J) | I#EQ#28#AND#J#EQ#47: [DRI_1008DQ] P (I, J) >= 15) ;

!RESTRICCIONES DE POLITICA DE INVENTARIO;

!INGREDIENTES TIPO 1;
[POL_MIN_FRAG_NAC] @SUM (INGREDIENTE (I) | I#GE#1#AND#I#LE#3: CONSUMO (
I) ) >= POLITICAMIN (1) ;
[POL_MAX_FRAG_NAC] @SUM (INGREDIENTE (I) | I#GE#1#AND#I#LE#3: CONSUMO (
I) ) <= POLITICAMAX (1) ;

!INGREDIENTES TIPO 2;
[POL_MIN_FRAG_IMP] @SUM (INGREDIENTE (I) | I#EQ#4: CONSUMO (I) ) >= POLITI
CAMIN (2) ;
[POL_MAX_FRAG_IMP] @SUM (INGREDIENTE (I) | I#EQ#4: CONSUMO (I) ) <= POLITI
CAMAX (2) ;

!INGREDIENTES TIPO 3;
[POL_MIN_HE_NAC] @SUM (INGREDIENTE (I) | I#EQ#5: CONSUMO (I) ) >= POLITICA
MIN (3) ;

```

[POL_MAX_HE_NAC]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#EQ#5:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(3);

!INGREDIENTES TIPO 4;

[POL_MIN_CHAT_REG]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#7#AND#I#LE#7:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(4);

[POL_MAX_CHAT_REG]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#7#AND#I#LE#7:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(4);

!INGREDIENTES TIPO 5;

[POL_MIN_HM]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#8#AND#I#LE#23:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(5);

[POL_MAX_HM]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#8#AND#I#LE#23:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(5);

!INGREDIENTES TIPO 6;

[POL_MIN_CHAT_NAC]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#24#AND#I#LE#25:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(6);

[POL_MAX_CHAT_NAC]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#24#AND#I#LE#25:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(6);

!INGREDIENTES TIPO 7;

[POL_MIN_HE_IMP]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#26#AND#I#LE#27:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(7);

[POL_MAX_HE_IMP]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#26#AND#I#LE#27:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(7);

!INGREDIENTES TIPO 8;

[POL_MIN_CHAT_CORTADA]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#EQ#28:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(8);

[POL_MAX_CHAT_CORTADA]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#EQ#28:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(8);

!INGREDIENTES TIPO 9;

[POL_MIN_REC]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#EQ#29:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(9);

[POL_MAX_REC]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#EQ#29:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(9);

!INGREDIENTES TIPO 10;

[POL_MIN_FMS]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#30#AND#I#LE#32:CONSUMO(I))>=POLITICAMIN(10);

[POL_MAX_FMS]@SUM(INGREDIENTE(I)|I#GE#30#AND#I#LE#32:CONSUMO(I))<=POLITICAMAX(10);

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE MEJORA

En el presente capítulo se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas del modelo y se compararán con los valores actuales que se manejan en la empresa Siderúrgica S.A. Asimismo, se presentará un análisis de sensibilidad a partir de los resultados obtenidos en el reporte generado por la herramienta empleada.

4.1. Resultados

Luego de plantear el modelo, se realizaron dos pruebas del mismo para calcular el mix de carga de los programas de acería. Para la ejecución de ambas pruebas, se obtuvieron los datos de demanda, stocks y costos del personal encargado de elaborar el programa de producción, así como también el costo total actual pronosticado para dichos períodos (cada periodo tiene una duración de 30 días).

La primera prueba se realizó empleando 22 materiales y 16 productos, mientras que la segunda consideró 23 ingredientes y 19 productos. En ambos casos, se observó que, según el inventario de ingredientes proporcionado por el área de planificación, se contaban con disponibilidad de otros ingredientes adicionales; sin embargo, para poder realizar una comparación más real entre los métodos de configuración del mix de carga, se decidió trabajar sólo con los materiales empleados por el área de metálicos en cada uno de los periodos evaluados.

Los resultados arrojados por ambas pruebas, los cuales se muestran en la Tabla 4.1, indican que al aplicar la herramienta propuesta se lograron ahorros significativos. En el primer caso, se logró un ahorro de \$836,248 mensuales (ahorro de 3.3% del costo actual) y se refleja en un consumo menor en el total de toneladas de carga metálica empleada: se pasó de emplear 72,310 toneladas a consumir 70,956 toneladas en total. Por otro lado, la segunda prueba arrojó un ahorro de \$626,246 mensuales (2.4% del costo actual) y una reducción en el consumo que pasó de 73,961 toneladas a 72,058 toneladas.

En ambas pruebas es posible identificar una tendencia por el consumo de los mismos ingredientes, esto principalmente se debe a la política de inventarios establecida por el área de Planificación de la empresa y al costo unitario de los materiales. Así, es posible identificar que el material con mayor consumo es la chatarra fragmentada nacional, representando el 32% del tonelaje total de ingredientes consumidos en cada prueba.

También se aprecia que no todos los ingredientes se consumen en el horizonte de planificación; a decir verdad, de los ingredientes disponibles para cada prueba, entre 5 y 6 ingredientes no se consumen en lo absoluto en ninguna de las pruebas. El detalle de los consumos por ingrediente se aprecia en el Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2.

Tabla 4.1 Resultados de pruebas realizadas

	PRUEBA	
	N° 1	N° 2
Consumo actual PCP (t)	72,302	73,961
Consumo total prueba (t)	70,956	72,058
Costo actual PCP (\$)	25,567,737	26,242,873
Costo total prueba (\$)	24,731,489	25,616,627
Ahorro (\$)	836,248	626,246

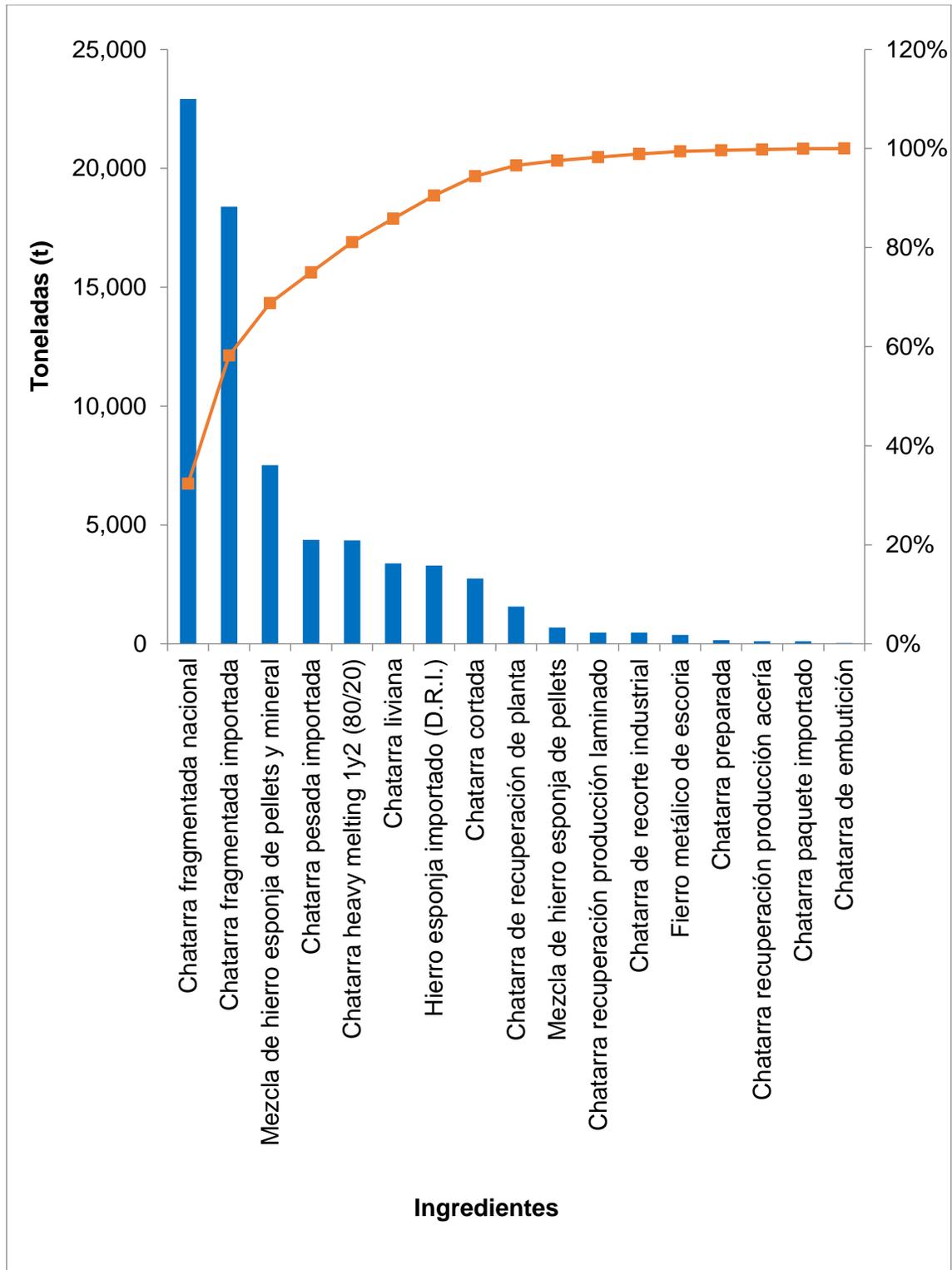
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en el Gráfico 4.3 y Gráfico 4.4 se comparan los consumos de cada ingrediente y el número de productos de los cuales forman parte. En estos últimos, se evidencia una tendencia que el consumo de los ingredientes es mayor cuando forman parte de la mezcla de varios productos. Sin embargo, se debe aclarar que estos gráficos solo muestran si el producto forma parte de la composición del producto, mas no su peso relativo dentro del mix de cada uno

Por otro lado, en cumplimiento de las políticas de inventarios establecidas por la empresa, se tienen consumos por grupos de ingredientes dentro de los límites establecidos, lo que se aprecian en el Gráfico 4.5 y Gráfico 4.6. En la mayoría de estos, se cumple únicamente con el consumo mínimo exigido. Un detalle más amplio será mostrado en un futuro análisis de sensibilidad.

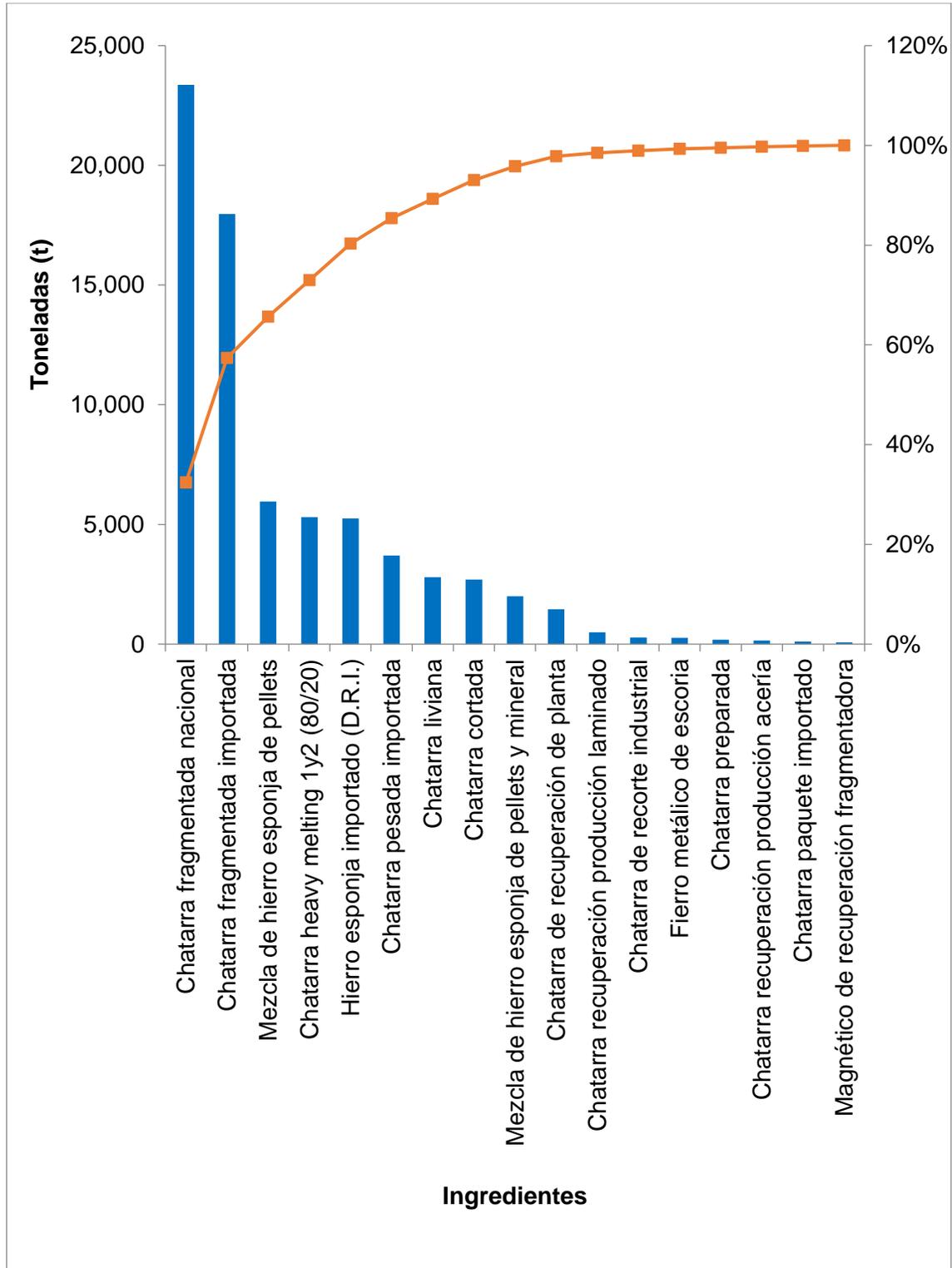
Desde el punto de vista de los productos, en el Gráfico 4.7 y Gráfico 4.8 se observa el número de lotes demandado por cada producto y se evidencia una tendencia a contar con un mix de ingredientes más variado cuando la demanda de lotes es mayor; sin embargo, hay productos cuya demanda en lotes es menor y que requieren de 2 o 3 ingredientes para la fabricación de cada lote. El detalle de los ingredientes empleados para la fabricación de cada producto, así como la cantidad necesaria de cada uno por lote, se podrán visualizar en el archivo MS Excel que forma parte de la mejora a implementar.

Gráfico 4.1 Consumo por ingrediente en prueba N°1



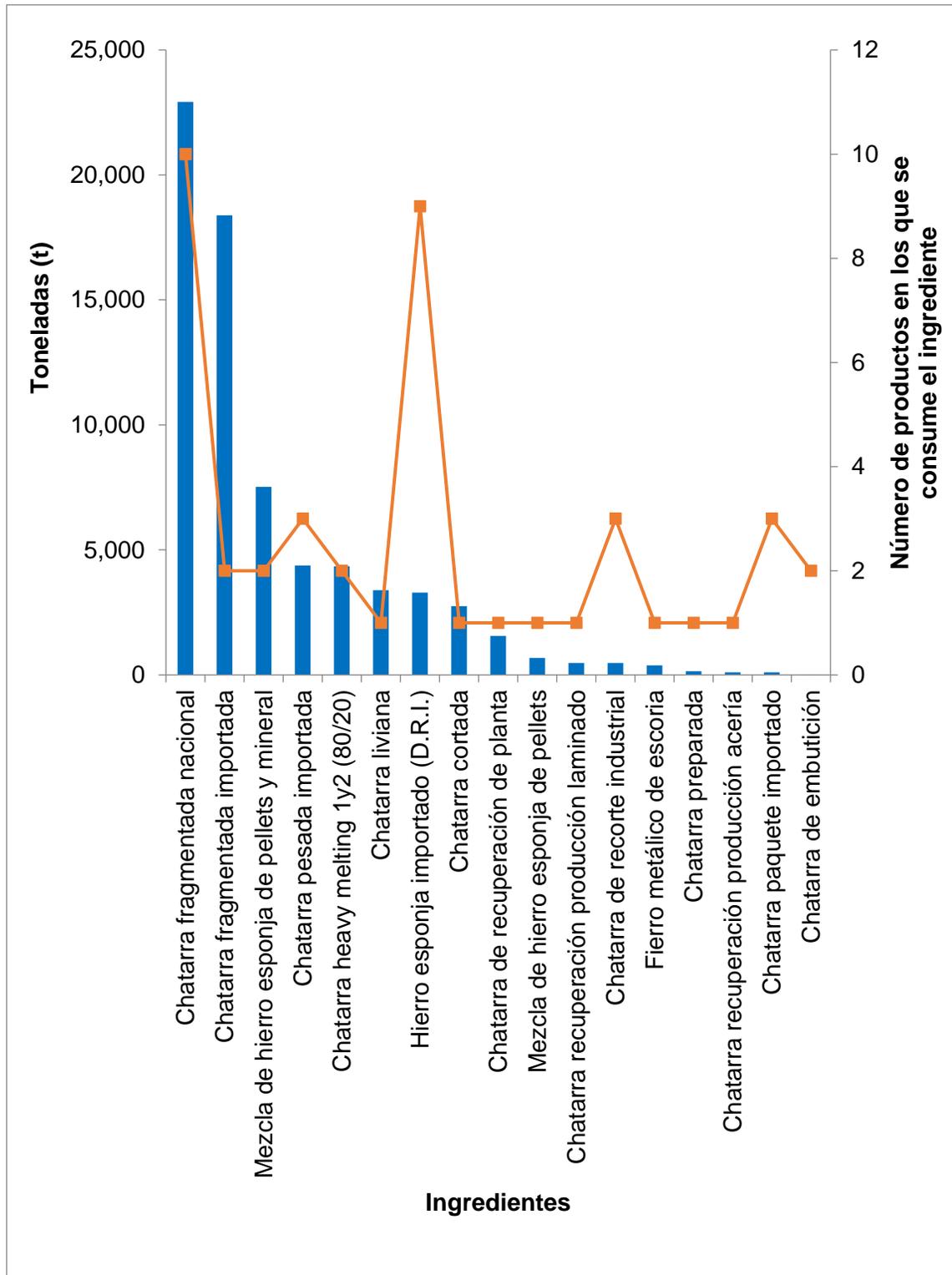
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2 Consumo por ingrediente en prueba N°2



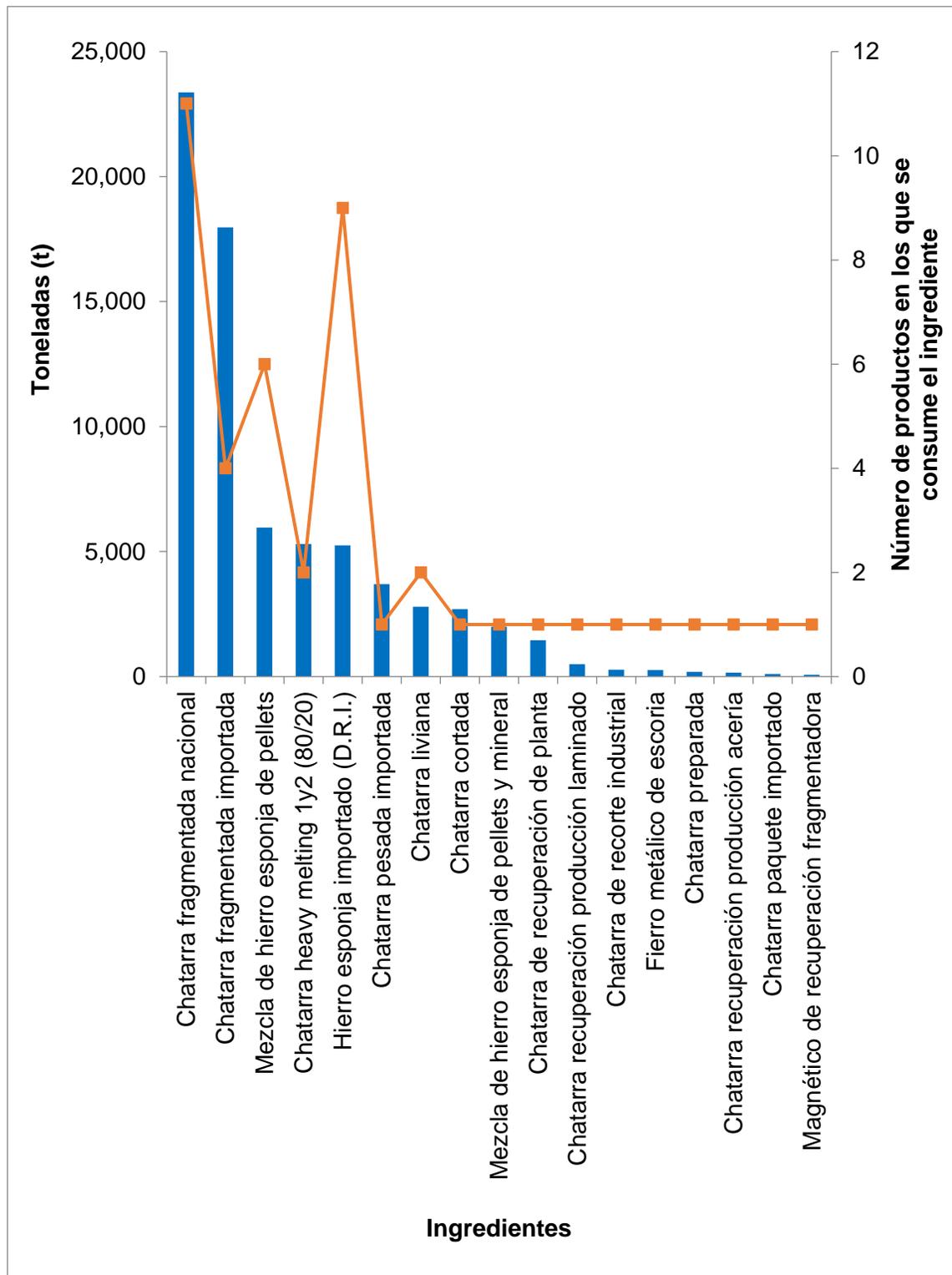
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3 Consumo por ingrediente y número de productos en los que se consumen de la prueba N°1



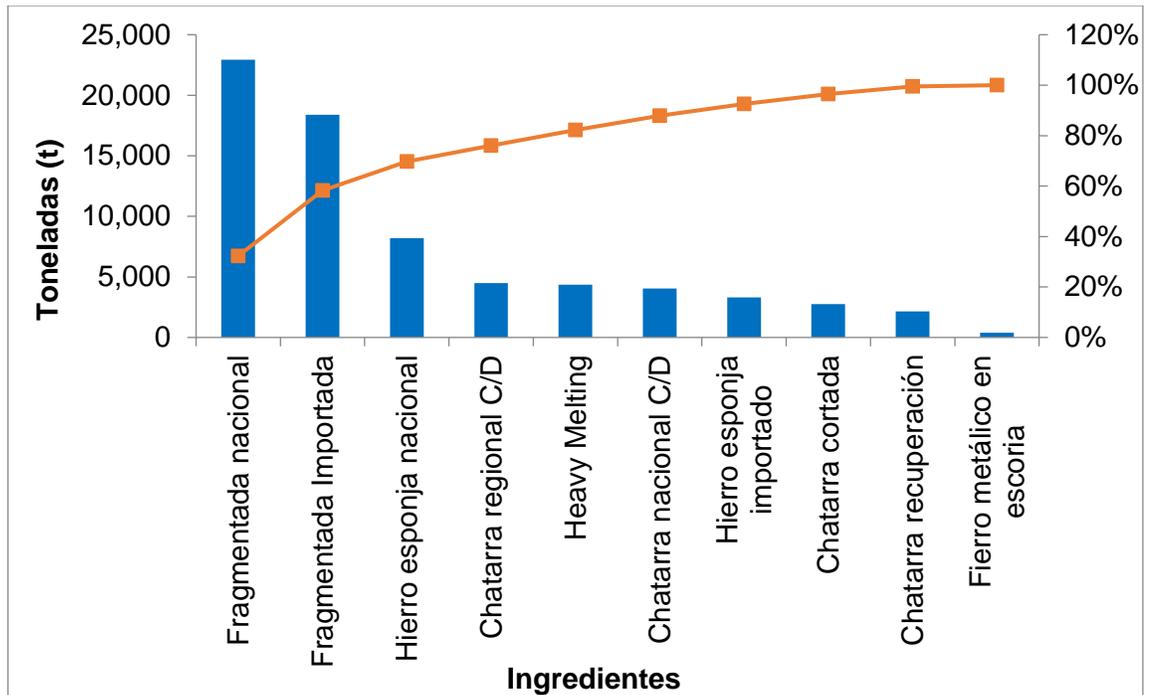
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4 Consumo por ingrediente y número de productos en los que se consumen de la prueba N°2



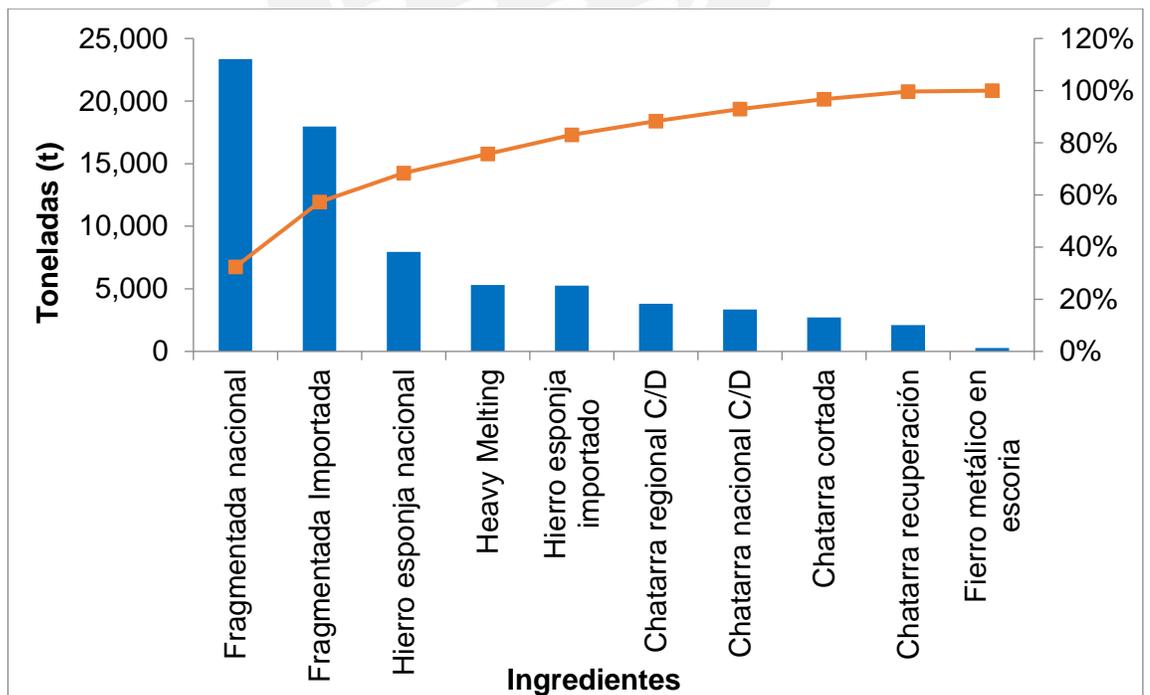
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.5 Consumo por grupo de ingredientes en prueba N°1



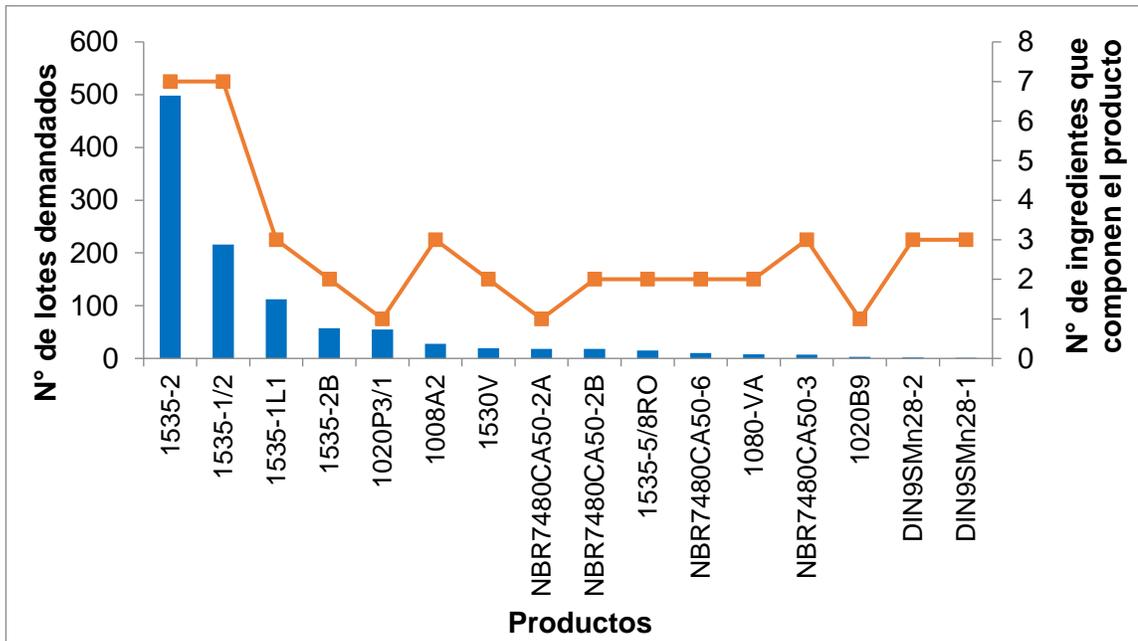
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6 Consumo por grupo de ingredientes en prueba N°2



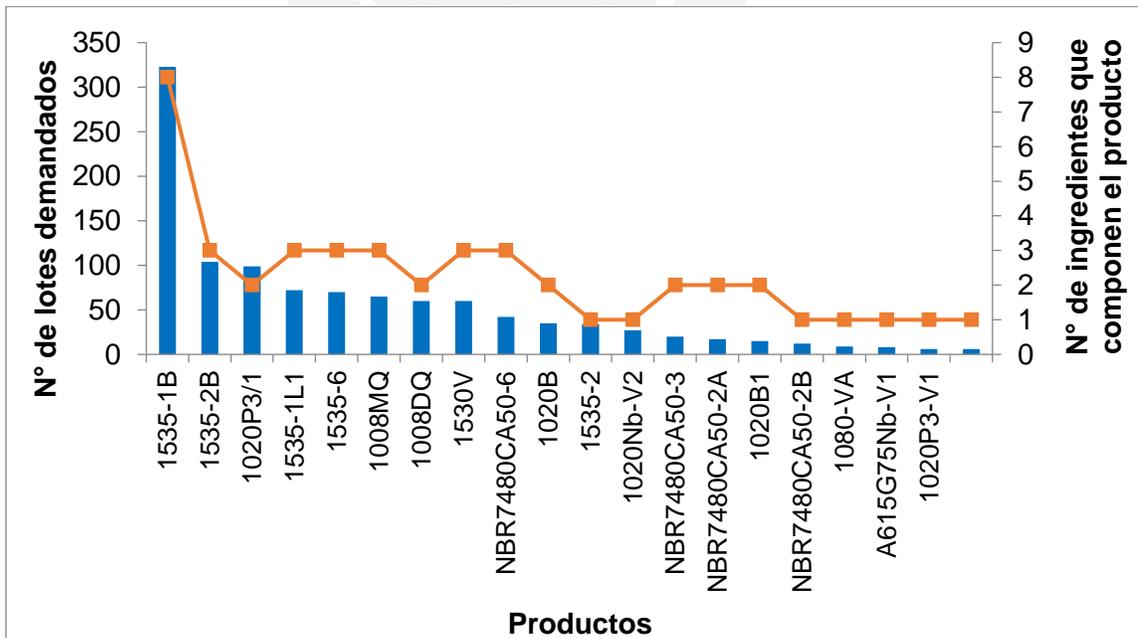
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.7 Demanda por producto y número de ingredientes que los componen de la prueba N°1



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.8 Demanda por producto y número de ingredientes que los componen de la prueba N°2



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de Sensibilidad

A continuación, se presenta el análisis de sensibilidad para las dos pruebas realizadas del modelo propuesto, el cual se dividirá en dos partes: análisis de los coeficientes de costo de los ingredientes y análisis de los lados derechos de las restricciones.

4.2.1. Variaciones de los coeficientes de costo de los ingredientes

A partir del reporte obtenido al emplear la herramienta LINGO, es posible identificar qué ingredientes se han consumido como parte del mix de carga y cuáles no. En las Tablas Tabla 4.2 y Tabla 4.3 se aprecian los ingredientes empleados y el valor de consumo de cada uno para las pruebas N°1 y N°2 respectivamente, así como los rangos en los que sus coeficientes de costo podrían ser modificados sin alterar la base óptima actual; es decir, sin cambiar el conjunto de variables básicas de la solución óptima actual. En el caso de un problema de minimización como este, mejorar el coeficiente significaría reducir el costo del material. Es importante señalar que el cambio es un coeficiente a la vez, manteniendo el resto de parámetros del modelo sin cambios.

A continuación, se señalan algunos aspectos de los resultados mostrados en las tablas Tabla 4.2 y Tabla 4.3:

1. Sobre los incrementos indefinidos permisibles de los costos unitarios de los ingredientes:

- a. Para los ingredientes chatarra fragmentada nacional, chatarra fragmentada importada, chatarra heavy melting 1y2 (80/20), chatarra cortada y hierro esponja importado (D.R.I):

Estos ingredientes permiten un incremento indefinido del valor actual de su costo unitario. Esto se debe a la política de inventarios de la compañía, la cual exige satisfacer el consumo de un grupo de materiales dentro de un rango específico. Cada uno de estos ingredientes conforman por sí solos un grupo definido en la política, las cuales actualmente sólo satisfacen la condición mínima de consumo exigida; por ello, al incrementar el costo unitario de cualquiera de estos ingredientes el consumo de los mismos se mantendrá igual para poder satisfacer por lo menos el consumo mínimo exigido. Este aspecto ayuda a entender que, si bien el costo puede incrementarse indefinidamente, no significa que la empresa esté dispuesta a pagar precios tan elevados.

Tabla 4.2 Variaciones permisibles de los coeficientes de costo de los ingredientes en la prueba N°1

Ingrediente	Consumo actual (t)	Costo unitario actual (\$/t)	Máximo incremento permisible del costo unitario (\$/t)	Máxima disminución permisible del costo unitario (\$/t)	Máximo incremento del costo unitario (%)	Máxima disminución del costo unitario (%)
Chatarra fragmentada nacional	22,925	349.66	Infinito	276.82		79.2%
Chatarra fragmentada importada	18,382	383.39	Infinito	312.89		81.6%
Chatarra heavy melting 1y2 (80/20)	4,350	374.81	Infinito	304.31		81.2%
Chatarra cortada	2,750	306.32	Infinito	235.83		77.0%
Chatarra liviana	3,385	295.69	3.75	0.66	1.3%	0.2%
Chatarra preparada	153	295.03	0.66	Infinito	0.2%	100.0%
Chatarra de embutición	24	308.71	Infinito	13.02		4.2%
Chatarra de recorte industrial	475	268.86	27.61	Infinito	10.3%	100.0%
Chatarra pesada importada	4,375	332.19	Infinito	8.65		2.6%
Chatarra paquete importado	105	322.75	8.65	Infinito	2.7%	100.0%
Mezcla de hierro esponja de pellets	683	361.08	Infinito	47.15		13.1%
Mezcla de hierro esponja de pellets y mineral	7,520	313.93	47.15	Infinito	15.0%	100.0%
Hierro esponja importado (D.R.I.)	3,298	365.67	Infinito	295.96		80.9%
Fierro metálico de escoria	378	54.83	177.73	43.74	324.2%	79.8%
Chatarra recuperación producción acería	110	327.38	32.62	Infinito	10.0%	100.0%
Chatarra recuperación producción laminado	480	360.00	Infinito	32.62		9.1%
Chatarra de recuperación de planta	1,565	309.26	50.74	Infinito	16.4%	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3 Variaciones permisibles de los coeficientes de costo de los ingredientes en la prueba N°2

Ingrediente	Consumo actual (t)	Costo unitario actual (\$/t)	Máximo incremento permisible del costo unitario (\$/t)	Máxima disminución permisible del costo unitario (\$/t)	Máximo incremento del costo unitario (%)	Máxima disminución del costo unitario (%)
Chatarra fragmentada nacional	23,363	342.80	Infinito	265.48		77.4%
Chatarra fragmentada importada	17,968	377.08	Infinito	302.25		80.2%
Chatarra heavy melting 1y2 (80/20)	5,300	369.50	Infinito	294.67		79.7%
Chatarra cortada	2,700	317.42	Infinito	242.60		76.4%
Chatarra liviana	2,793	291.66	0.23	3.83	0.1%	1.3%
Chatarra preparada	190	287.83	3.83	Infinito	1.3%	100.0%
Chatarra de recorte industrial	277	277.35	15.14	Infinito	5.5%	100.0%
Magnético de recuperación fragmentadora	76	262.36	25.97	Infinito	9.9%	100.0%
Chatarra pesada importada	3,702	329.78	Infinito	2.94		0.9%
Chatarra paquete importado	105	326.00	2.94	Infinito	0.9%	100.0%
Mezcla de hierro esponja de pellets	5,957	401.78	Infinito	2.43		0.6%
Mezcla de hierro esponja de pellets y mineral	2,000	399.35	2.43	Infinito	0.6%	100.0%
Hierro esponja importado (D.R.I.)	5,254	365.40	Infinito	291.40		79.7%
Fierro metálico de escoria	268	58.20	171.19	2.68	294.1%	4.6%
Chatarra recuperación producción acería	154	327.38	32.62	Infinito	10.0%	100.0%
Chatarra recuperación producción laminado	494	360.00	Infinito	32.62		9.1%
Chatarra de recuperación de planta	1,458	302.19	57.81	Infinito	19.1%	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

- b. Para los ingredientes chatarra pesada importada, mezcla de hierro esponja de pellets y chatarra recuperación producción laminado:

Al igual que los ingredientes del párrafo anterior, los incrementos infinitos permisibles se deben a la política de inventarios de la compañía, la cual exige satisfacer el consumo de un grupo de materiales dentro de un rango específico. Estos ingredientes forman parte de distintos grupos, los cuales actualmente sólo satisfacen la condición mínima de consumo exigida. Cada uno de estos ingredientes son los de mayor costo unitario dentro de cada uno de sus respectivos grupos, por lo cual al incrementar el costo unitario de cualquiera de estos ingredientes el consumo de los mismos se mantendrá igual para poder satisfacer por lo menos el consumo mínimo exigido del grupo de ingredientes al que pertenecen.

- c. Para la chatarra de embutición (para la prueba N°1):

Este ingrediente permite un incremento indefinido del valor actual de su costo unitario. Esto se debe a que se debe cumplir con la condición de un consumo mínimo de este material para la producción de dos calidades especiales. Actualmente, esta condición se cumple como una igualdad, por ello al aumentar el costo unitario de este ingrediente el consumo se mantendrá para poder satisfacer por lo menos el consumo mínimo exigido.

2. Sobre las reducciones indefinidas permisibles de los costos unitarios de los siguientes ingredientes:

- a. Para la chatarra preparada, chatarra de recorte industrial, magnético de recuperación fragmentadora (solo en prueba N°2), chatarra paquete importado, mezcla de hierro esponja de pellets y mineral, chatarra recuperación acería y chatarra recuperación de planta:

Estos ingredientes permiten una reducción indefinida del valor actual de su costo unitario. Esto se debe a que estos ingredientes actualmente se consumen en su totalidad. El problema de minimización dará prioridad a los ingredientes de menor costo; si actualmente ya se consumen al 100%, reducir el costo no impactará en modificar los consumos totales de cada ingrediente, aunque sí tendrá impacto en el valor de la solución óptima.

3. Sobre los incrementos y reducciones permisibles de los costos unitarios de los ingredientes que están acotados:

Se puede observar que la mayor parte de los ingredientes que actualmente se consumen son muy susceptibles ante un incremento de sus costos unitarios. Por ejemplo, el caso más crítico es el de la chatarra preparada para la prueba N°1 y la chatarra liviana para la prueba N°2, ya que incremento de 0.66 \$/t y 0.23 \$/t respectivamente puede ocasionar que los consumos de los materiales se alteren, y probablemente se opte por consumir otro ingrediente en lugar de estos. En el otro extremo, y casi como un caso aislado, el fierro metálico de escoria puede incrementar su costo unitario hasta en 177.73 \$/t en la prueba N°1 y en 171.19 \$/t en la prueba N°2, y aun así mantener su consumo actual, esto debido principalmente al bajo costo unitario que actualmente tiene este ingrediente (54.83 \$/t).

Por otro lado, muchos de los ingredientes permiten reducciones en su costo unitario entre 70% y 80% de su valor actual; esto tiene sentido si el problema de minimización prioriza los consumos de los ingredientes con menor costo unitario. Sin embargo, hay materiales como la chatarra liviana en el caso de la prueba N°1 en la que una reducción mínima de su costo unitario (0.66 \$/t) hace que la solución óptima actual cambie.

Al realizar cambios de los coeficientes de costo de los ingredientes, esto tendrá un impacto en el valor de la solución. Siempre y cuando la variación de estos coeficientes de costos esté en el rango donde la base óptima actual no cambia, el impacto o variación en el valor de la solución se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Delta Z = \Delta CU_i \times X_i$$

Donde

Z = Valor de la solución óptima

CU_i = Costo unitario del ingrediente i

X_i = Consumo del ingrediente i

Así, por ejemplo, si el costo unitario de la chatarra fragmentada nacional se incrementa en \$10 para la prueba N°1, la variación en el valor de la solución será la siguiente:

$$\Delta Z = 10 \times 22,925 = 229,250 \text{ dólares}$$

Por otro lado, si el costo unitario del fierro metálico de escoria se reduce en \$2 para la prueba N°2, la variación en el valor de la solución será como sigue:

$$\Delta Z = (-2) \times 268 = -536 \text{ dólares}$$

Analizados los coeficientes de costo de los ingredientes que sí se han consumido, se procede a revisar aquellos materiales que no se hayan consumido en ninguna proporción, es decir, que no forman parte de la solución óptima del problema, los cuales tienen asociado un costo reducido, entendiéndose por este último concepto como la magnitud en que debe mejorar el coeficiente de costo de cada ingrediente para que esta forme parte de la solución óptima. De esta manera, un ingrediente que ya forma parte de la solución óptima tendrá un costo reducido de valor cero, ya que al formar parte de la solución actual no necesitan mejorar el valor de su coeficiente; por el contrario, aquellos ingredientes que no se han consumido en la actual solución sí tienen costos reducidos diferentes de cero. En las Tablas Tabla 4.4 y Tabla 4.5 se observan aquellos ingredientes que se no se han consumido con su respectivo costo reducido para las pruebas N°1 y N°2 respectivamente.

Podemos observar que los costos unitarios de la chatarra tarros de leche, chatarra pesada y chatarra liviana compactada necesitan mejorar (en este caso, reducir) sus valores en 3.75 \$/t, 5.37 \$/t y 4.28 \$/t respectivamente del valor de su costo actual para pasar a formar parte de la solución básica en la prueba N°1, es decir, ser considerados como uno de los ingredientes a utilizar para la solución del problema planteado. Por otro lado, la chatarra compactada de tercera y la chatarra compactada de embutición tipo "a" deben reducir su costo unitario en 79.59 \$/t y 158.50 \$/t respectivamente para formar parte de la solución óptima de la prueba N°2, lo cual puede resultar difícil de lograr en el mercado actual.

4.2.2. Variaciones de los lados derechos de las restricciones

Así como los coeficientes de costo permiten variaciones donde la solución óptima no cambia, es posible analizar las variaciones permitidas de los lados derechos de las restricciones. En los resultados obtenidos se puede diferenciar aquellas restricciones que se satisfacen como una igualdad y aquellas que tienen holgura o excedentes. Estas dos últimas son aquellas que no satisfacen una condición de igualdad en una restricción

Tabla 4.4 Costos reducidos y variaciones permisibles de los coeficientes de costos de los ingredientes no empleados en la prueba N°1

Ingrediente	Consumo actual (t)	Costo reducido	Costo unitario actual (\$/t)	Máximo incremento permisible del costo unitario (\$/t)	Máxima reducción permisible del costo unitario (\$/t)
Chatarra de tarros de leche	0	3.75	349.66	Infinito	3.75
Chatarra pesada	0	5.37	383.39	Infinito	5.37
Chatarra liviana compactada	0	4.28	374.81	Infinito	4.28
Chatarra compactada tercera	0	76.37	306.32	Infinito	76.37
Chatarra compactada embutición tipo "a"	0	154.52	295.69	Infinito	154.52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5 Costos reducidos y variaciones permisibles de los coeficientes de costos de los ingredientes no empleados en la prueba N°2

Ingrediente	Consumo actual (t)	Costo reducido	Costo unitario actual (\$/t)	Máximo incremento permisible del costo unitario (\$/t)	Máxima reducción permisible del costo unitario (\$/t)
Chatarra de tarros de leche	0	0.23	286.90	Infinito	0.23
Chatarra pesada	0	5.61	297.26	Infinito	5.61
Chatarra de embutición	0	21.31	312.97	Infinito	21.31
Chatarra liviana compactada	0	6.14	294.48	Infinito	6.14
Chatarra compactada tercera	0	79.59	367.92	Infinito	79.59
Chatarra compactada embutición tipo "a"	0	158.50	450.99	Infinito	158.50

Fuente: Elaboración propia

y pueden interpretarse como la cantidad utilizada por encima de algún nivel mínimo requerido (exceso) o la cantidad de recurso no utilizado (holgura).

El presente análisis se enfocará en las restricciones que satisfacen una condición de igualdad, las cuales tienen asociadas un precio dual, el cual se puede interpretar como la magnitud en que el valor de la solución óptima mejorará al disponer de una unidad adicional de recurso disponible. Interpretándolo de otra manera, el precio dual permite identificar cuánto se está dispuesto a pagar por una unidad más de recurso disponible con el objetivo de mejorar el resultado de la solución óptima. En las Tablas Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se muestran las restricciones que satisfacen una condición de igualdad y su precio dual asociado (distinto de cero), así como las variaciones permitidas para sus lados derechos.

A continuación, se señalan algunos aspectos de los resultados mostrados en las Tablas Tabla 4.6 y Tabla 4.7:

1. Sobre el stock disponible de los ingredientes:

El principal recurso que limita la solución del problema es la disponibilidad de los ingredientes para conformar el mix de carga. Los ingredientes listados son aquellos que se consumen en su totalidad, principalmente por su bajo costo unitario. Por ello, se observa que los precios duales tienen valores mayores a cero, ya que, al incrementar la disponibilidad de alguno de los ingredientes en una unidad, la solución probablemente opte por consumir ésta en lugar de otro material. Sin embargo, los precios duales que se indican son bajos en comparación a los costos actuales de los materiales. Por ejemplo, tomando como referencia la chatarra de recuperación de planta, el cual es el ingrediente de mayor precio dual de ambas pruebas, su costo dual es de \$50.74 y \$57.81 para las pruebas N°1 y N°2 respectivamente, pero su costo unitario es 6 veces mayor, por lo cual se hace difícil conseguir una unidad adicional de este recurso a un precio tan por debajo del costo actual.

2. Sobre los consumos mínimos exigidos por las políticas de inventario de la empresa:

Las políticas de inventario de la compañía exigen que los consumos de los grupos de ingredientes oscilen en un rango determinado. Analizando los resultados, se observa que actualmente casi todas las políticas se cumplen como una igualdad en el valor mínimo de consumo exigido (excepto la chatarra de hierro metálico de

Tabla 4.6 Variaciones permisibles de los lados derechos de las restricciones de la prueba N°1

Restricción	Lado derecho actual (t)	Precio dual (\$/t)	Máximo incremento permisible del lado derecho (t)	Máxima reducción permisible del lado derecho (t)
Stock disponible de chatarra preparada	153	0.66	3384.99	152.77
Stock disponible de recorte industrial	475	27.61	3384.99	151.44
Stock disponible de chatarra paquete importado	105	8.65	16.98	17.22
Stock disponible de mezcla de pellets y mineral	7,520	47.15	683.33	1,144.52
Stock disponible de chatarra de recuperación de acería	110	32.62	480.28	110.08
Stock disponible de chatarra de recuperación de planta	1,565	50.74	480.28	1,411.60
Consumo de chatarra embutición en calidad DIN9SMn28-1	8	-13.02	16.98	8.00
Consumo de chatarra embutición en calidad DIN9SMn28-2	8	-26.04	8.49	8.00
Política de consumo mínimo de Fragmentada nacional	22,925	-276.82	117.13	16.85
Política de consumo mínimo de Fragmentada importada	18,382	-312.89	121.04	17.41
Política de consumo mínimo de Heavy melting	4,350	-304.31	121.04	17.41
Política de consumo mínimo de Chatarra cortada	2,750	-235.83	121.04	17.41
Política de consumo mínimo de Chatarra nacional	4,037	-225.98	122.40	17.60
Política de consumo mínimo de Chatarra regional	4,480	-261.69	121.04	17.41
Política de consumo mínimo de Hierro esponja nacional	8,203	-295.28	129.68	18.65
Política de consumo mínimo de Hierro esponja importado	3,298	-295.96	122.40	17.60
Política de consumo mínimo de Chatarra recuperación	2,155	-285.59	114.67	16.49

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Variaciones permisibles de los lados derechos de las restricciones de la prueba N°2

Restricción	Lado derecho actual (t)	Precio dual (\$/t)	Máximo incremento permisible del lado derecho (t)	Máxima reducción permisible del lado derecho (t)
Stock disponible de chatarra preparada	190	3.83	972.47	189.93
Stock disponible de recorte industrial	277	15.14	98.07	277.23
Stock disponible de magnético de recuperación de fragmentadora	76	25.97	513.09	76.15
Stock disponible de chatarra paquete importado	105	2.94	506.60	104.73
Stock disponible de mezcla de pellets y mineral	2,000	2.43	543.63	928.32
Stock disponible de chatarra de recuperación de acería	154	32.62	493.50	153.59
Stock disponible de chatarra de recuperación de planta	1,458	57.81	493.50	1326.68
Política de consumo mínimo de Fragmentada nacional	23,363	-265.48	72.15	228.92
Política de consumo mínimo de Fragmentada importada	17,968	-302.25	74.56	236.55
Política de consumo mínimo de Heavy melting	5,300	-294.67	74.56	236.55
Política de consumo mínimo de Chatarra cortada	2,700	-242.60	74.56	236.55
Política de consumo mínimo de Chatarra nacional	3,336	-217.66	75.39	239.21
Política de consumo mínimo de Chatarra regional	3,807	-254.95	74.56	236.55
Política de consumo mínimo de Hierro esponja nacional	7,957	-331.94	79.88	253.45
Política de consumo mínimo de Hierro esponja importado	5,254	-291.40	31.95	239.21
Política de consumo mínimo de Chatarra recuperación	2,105	-281.01	70.63	224.10

Fuente: Elaboración propia

escoria). Esto hace indicar que las políticas de consumo son muy rígidas y limitan la solución del problema. Asimismo, al revisar el signo de los precios duales, estos son menores a cero, lo que significa que para lograr una mejora del valor de la función objetivo se debe reducir, y no aumentar, el lado derecho de estas restricciones. De esta manera, reduciendo el valor del consumo mínimo exigido se amplía el rango de consumos permitidos y se podría obtener una mejora del valor de la función objetivo; asimismo, estas variaciones no representan en muchos casos ni el 1% del consumo mínimo actual exigido, por lo cual se podría optar por ajustar las políticas en búsqueda de lograr mayores beneficios.

3. Sobre el consumo mínimo de chatarra de embutición para calidades especiales:

En la prueba N°1, se solicita la fabricación de dos calidades especiales que requieren un consumo mínimo de 8 toneladas de chatarra embutición para la composición de cada lote. Este consumo mínimo podría generar beneficios hasta por \$26 por cada unidad que se reduzca este consumo mínimo (esto debido a que el precio dual es menor a cero). Sin embargo, esta decisión no puede ser analizada con la información actual, ya que como se indica este tipo de ingrediente se exigen debido a que confiere ciertas propiedades al producto final para su posterior tratamiento, las cuales no se incluyen dentro del alcance del modelo propuesto.

Similar al caso de los coeficientes de costo, la variación del valor de la solución óptima también se puede calcular a partir de la variación que se plantea para los lados derechos de las restricciones. En el caso de un problema de minimización como el que se plantea, la variación del valor de la función objetivo se puede calcular de la siguiente manera siempre y cuando la variación de los lados derechos caiga dentro del rango en donde la base óptima no cambia:

$$\Delta Z = -\Delta L_h \times PD_h$$

Donde

Z = Valor de la solución óptima

L_h = Lado derecho de la restricción h

PD_h = Precio dual de la restricción h

Por ejemplo, el consumo de la chatarra de recorte industrial en la prueba N°2 es de 277 toneladas, el cual representa todo el stock disponible de este ingrediente para esta prueba. Si se dispusiera de 50 toneladas adicionales al stock actual de este ingrediente, el valor de la función objetivo tendría una variación de la siguiente forma:

$$\Delta Z = -(50) \times 15.14 = -757 \text{ dólares}$$

En otro caso, para prueba N°1 se exige un consumo mínimo de 4,350 toneladas de chatarra heavy melting de acuerdo a la política de inventarios establecida. Si se decidiera modificar la política y reducir el consumo mínimo exigido de este ingrediente en 15 toneladas se tendría una variación de la función objetivo de:

$$\Delta Z = -(-15) \times (-304.31) = -4,564.65 \text{ dólares}$$



CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo, se presentará el análisis económico sobre la implementación del modelo propuesto en la empresa Siderúrgica S.A. Para ello, se realizará un análisis costo-beneficio y se elaborará un flujo de caja proyectado a un año.

5.1. Costos

En primer lugar, se analizan los costos que se deben incurrir para una adecuada implementación del modelo. El desembolso de dinero estará relacionado con el costo de adquisición de las licencias de los dos softwares utilizados (LINGO y MS Excel). Asimismo, hay que considerar el costo de los diversos trabajadores de la empresa que deberán involucrarse y capacitarse para el manejo adecuado del software, principalmente el personal del área de Metálicos.

Considerando los conceptos antes expuestos, se muestra en la Tabla 5.1 la estructura de costos considerada para la inversión inicial:

Tabla 5.1 Inversión inicial para la implementación del modelo

Concepto	Horas	Costo/hora (\$)	Total (\$)
Licencia LINGO 17.0 Versión Extendida ⁴	-	-	12,495
Desarrollo del modelo	100	45.00	4,500
Revisión y validación del modelo	80	36	2,880
Capacitación	60	30	1,800
Licencia Microsoft Excel Profesional 2016 ⁵	-	-	560
			22,235

Elaboración propia.

Adicionalmente se estará considerando el costo de un personal dedicado al mantenimiento y actualización mensual del modelo, ya que las condiciones de la producción podrían variar en algunos parámetros. El costo estimado asciende a \$500 mensuales.

⁴ Costo referencial obtenido en: <http://www.lindo.com>

⁵ Costo referencial obtenido en: <http://www.microsoft.com>

5.2. Beneficios

Para determinar los beneficios que se obtendrán al implementar el modelo propuesto, consideraremos como beneficio (ingresos) el ahorro mensual neto que se obtuvo como resultado en cada uno de los dos períodos de prueba analizados (ver Tabla 4.1).

Además del ahorro generado por la mezcla de materiales, se debe considerar un ahorro adicional por la disminución en el consumo energético logrado gracias a la mejora en el rendimiento de la producción. Como se mencionó en el diagnóstico realizado en el segundo capítulo, por cada 1% de mejora en el rendimiento de las coladas se logra una reducción del consumo energético aproximado de 10 kWh/t. Como se observa en , el rendimiento total de la producción ha experimentado una mejoría en ambas pruebas respecto a la solución actual, mejorando en 1.68% para el caso de la prueba N°1 y 2.32% para la prueba N°2. Con esta información es posible calcular el ahorro generado por el menor consumo energético, sabiendo que el costo energético que tiene la planta productiva es de 0.07 \$/kWh y aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Ahorro por consumo energético} = 10 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \times 0.07 \frac{\$}{\text{kWh}} \times \Delta \text{Rendimiento} \times D_l$$

Donde D_l es la demanda de acero líquido (en toneladas) para cada prueba.

Tras aplicar la fórmula anterior, se obtiene un ahorro de \$75,272 y \$105,734 para las pruebas N°1 y N°2 respectivamente.

Tabla 5.2 Resultados de rendimiento de las pruebas N°1 y N°2

	PRUEBA	
	N° 1	N° 2
Consumo actual PCP (t)	72,302	73,961
Consumo total prueba (t)	70,956	72,058
Acero líquido requerido	64,020	65,040
Rendimiento actual	88.55%	87.94%
Rendimiento prueba	90.22%	90.26%
Diferencia de rendimiento	1.68%	2.32%

Elaboración propia.

A manera de resumen, se muestra en la Tabla 5.3 el ahorro total por cada una de las pruebas realizadas:

Tabla 5.3 Ahorro total generado en las pruebas N°1 y N°2

	PRUEBA	
	N° 1	N° 2
Consumo total prueba (t)	70,956	72,058
Ahorro por consumo de ingredientes (\$)	836,248	626,246
Ahorro por consumo energético (\$)	75,272	105,734
Ahorro total (\$)	911,520	731,980
Ahorro por tonelada consumida (\$/t)	12.85	10.16

Elaboración propia.

5.3. Flujo de caja proyectado

Para la evaluación económica del modelo, evaluaremos los dos periodos de prueba analizados correspondientes a dos meses consecutivos, considerando las salidas (desembolsos) e ingresos (ahorros) de dinero esperados a partir de la implementación del modelo. Los flujos de caja en cada periodo se aprecian en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Flujo de caja proyectado en dólares americanos (\$)

Período	Salidas	Ingresos	Flujo neto de caja
0	22,235		-22,235
1	500	911,520	911,020
2	500	731,980	731,480

Elaboración propia.

Considerando un costo de capital de la empresa (WACC) de 18% anual para el análisis de la inversión (equivalente a una tasa de 1.39% mensual), obtenemos un valor actual neto de \$1,566,132, con lo cual concluimos que nuestro proyecto de implementación de un modelo de programación lineal para la configuración del mix de carga metálica es rentable, y que su implementación debería ejecutarse en el menor tiempo posible.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo, se procederá a exponer las conclusiones y recomendaciones finales a partir del modelo planteado para la programación de la producción en la empresa Siderúrgica S.A:

6.1. Conclusiones

- Se tomó como base el modelo propuesto por Kim y Lewis (1987), al cual se le hicieron modificaciones para que el modelo se ajuste a las características particulares del proceso desarrollado en la empresa Siderúrgica S.A.
- El modelo de programación lineal propuesto se ajusta a las necesidades de la empresa y los resultados obtenidos son significativamente mejores que los actuales.
- La primera prueba realizada logró un ahorro total de \$836,248 y la segunda un ahorro de \$626,246 con respecto a la situación actual en cada periodo evaluado por concepto de consumo de materiales, representando 3% y 2.6% de los costos totales de materiales actuales respectivamente. Asimismo, se obtuvo un ahorro por consumo energético de \$75,272 y \$105,734 en las pruebas N°1 y N°2 respectivamente.
- El valor actual neto de implementar el modelo propuesto, considerando costo de capital anual de 18%, asciende a \$1,566,132, con lo que se concluye que el proyecto es rentable y se recomienda su implementación en el menor tiempo posible.
- El consumo de ingredientes se vio reducido en 1,346 toneladas para el caso de la primera prueba y en 1,905 para la segunda, lo cual tiene un impacto directo sobre el costo total del mix de carga metálica. A pesar que la reducción de consumo de materiales fue mayor en la segunda prueba, la primera obtuvo un ahorro por tonelada de material consumido de 12.85 \$/t, mientras que la segunda obtuvo un ahorro de y 10.16 \$/t. Además, se observa que se mantiene una estructura en el consumo por grupos de ingredientes, debido a la política de consumo e inventarios que establece el área de Planificación de la empresa.
- El modelo planteado es de naturaleza estática, mientras la realidad de la empresa es dinámica. El plan de carga propuesto por el modelo debe tomarse como una referencia hacia la cual debe apuntar los objetivos de la programación y consumo

real de la empresa, mas no restringirla al cumplimiento exacto de lo indicado por el modelo, pues hay situaciones que pueden escapar del alcance del modelo.

- Se ha obviado el carácter recirculante de los materiales de recuperación, ya que a diferencia del modelo base de Kim y Lewis (1987) no es posible actualmente medir la trazabilidad del origen de dichos materiales, ya que todos se acumulan en un mismo lote.
- El empleo de una interfaz más amigable para los usuarios como lo es el MS Excel permitirá que los usuarios, a pesar de que no puedan contar con conocimientos expertos en programación lineal, puedan interpretar los resultados obtenidos e ingresar y actualizar información que permitan realizar distintas corridas del modelo propuesto.
- El hecho de que la configuración actual del mix de carga agrupe a los productos por calidades afines puede considerarse un factor importante que derive en un consumo mayor de ingredientes, ya que, al analizar producto por producto, y no por grupos, se tiene una precisión mayor de la cantidad exacta de materiales a emplear por cada lote del mismo producto, mientras que si se considera el mismo mix para varios productos se puede caer en un consumo excesivo de algún tipo de material. Asimismo, la configuración del mix de carga por cada producto, asegura el cumplimiento de las restricciones de composición química y que la calidad de los productos no se vea afectada.
- El modelo propuesto permite obtener el menor costo de materiales para el mix de carga compuesto por varios lotes de producción de diferentes productos (calidades) en un horizonte de tiempo determinado. Sin embargo, debe considerarse que el modelo no necesariamente permitirá obtener el mínimo costo para cada lote en específico. Es decir, al emplear el modelo actual podría darse el caso de que ciertos lotes actualmente tengan un mix de materiales a menor costo que el que se obtenga con el modelo propuesto.

6.2. Recomendaciones

- El hecho de aplicar un modelo matemático para resolver una situación problemática no quiere decir que se deje de lado la experiencia de los dueños del proceso, ya que es esta experiencia la que permitirá al modelo alcanzar su máximo potencial.

- Los datos de entrada deben ser actualizados mensualmente, según la disponibilidad de ingrediente, evaluación de costos de los mismos y la demanda de cada uno de los productos planificados en el programa de producción de acería.
- La aplicación del modelo deberá ejecutarse previo al inicio del horizonte de planificación, de modo que los resultados puedan ser validados por los encargados del proceso con anticipación.
- Se recomienda que el modelo, previo a su implementación, reciba la validación no solo del personal del área de metálicos, sino también de los otros subprocesos que se desarrollan dentro de la planta de acería; de esa manera, se podrá asegurar que el modelo no arroje resultados incorrectos que afecten a los siguientes procesos.
- Es conveniente simplificar el modelo lo máximo posible siempre y cuando no se comprometa la calidad de la información. El tiempo de demora en adecuar el modelo a circunstancias especiales puede resultar bastante extenso para ciertas situaciones.
- Si bien se recomienda simplificar el modelo, hay ciertas consideraciones que podrían mejorar el modelo propuesto. Una de ellas es considerar la capacidad volumétrica del horno de fundición para cual es importante medir la densidad aparente de los ingredientes, ya que no todos los ingredientes ocupan el mismo espacio, de modo que se puedan validar tanto las condiciones de capacidad máxima del horno en peso y volumen.
- Se debe considerar que, por la misma naturaleza y procedencia de la chatarra de compra, la composición química de estos materiales tiene un cierto nivel de incertidumbre. Por ello, una adecuada clasificación de estos materiales al momento de su recepción permitirá obtener mejores resultados en el modelo propuesto. Asimismo, debido a esta incertidumbre propia del material, el control de calidad y el proceso de afino posterior a la colada mantiene una importancia relevante para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de calidad de cada producto.
- Para un buen funcionamiento del modelo se recomienda:
 - Contar con información de entrada validada y actualizada.
 - Contar con visibilidad de los ingresos de los ingredientes con los que se elaborará el mix de carga en el horizonte de planificación.

- Contar con la capacidad de interpretar los resultados arrojados por el modelo, de modo que permita a los usuarios del proceso la toma de decisiones en favor del proceso.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, David y Dennis J. SWEENEY y Thomas WILLIAMS

1999 Modelos cuantitativos para los negocios. Séptima edición. México D.F: International Thomsom Editores S.A. de C.V

GONZALEZ, Ángel

2010 Manual práctico de investigación de operaciones I. Tercera edición revisada y aumentada. Barranquilla: Ediciones Uninorte.

HILLIER, F.S y G.J. LIEBERMAN

2004 Investigación de Operaciones. Séptima edición. México D.F: McGraw-Hill

KIM, J. Y R. L. LEWIS

1987 "A large scale linear programming application to least cost charging for foundry melting operations". Transactions of the American Foundrymen's Society. Volumen 95, pp. 735-744

LINDO Systems Inc.

2017 Single User prices and Specifications.
URL:<<http://www.lindo.com/prices/CommercialPrices.pdf>.> Consulta: 2 de diciembre de 2017.

LINDO Systems Inc.

2008 Lingo Users Guide. Chicago: LINDO Systems Inc.

MARTÍNEZ, J. Y J. CABREJOS

2011 Aplicación de un modelo de programación lineal para la minimización del costo de uso de ingredientes en una planta de fundición de estaño. Tesis de maestría en Ingeniería Industrial. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Graduados.

MAYO, Daniel

- 2005 Desarrollo de un modelo de optimización de la producción en una empresa textil utilizando la programación lineal entera mixta. Tesis de título en Ingeniería Industrial. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA

- 2001 Diccionario de la lengua española. Dos volúmenes. Vigésima segunda edición. Madrid: Dicionarios Espasa.
URL:<<http://buscon.rae.es/drae/srv/search?id=CjJiSdFr6DXX2QPdbi4T>>
Consulta: 14 de setiembre de 2013.

ROCA, Enrique

- 2014 Configuración de mix de carga metálica. Entrevista del 25 de mayo a José Apaza y Guilbert Cabrera.

ROCA, Enrique

- 2014 Política de Inventarios. Entrevista del 12 de mayo a Luis Arévalo.

ROCA, Enrique

- 2013 Proceso de Acería. Configuración de carga. Entrevista del 18 de noviembre a José Berna.

ROCA, Enrique

- 2013 Programación de la producción. Entrevista del 18 de noviembre a Manuel Santivañez.

SAKALLI, Umit y Burak BIRGOREN

- 2009 "A spreadsheet-based decision support tool for blending problems in brass casting industry". Computers & Industrial Engineering. Nueva York. Volumen 56, número 2, pp. 724-735.

SIBILLE, Alessio

2013 Análisis y Diseño de Sistemas. Sesión 8 – Diseño de Sistemas [diapositivas]. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

TAHA, Hamdy

2004 Investigación de operaciones. Séptima edición. México D.F.: Paerson Educación de México S.A. de C.V.

WINSTON, Wayne

2005 Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos. Cuarta edición. México D.F.: Thomsom Learning, Inc., International Thomsom Editores S.A. de C.V.

