



# Generación y selección óptima de opciones de destino de hornadas en fábricas siderúrgicas

## Optimal generation and selection hits destination options in steel making factories

Denis Joaquín Zambrano-Ortiz<sup>I</sup>, José Arzola-Ruiz<sup>II, \*</sup>, Rosa Mariuxi Litardo-Velásquez<sup>III</sup>

I. Universidad Técnica de Manabí, Departamento de Ingeniería Industrial, Manabí, Ecuador

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Matemática, CEMAT. La Habana, Cuba

III. Universidad Técnica de Manabí, Departamento De Ingeniería Química. Manabí, Ecuador

\*Autor de correspondencia: [jarzolacm@icb.cujae.edu.cu](mailto:jarzolacm@icb.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 16 de marzo de 2020

Aceptado: 25 de abril de 2020

### Resumen

A partir del análisis sistémico de la función de operación de la producción en fábricas siderúrgicas, se formula el modelo matemático conceptual de la tarea de selección de hornadas a utilizar por lotes de entrega a los clientes de la producción terminada de talleres siderúrgicos. Este modelo se descompone en sub-modelos de generación de opciones de destino, por hornadas en proceso, como una tarea de optimización estocástica discreta, y de selección de las hornadas a utilizar para cada uno de los lotes requeridos por el servicio de ventas, como una tarea de optimización en variables booleanas. Se elaboran y comparan entre sí

diferentes modelos de descripción de las propiedades mecánicas de las hornadas y se propone el esquema solución a la tarea de generación de opciones por el método de búsqueda exhaustiva. El modelado desarrollado queda disponible para su utilización práctica por los servicios de despacho de empresas siderúrgicas.

**Palabras claves:** operación de la producción siderúrgica; toma de decisiones; descomposición de tareas de optimización; sistemas de ingeniería.

### Abstract

Starting from the systemic analysis of the operation production function in steel factories, the conceptual mathematical model is formulated of the heats selection to be used for the lots delivery to the clients of the finished production of steel shops. This model breaks down in sub-models of the destination of options generation of heats in production process, as a discrete stochastic optimization task of the selection of the heats to be used for each one of the lots required by the sales service, as an optimization task in boolean variables. Have been elaborated and compared

different mechanical properties description of the heats models and proposed a solution outline solution of the options generation task by the exhaustive search method. The modeling work developed is available for it practical use by the despatching services of the steel companies.

**Key words:** operation of the steel making production; decision making; decomposition of optimization tasks; engineering systems.

### Cómo citar este artículo:

Zambrano Ortiz DJ, Arzola Ruiz J, Litardo Velásquez RM. Generación y selección óptima de opciones de destino de hornadas en fábricas siderúrgicas. Ingeniería Mecánica. 2020;23(2):e599. ISSN 1815-5944.

## Introducción

Una de las tareas de toma de decisiones asociada a la operación de procesos productivos no resuelta aun satisfactoriamente consiste en la selección óptima de productos en proceso para su transformación en producción terminada [1, 2, 3]. Por otra parte, en la industria productora de acero en general y las fábricas siderúrgicas de ciclo incompleto, en particular, el consumo de materiales y materias primas constituye más de un 70 % de los costos totales. Una inadecuada utilización de los lotes de semiproductos empleados en la producción terminada conduce directamente al incremento de todo tipo de costos de fabricación, lo que constituye el problema que se aborda en adelante.

En la literatura sobre dirección de la producción, se establecen dos esquemas principales de satisfacción de la demanda: la planificación por pedidos (PPP) y la planificación por inventarios (PPI) [4, 5, 6]. Para mejorar el aseguramiento de la calidad y reducir el costo de producción, las plantas de producción de acero necesitan combinar el PPP y el PPI, lo que ha sido estudiado por numerosos investigadores [4, 7]. Lo anterior resulta válido

para cualquier esfera de la producción material, incluida la producción de acero. El esquema de producción de las fábricas siderúrgicas se realiza por lotes de producción de perfiles en los talleres finales, entre los que se seleccionan los pedidos requeridos en cada momento significativo seleccionado por el sistema de despacho, lo que presupone un esquema híbrido PPP-PPI.

El estudio del proceso de toma de decisiones de operación se relaciona directamente a la estructura productiva. En el caso particular de la fábrica siderúrgica de ciclo incompleto de producción de perfiles ligeros, el proceso se inicia por la introducción de chatarra, ferroaleaciones y cal al proceso de fundición del acero, el que puede incluir la fusión en uno más hornos de fundición por arco eléctrico, el afino en horno de cuchara, y el vaciado en una o más instalaciones de vaciado continuo del acero, para su laminación posterior en trenes de laminación de perfiles: alambrón, barras corrugadas o barras lisas.

Por otra parte, la entrega de producción terminada debe asegurar el cumplimiento de las propiedades normadas, de acuerdo a cada uno de los pedidos, lo que nos conduce al problema de la determinación de propiedades mecánicas. En el trabajo *Materials Selection in Mechanical Design* [8], Ashby determina como mejores opciones de selección de materiales aquellas en las que se utilizan con mayor plenitud sus propiedades, es decir, aquellas en que se minimiza el exceso de propiedades, asegurando los valores requeridos de éstas para el cumplimiento de la designación de servicio. A partir de los trabajos básicos de Ashby muchos autores han desarrollado ideas específicas para la solución de tareas concretas. Así, Melouk W. [2] utiliza técnicas de simulación para estudiar el comportamiento de aceros en estructuras, utilizando el criterio de minimizar el exceso de propiedades obtenidas por simulación con respecto a las requeridas en el diseño de la estructura.

Arzola utiliza esta misma idea para la generación y selección de opciones de destino de las palanquillas en proceso [9 - 10], logrando introducir en explotación en los años 86 - 96 un sistema automatizado encargado de generar opciones de destino, las que eran seleccionadas por el personal de dirección de la calidad de una empresa siderúrgica, ratificando o redestinando las hornadas una vez laminadas de acuerdo a los ensayos mecánicos por el sistema de Aceptación – Rechazo desarrollado con este fin. En estos trabajos el destino de hornadas se asocia a la dirección general del proceso productivo de las empresas siderúrgicas, por lo que su estudio se realiza a partir de las tareas propias de la dirección de la producción [9]. Ese trabajo constituye el antecedente directo de la presente investigación.

En correspondencia con el esquema híbrido PPP-PPI, a partir de la carpeta de pedidos de los clientes, el Sistema de Dirección de la Producción elabora un plan de marcas destinado a satisfacer, con alta probabilidad y considerando la composición química media por marcas, los pedidos previstos por el plan de entrega para los próximos días. En la práctica de selección de hornadas para la laminación posterior, se utiliza precisamente una determinada correspondencia entre marcas de acero y propiedades mecánicas del perfil laminado, lo que constituye un error, pues estas propiedades dependen no propiamente de la marca de acero fabricada sino de la composición química real obtenida [9, 10]. El subsistema de dirección de la producción encargado de la determinación del destino de las hornadas selecciona cuales hornadas van a satisfacer determinados pedidos y cuales permanecen almacenadas en espera de su destino definitivo. Estas decisiones se rectifican en cada ocasión que se requiere seleccionar hornadas por diferentes destinos. En dependencia de las propiedades medidas, algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas.

En la práctica productiva de las empresas siderúrgicas, del sistema de dirección de las ventas se entrega la información consolidada de los pedidos desglosados en perfil, grado de calidad y longitud [10, 11]. El sistema de dirección de la producción elabora, por un lado, el plan de marcas a satisfacer por el taller de elaboración acero, de forma tal de asegurar, con alta probabilidad, el logro de las propiedades mecánicas deseadas de las hornadas producidas y, por el otro, entre las hornadas ya producidas determina cuales de ellas han de ser utilizadas por los diferentes destinos (pedidos consolidados, de acuerdo al plan de entregas elaborado por el servicio de ventas de la empresa). Según se estudia en adelante, la determinación de los destinos se puede y debe realizar en dos etapas: generación de opciones de destino, sobre la base de la composición química de la hornada recién producida, y selección de hornadas producidas por los diferentes destinos. Una vez laminadas las hornadas y realizados los ensayos mecánicos se verifica el cumplimiento real de las propiedades mecánicas. Las hornadas que cumplen estas propiedades conservan el destino original elegido y las que no cumplen son redestinadas de acuerdo a las propiedades verificadas. Algunas hornadas son seleccionadas en tiempo real para su laminación posterior y otras son almacenadas en espera de su destino definitivo. Una vez entregada al taller de laminación, la hornada se elimina del inventario de hornadas en proceso.

Las pocas soluciones que aparecen en la literatura vinculada a la selección de opciones de destino utilizan modelos matemáticos de gran complejidad, sin esquemas de descomposición que faciliten su solución [12]. En lo adelante, se procura avanzar en la solución de este problema, sobre la base de la aplicación de los resultados vinculados al análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería, que aparecen en [10].

El tema del modelado matemático de las propiedades mecánicas de los perfiles de acero como función de su composición química ha sido estudiado por numerosos autores, incluyendo a los del presente artículo. En la bibliografía predominan los modelos de regresión lineales y no lineales [5, 7, 9]. Los mejores resultados hasta el momento se obtienen con ayuda de las redes neuronales artificiales de tipo radial [13]. Estas propiedades

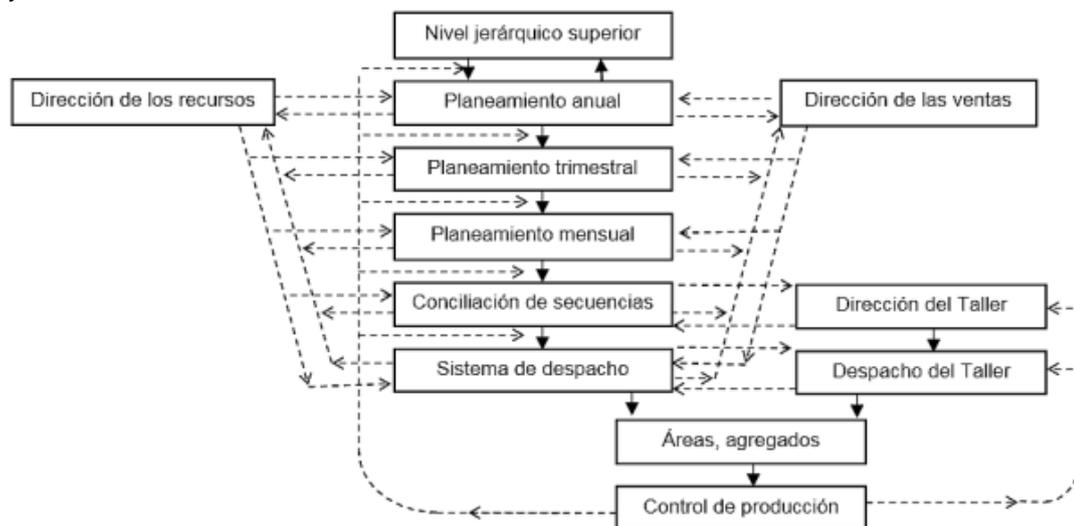
dependen también de los regímenes de deformación y calentamiento, lo que se estudia también en [9, 10], pero para un taller dado, con estos regímenes reglamentados, quedan como magnitudes variables tan solo la composición química. Este resultado, el modelado y esquema de generación de opciones propuestas en adelante, constituyen una sólida base para la solución del problema descrito.

## Métodos

El sistema de control de la calidad no puede permitir que no se aseguren las propiedades del acero vendido y, al mismo tiempo, debe velar por la efectividad económica de la empresa. Asimismo, el servicio de dirección de la producción puede verse obligado a dar una inadecuada utilización, desde el punto de vista económico, al acero disponible, minimizando las pérdidas empresariales totales, para poder asegurar la materia prima necesaria para asegurar a tiempo los plazos de entrega a los clientes.

En la figura 1 se muestra la jerarquía de tareas de toma de decisiones de la producción de las empresas industriales obtenida como resultado de la aplicación de principios de descomposición de la tarea de dirección del proceso productivo enunciado por primera vez en [9], partiendo de una perspectiva anual hasta la operación al ritmo del proceso.

Del sistema de planeamiento anual se reciben las cifras pronósticos de producción para el año en curso, desglosadas por trimestres. El comportamiento real de los indicadores económicos y del mercado puede, y normalmente lo hace, condicionar la modificación de estas cifras durante el año, las que son desglosadas por trimestres y meses.



**Fig. 1.** Jerarquía de tareas de dirección de la industria siderúrgica. Fuente: autores

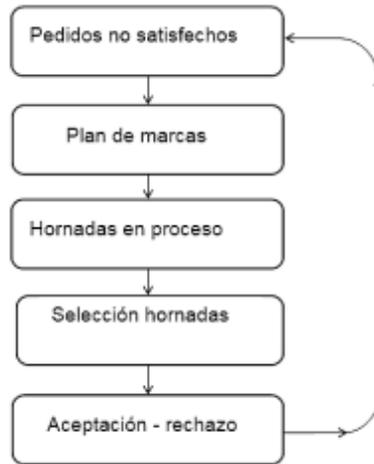
El nivel de toma de decisiones empresarial debe asegurar el balance de los flujos materiales entre los elementos de su descomposición espacial, en el tiempo. El hecho de que la demanda se precise, por lo general, en cada mes (y en ocasiones se rectifica varias veces durante el mes), impone la necesidad de elaborar mensualmente las secuencias de trabajo de los talleres y de rectificar, de forma periódica, estas secuencias durante el mes. Las secuencias deben ser compatibilizadas entre sí, ya que solo de esta forma se puede asegurar su viabilidad y el logro de un nivel adecuado de eficiencia general del sistema.

Las secuencias concretas que garantizan el cumplimiento de la tarea mensual de cada taller son emitidas, en calidad de propuestas, por los correspondientes sistemas locales de toma de decisiones. La selección de una combinación de secuencias dada se realiza en el nivel superior, por el sistema correspondiente. En la solución de las tareas señaladas, además de la consideración de los enlaces materiales, ocupa un lugar importante la consideración de los parámetros generados por el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos: máquinas o agregados en los que se debe fabricar determinado producto, duración de las operaciones tecnológicas, etcétera [3, 9].

El servicio de despacho de la empresa, asegura el balance, al ritmo del proceso, de todos los talleres y áreas. Una de las tareas más importantes que se solucionan a este nivel consiste en la selección adecuada de los lotes de productos intermedios para su transformación posterior en producción terminada considerando las normas técnicas establecidas (por ejemplo, las normas cubanas: NC 752: 2010, NC 165: 2002, NC 644: 2008, NC 752: 2010 para barras corrugadas y alambón). De la solución racional de la tarea de destino de las hornadas depende, en gran medida, el logro de altos niveles de eficiencia económica en las empresas pues la elevación en la unidad de determinada propiedad tiene necesariamente un costo, asociado a gastos complementarios de recursos materiales, humanos, técnicos y de tiempo

Concluido el proceso de laminación según el destino asignado (taller en el que se debe laminar, perfil del producto final y grado de calidad asignado), se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales, obtenidas mediante ensayos mecánicos realizados a las probetas, el procesamiento de los cuales determina si

se acepta o rechaza el destino previamente asignado, luego de lo cual se actualiza la información de los pedidos de la carpeta no satisfechos aún y el proceso se repite, figura 2. La información estadística acumulada sirva de fuente de información para la rectificación periódica de los modelos matemáticos para la estimación de las propiedades de las hornadas en proceso.



**Fig.2.** Esquema de preparación y toma de decisiones asociado al destino de las hornadas.

Fuente: autores

La toma de decisiones de las operaciones está estrechamente relacionada con la conducción de los procesos tecnológicos, pues las decisiones operativas de carácter productivo constituyen acciones directivas a los sistemas de toma de decisiones de los procesos tecnológicos. Estos sistemas deben de asegurar la obtención de propiedades correspondientes al destino asignado mediante la correcta conducción del proceso, el que depende directamente del régimen de calentamiento y deformación de los aceros [10]. La insuficiente reglamentación del proceso de fabricación incrementa por tanto la dispersión de los modelos estadísticos de estimación de propiedades [13], lo que conduce a pérdidas económicas innecesarias.

### Estudio del sistema de mayor envergadura

A partir de la carpeta de pedidos de los clientes, el sistema de dirección de la producción elabora un plan de marcas, figura 2. El subsistema de dirección de la producción encargado de la determinación del destino de las hornadas selecciona cuales hornadas en proceso deberán satisfacer determinados pedidos y cuales permanecerán almacenadas en espera de su destino definitivo. Estas decisiones se rectifican en cada ocasión que se requiere seleccionar hornadas por diferentes destinos. Algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas. Concluido el proceso de laminación según el destino asignado (taller en el que se debe laminar, perfil del producto final y grado de calidad asignado) se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales de ensayos mecánicos realizados a las probetas, el procesamiento estadístico de los cuales determina si se acepta o rechaza el destino previamente asignado [9], luego de lo cual se actualiza la información de los pedidos de la carpeta no satisfechos aún y el proceso se repite.

### Análisis Externo

#### Variables de coordinación:

- Volúmenes de producción de perfiles con sus grados normados de calidad, para el periodo de tiempo asociado al umbral operativo de planificación (turno, día, semana), correspondientes a los pedidos a satisfacer, con toda la información asociada.
- Indicadores de Eficiencia
- Exceso de costo asociado a la determinación de las hornadas asignadas por cada destino, la que se determina por la magnitud del exceso de propiedades con respecto a las normadas, entregadas a los clientes.
- Riesgo que se asume por la probabilidad que el destino asignado sea rechazado por el sistema de aceptación o rechazo (clasificación de hornadas) una vez laminada.

El cliente utiliza el acero adquirido estrictamente por las propiedades normadas, por lo que el exceso de propiedades entregadas no se corresponde con valor alguno para el cliente. Al mismo tiempo, mientras mayor sea el exceso de propiedades entregadas, el productor incurre en gastos proporcionales a este exceso y a la masa asociada del metal por concepto de sobreconsumo de materiales, energía y otros gastos. Al mismo tiempo, mientras mayor sea la propiedad determinada por destino se tendrá una menor probabilidad de aceptación del destino asumido ( $h$ ), y por tanto, mayor será el riesgo que se incurre de que la hornada sea rechazada una vez laminada ( $1 - h$ ). Se requiere, por tanto, asumir un compromiso razonable entre ambos indicadores.

**Variables de decisión:**

- Destino asignado a cada hornada (taller donde se ha de procesar la hornada, sección transversal del producto terminado y grado de calidad que deberá ser asegurado al cliente).
- Datos de entrada:
- Información referida a la composición química de las hornadas en proceso, parámetros de los modelos que describen las propiedades para los talleres de laminación de perfiles, información asociada a las normas que describen las exigencias de los indicadores de calidad, etc.

**Modelo matemático conceptual de la tarea analizada**

Se requiere definir un compromiso entre la minimización del exceso de todas y cada una de las  $r$  propiedades normadas entregadas, por el peso de las hornadas y el riesgo de rechazo asumido (probabilidad de rechazo de la hornada una vez laminada, por el sistema de aceptación – rechazo). Modelo matemático conceptual (1) - (4)

$$Z_k = \sum_i \sum_j \max \left\{ w \frac{[A_h(R_{ijk}) - R_{jk}^n] P_i \Theta_{ij}}{R_{jk}^n}, (1-w)(1-h) P_i \Theta_{ij} \right\}; \quad k = 1, \dots, r \tag{1}$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$A_h[R_{ijk}(x)] - R_{jk}^n \geq 0; \quad \forall k = 1, \dots, r; j = 1, \dots, m; \quad i = 1, \dots, n \tag{2}$$

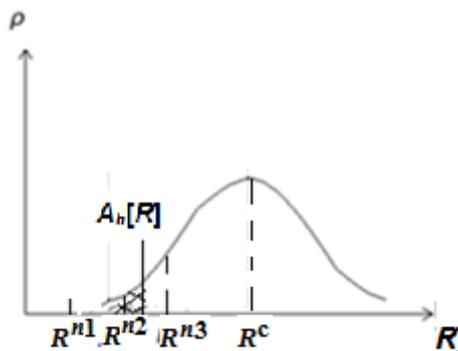
$$\sum_i \Theta_{ij} P_i \geq Q_j; \quad \forall j = 1, \dots, m; \tag{3}$$

$$\sum_j \Theta_{ij} P_i \leq 1; \quad \forall i = 1, \dots, n \tag{4}$$

Donde:

- $R_{ijk}$  - Valor estimado de la propiedad  $k$ , según composición química de la hornada  $i$ , por el destino  $j$ .
- $A_h[R_{ijk}(x)]$  - Valor asegurado con una probabilidad igual a  $h$  de la propiedad  $k$ , según composición química, taller donde se ha de fabricar y el perfil a producir, de la hornada  $i$ , por el destino  $j$ , según modelo matemático.
- $P_i$  - Peso de la hornada  $i$
- $\Theta_{ij}$  - Variable de decisión, la que adopta valor 1 en caso de asignarse el destino  $j$  a la hornada  $i$  y valor 0 en caso contrario.
- $h$  - probabilidad que la hornada cumpla con las propiedades normadas una vez laminada.
- $Q_j$  - Peso total de metal a entregar por el destino  $j$  por la empresa a sus clientes en cada momento en que debe decidir destinos de hornadas, en el turno de trabajo.

En la figura 3 se ilustra el valor asegurado con una probabilidad  $h$  de una propiedad  $R$  en contraposición a los valores normados 1, 2 y 3 según sean las normas de calidad por las que se asigne el destino. El área bajo la curva, a la izquierda del valor normado, en el eje  $R$  de la distribución normal de probabilidades con valor medio igual al calculado y error estándar igual al del modelo elaborado, constituye el riesgo que se asume a que la hornada no cumpla las propiedades normadas. Una vez asignado un destino, la probabilidad que se cumpla la propiedad correspondiente, una vez laminada la hornada, debe ser superior a  $h$ . Según lo mostrado en la figura 3 el destino más racional sería  $R^{n2}$ .



Simbología:

$R^{n1}, R^{n2}, R^{n3}$  Valores de  $R$  según normas 1, 2, 3 de la propiedad  $R$ .

$R^c$  Valor calculado de la propiedad según modelo matemático

$A_h[R]$  valor asegurado con probabilidad  $h$  de la propiedad  $R$

**Fig. 3.** Distribución de propiedades, valores normados y asegurados. Fuente: autores

Las  $r$  funciones – objetivos  $Z_k$  dadas por la expresión 1 indican la intención de minimizar la máxima diferencia ponderada entre el exceso del valor asegurado con una probabilidad mayor igual a  $h$  entregado de la propiedad  $k$  con respecto a sus valores normados, normalizado con respecto al valor normado, y los riesgos sumarios asumidos por hornadas, para sus destinos seleccionados, de incumplir la propiedad normada para la masa de metal producida por hornadas expresa el propósito de minimizar una función bi-criterial, cuyo primer componente expresa la minimización del exceso normalizado de propiedades entregadas al cliente, con una probabilidad

mayor o igual a  $h$  multiplicado por la masa de la hornada y el segundo, la minimización del riesgo que el destino asignado sea rechazado una vez realizadas las mediciones de las propiedades. Los criterios se ponderan mediante los coeficientes  $w$  y  $1 - w$ , respectivamente. Se plantea la minimización  $Z_k$  de por todas y cada una de las propiedades a considerar, es decir, se requiere minimizar simultáneamente  $[Z_1, Z_2, \dots, Z_r]$ .

Las restricciones, expresión 2, obligan al cumplimiento del destino asignado, con una probabilidad mayor o igual a  $h$ , para todas las propiedades, todos los destinos, de todas las hornadas asignadas.

Las restricciones, de la expresión 3, obligan al cumplimiento de las entregas de los compromisos  $Q_j$  asumidos por la empresa por cada destino  $j$ .

Las restricciones de la expresión 4, expresan la imposibilidad que a una misma hornada se le asigne más de un destino.

## Resultados y Discusión

### Descomposición de la tarea conceptual en subtareas

Para cada hornada pueden ser generadas opciones ordenadas de destino, pues si se dispone de tan solo una hornada, para ella estas opciones existen. Así, la tarea (1) – (4) se descompone, de forma natural, de acuerdo al esquema mostrado en la figura 4, en las siguientes tareas:

1. Generación de opciones de destino por cada hornada recién producida, considerando tan solo el objetivo (1) para una única hornada y sin considerar las restricciones de aseguramiento de las ventas (3).
2. Selección de la mejor combinación de hornadas para satisfacer las cantidades de metal  $Q_j$  requeridas por el servicio de venta para los diferentes clientes (3), considerando el conjunto de hornadas que se encuentran en proceso de producción y la masa de cada una de ellas.



**Fig. 4.** Esquema general de descomposición de la tarea de destino del metal  
Fuente: autores

En la generación de opciones de destino, para cada hornada, el modelo original (1) – (4) queda simplificado de la forma siguiente:

Minimizar:

$$Z_k = \sum_j \max \left\{ w \frac{[A_h(R_j) - R_j^n]}{R_j^n} \theta_j, (1-w)(1-h)\theta_j \right\}; \quad k = 1, \dots, r \tag{5}$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$A_h(R_j) - R_j^n \geq h\theta_j, \quad j = 1, \dots, m \tag{6}$$

$$\sum_j \theta_j = 1 \tag{7}$$

En el modelo se mantiene la misma simbología que en el anterior, con la diferencia que se omite el subíndice  $i$  pues se modela la generación de opciones de una sola hornada. Por ejemplo,  $\theta_j$  adopta valor 1 si a la hornada en proceso se le asigna destino  $j$  y valor 0 en caso que se decida otro destino cualquiera.

En el modelo (8) – (10)  $R_j$  se refiere tan solo al límite de fluencia de la hornada recién producida, estimado según composición química,  $R_j^n$  al valor normado de esta propiedad,  $\theta_j$  a la decisión de asignar o no el destino  $j$  a la hornada recién producida.

Si se toma en consideración, además, la circunstancia que al cumplirse el límite normado de fluencia en una hornada se cumplen, en la mayoría de los casos, las restantes propiedades del acero, incluido el límite de rotura, se obtiene una simplificación adicional, quedando eliminado en (8) el subíndice  $k$ .

La tarea de selección de opciones de destino queda entonces formulada de la siguiente forma: (8) al (10):

Donde:

$$Z = \sum_i \sum_j \max \left\{ w \frac{[\Delta R_{ij} - R_j^n] P_i \Theta_{ij}}{R_{jk}^n}, (1-w)(1-h) P_i \Theta_{ij} \right\} \quad (8)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$\sum_j \Theta_{ij} P_i \geq Q_i; \quad \forall j = 1, \dots, m; \quad (9)$$

$$\sum_j \Theta_{ij} P_i \leq 1_i; \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (10)$$

$\Delta R_{ij}$  Exceso de la propiedad  $R$  con respecto a  $A_n[R_{ij}]$  de la hornada  $i$  por el destino  $j$ , obtenido como consecuencia de solucionar la tarea (5-7) correspondiente a la generación de opciones de destino.

Puede requerirse destinar hornadas para su venta como semi-producto, lo que se realiza por su marca de acero. En este caso, las hornadas a exportar se seleccionan entre las que no fueron destinadas a los talleres de producción de perfiles y que, al mismo tiempo, satisfacen los requerimientos de la marca contratada. En cualquier caso, el personal encargado de la toma de decisiones puede seleccionar cualquiera de las opciones generadas en correspondencia con el modelo (5) – (7), tomando en consideración factores que no aparecen en los modelos mostrados.

Esta relación de selección por el nivel superior de las opciones entregadas por los sistemas del nivel inferior puede ser considerada como una estructura independiente de preparación y toma de decisiones.

### Análisis Interno

Entre las propiedades de las barras corrugadas para la construcción se priorizan por los clientes y las normas el límite de fluencia y el límite de rotura (por ejemplo, las mencionadas NC 752: 2010, NC 165: 2002, NC 644: 2008, NC 752: 2010), por lo que serán las propiedades a identificar en el presente trabajo para los talleres de laminación 1 y 2.

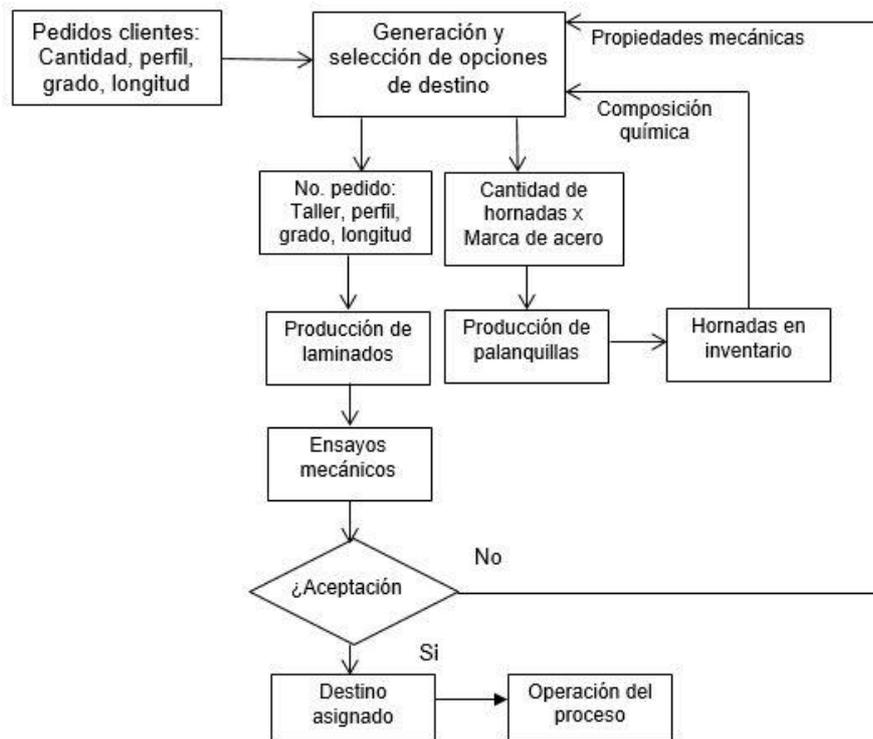
### Identificación de los modelos para la evaluación de propiedades

Han sido investigados varias estructuras de modelos para la estimación de las propiedades mecánicas con utilización del experimento pasivo, a partir de la base de datos del laboratorio de ensayos mecánicos de la industria productora de acero tomada como caso de estudio (Antillana de Acero), correspondiente a los resultados de las hornadas producidas por los laminadores 1 y 2 incluyendo todos los perfiles laminados desde el año 2001 hasta el 2014, los que incluyen las propiedades mecánicas y la composición química. La estimación se realizó con los datos de cerca de 15000 hornadas ordenadas por laminadores [14]. Se elaboraron modelos lineales, cuadráticos, signomiales y redes neuronales [13]. La mayor precisión entre estos modelos se logra por las redes neuronales de base radial.

### Estructura organizativa derivada de la descomposición

Como consecuencia de lo establecido en la introducción y los métodos, así como de los resultados obtenidos de la descomposición, se puede elaborar la estructura completa del sistema que asegure la utilización racional del acero y su inserción en el sistema automatizado de dirección empresarial, incluyendo la acción sobre los sistemas automatizados de dirección de los procesos tecnológicos. La concepción general del sistema ocupado de la utilización del acero a nivel empresarial, se infiere en la forma mostrada en la figura 5.

Del sistema de dirección de las ventas se entrega la información consolidada de los pedidos desglosados en perfil, grado de calidad y longitud. El sistema de dirección de la producción elabora, por un lado, el plan de marcas a satisfacer por el taller de elaboración acero, de forma tal de asegurar, con alta probabilidad, el logro de las propiedades mecánicas deseadas de las hornadas producidas y, por el otro, se generan por cada una de las hornadas una población de opciones de utilización (lo que permite desacoplar el modelo de optimización de propiedades por hornadas con el de selección de las hornadas ya producidas con el fin de determinar cuáles de ellas han de ser utilizadas por los diferentes destinos (pedidos consolidados de los clientes a ser satisfechos en cada momento significativo para la toma de decisiones).



**Fig. 5.** Concepción general del sistema de dirección de la utilización del acero.

Fuente: autores

Así, la determinación de los destinos se realiza en dos etapas generación de opciones de destino, sobre la base de la composición química de la hornada recién producida, y selección de hornadas producidas por los diferentes destinos. Una vez laminadas las hornadas y realizados los ensayos mecánicos se verifica el cumplimiento real de las propiedades mecánicas. Las hornadas que cumplen estas propiedades conservan el destino original elegido y las que no cumplen son redestinadas de acuerdo a las propiedades verificadas. El redestino se realiza para su entrega según la norma con límite de propiedades inmediatamente inferiores, para el mismo perfil producido en el mismo taller.

No es suficiente, sin embargo, la solución de la tarea de selección óptima de opciones destino de hornadas para asegurar el logro del potencial económico asociado al destino de hornadas pues sin la reglamentación del adecuada de las tareas de calentamiento y deformación del acero, y su cumplimiento efectivo, se incrementan el error estándar de la estimación de propiedades y el número de hornadas rechazadas por el control de calidad, lo que conduce a pérdidas económicas considerables.

La investigación da respuesta a la tarea general de dirección de la producción y su inserción en la jerarquía de tareas de esta función y se nutre no solo de los logros en esta área del conocimiento, sino también de la Ciencia de Materiales.

## Conclusiones

El modelado matemático conceptual de las tareas de toma de decisiones, en general, y de la tarea de selección óptima de opciones de destino, en particular, se realizan a partir del análisis sistémico. La generación y selección de opciones se integra con la de aceptación o rechazo de las hornadas ya laminadas.

La complejidad del modelo obliga a su descomposición en subtareas de toma de decisiones. Los modelos resultantes de la descomposición son identificados con el uso de las técnicas de parametrización de los modelos adecuada al acaso estudiado. En particular, se utilizan resultados previos obtenidos por redes neuronales artificiales.

Los modelos matemáticos obtenidos permiten hallar valores calculados y asegurados con determinada probabilidad  $h$  de  $Re$  y  $Rm$  para los talleres de la industria siderúrgica, tomados como casos de estudio. Los valores obtenidos de los errores estándar de las ecuaciones de  $Re$  y  $Rm$  por redes neuronales son ligeramente superiores a los aportados por la máquina de ensayo, lo que determina valores aceptables de excesos de ambas propiedades para asegurar una probabilidad del 95 % de su cumplimiento.

## Referencias

1. Mori J, Mahalec V. Planning and Scheduling of Steel Plates Production. Part II: Scheduling of Continuous Casting. Computers and Chemical Engineering. 2016;457(3):35-45 <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.01.020>
2. Melouk S, Freeman D, Miller M, et al. Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. Int. J. Production Economics. 2013;141:269–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.001>

3. Lin JM, Liu J, Hao PG. Many-objective harmony search for integrated order planning in steelmaking-continuous casting-hot rolling production of multi-plants. *International Journal of Production Research*. 2016; 515(2):354-372. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1232498>
4. Noroozi S, Wikner J. Sales and operations planning in the process industry: A literature review. *Intern. Journal of Production Economics*. 2017;5:45-55: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017>.
5. Balakrishnan AJ, Geunes. Production Planning with Flexible Product Specifications: An Application to Specialty Steel Manufacturing. *Operations Research*. 2003;51(1):94-112 <http://dx.doi.org/10.1287/opre.51.1.94.12791>
6. Li X, Guo Y, Liu B. et al. Production Planning Model for Make-to-Order Foundry FlowShop with Capacity Constraint. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017;15:50-60. <https://doi.org/10.1155/2017/6315613>
7. Lin JM, Liu JH, Jiang S. A Multi-objective Optimization Approach for Integrated Production Planning under Interval Uncertainties in the Steel Industry. *Computers and Operation Research*. 2016;385(1):115-127 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.002>
8. Ashby MF. *Materials Selection in Mechanical Design*. 4th ed. USA: ElsevierLtd; 2011.
9. Arzola Ruiz J. *Sistemas de Ingeniería*. La Habana Cuba: Editorial Félix Varela. 2009. [Consultado el: 18 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/271505692>
10. Arzola J. *Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería* 2009. [Consultado el: 18 de marzo de 2018]. [Consultado el: 12 de Julio de 2019]. Disponible en: <http://www.bibliomaster.com>
11. Clitan IV, Muresan M, Abrudian DM. Optimization of the casting length of billets and computation of the minimum number of batches. *Applied Mechanics and Materials*. 2017;859:177-182. <http://dx.doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.859.177>
12. Andresai BR, Sanchisaii J, Lamothe L, et al. Integrated production-distribution planning optimization models: A review in collaborative networks context. *Int. J. Prod. Manag. Eng.* 2017;5(1):31-38. <http://dx.doi:10.4995/ijpme.2017.6807>
13. Jiménez Sánchez D, Arzola Ruiz J. Redes neuronales regularizadas aplicadas a la estimación de propiedades mecánicas de perfiles de acero. *Ingeniería Mecánica*. 2017;20(3):115-121.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

#### Contribución de los autores

**Denis Joaquín Zambrano Ortiz.** <https://orcid.org/0000-0002-6409-5294>

Diseño de la investigación, revisión de fuentes bibliográficas asociadas, análisis de los resultados, elaboración de la estructuración del proceso de toma de decisiones, elaboración de software, en la revisión y redacción final del trabajo.

**José Arzola Ruiz.** <https://orcid.org/0000-0003-1128-2245>

Diseño de la investigación, estructuración de la toma de decisiones asociada al trabajo, concepción y elaboración de modelos matemáticos para la estimación de propiedades y la toma de decisiones, en la revisión y redacción final del trabajo.

**Rosa Mariuxi Litardo Velásquez.** <https://orcid.org/0000-0002-1046-4699>

Contribución realizada al trabajo: elaboración y evaluación de resultados de software para la toma de decisiones, en la revisión y redacción final del trabajo