

# METODOLOGÍA PARA LA PROGRAMACIÓN DE TRENES DE LAMINACIÓN A COSTE MÍNIMO: APLICACIÓN A UN TREN DE ALAMBRÓN

Vicente Rodríguez Montequín

*Universidad de Oviedo*

Aida Prado

Carlos Alba

Mayte Rodríguez

*ArcelorMittal*

## Abstract

A wire rod mill must execute orders from different customers, with different features, different priorities and different due dates, considering the physical constraints of the line itself. The volumes and features of the orders, as well as the line constraints vary from one mill to another, even in the same mill in different timeframes. Flexibility is not comparable to the other processes, due to the change of size here implies high time and quality losses, making difficult to run the mill under stable conditions.

This job develops a methodology of analysis and the needed mathematical models to, given a wire rod mill within its specific features and an order book, obtain the production schedule according to customer's due dates minimizing the production cost, considering the customer's priorities, priorities of the orders, physical constraints of the mill and the costs associated to potential delays or to stock generation.

The methodology, with general nature, is proven by its application to a wire rod mill.

**Keywords:** *Methodology, Wire Rod Mill, Production Schedule, Optimization*

## Resumen

Los trenes de laminación deben producir pedidos de distintos clientes, con distintas características, distintas prioridades y distintas fechas comprometidas de entrega, siempre respetando las restricciones físicas de la línea. Los volúmenes y características de los pedidos, así como las restricciones de las líneas varían de unos trenes a otros, incluso en el mismo tren en períodos temporales distintos. No obstante la flexibilidad no es equiparable a la de otros procesos dado que los cambios de producto implican elevadas pérdidas de tiempo y, en muchas ocasiones de calidad, no llegando nunca a operarse en las condiciones estables.

El presente trabajo desarrolla una metodología de análisis y los modelos matemáticos necesarios para, a partir de un tren con unas características específicas y un libro de pedidos, obtener la programación de la producción que permita cumplir con el compromiso de entrega al cliente minimizando el coste de producción, teniendo en cuenta las prioridades de los clientes, de los pedidos, las restricciones físicas del tren y los costes asociados a los posibles retrasos o a la generación de stock.

La metodología, de carácter general, se comprueba en el caso específico de un tren de alambón.

**Palabras clave:** *Metodología, Tren de laminación de alambón, Programación de la producción, optimización*

## 1. Introducción

La producción de acero en los países desarrollados, incluso dado el gran número de empresas existentes, ha sido un negocio bastante seguro durante muchos años. El crecimiento del sector del automóvil, la construcción, los electrodomésticos asociados, etc. han provocado que las ventas fuesen generosas sin atender especialmente a los costes de producción ni al nivel del servicio al cliente. Tras la explosión industrial de países emergentes como China, India o Brasil, ha surgido una amenaza a esta producción en el Mundo desarrollado, dando lugar a la revisión de los procesos productivos. La mano de obra es inmensamente más barata en los países emergentes y será difícil o imposible poder competir respecto a ese criterio, por lo que la apuesta se hace respecto a la calidad de los productos y el nivel del servicio al cliente.

A lo largo del proceso productivo entran en juego diversos factores, como las limitaciones de las instalaciones, capacidad de almacenamiento (tanto de semiproducto, como de producto acabado), coste económico de los procesos, cambio del proceso, fechas de entrega comprometidas con el cliente, stock de semiproductos, stock de productos acabados y material que es necesario fabricar por las características de transición de las líneas pero que no tienen un cliente asignado.

Este trabajo desarrolla una metodología de análisis para la programación de trenes de laminación a coste mínimo, teniendo en cuenta todas las restricciones citadas anteriormente, permitiendo tras su aplicación el ahorro en costes de producción manteniendo el nivel de servicio comprometido con el cliente. Se trata de una metodología global aunque se presenta un caso específico de aplicación para su validación.

## 2. Metodología desarrollada

### 1 Identificación del problema

La metodología desarrollada se estructura en cascada, con fases consecutivas. La primera etapa es la **Identificación del Problema**. En ella se pretende la consolidación del alcance del proyecto, entendiendo el problema desde el punto de vista de negocio. Para ello se requiere la participación de expertos de la empresa que transmitan sus necesidades y la problemática asociada. Esta fase es fundamental, tanto para asegurar que el proyecto se lleva a cabo siguiendo un sistema de gestión de la configuración, garantizando alcance e integración, como para garantizar que los resultados obtenidos son los deseados por la empresa.

### 2 Adquisición de información

La segunda etapa se denomina **Adquisición de información**. En ella se recopila y analiza de forma somera la información existente. Dado que los trenes de laminación son distintos entre sí, incluso trenes del mismo producto como el alambión, las restricciones y los costes asociados también varían de unos trenes a otros. Esto ha provocado el desarrollo de un cuestionario que define, una vez contestado, los parámetros a optimizar y los valores de una serie de parámetros de los modelos matemáticos desarrollados.

En una primera aproximación a las restricciones de las instalaciones se observó que éstas radicaban principalmente en:

- Stock de semiproducto: En función del espacio físico intermedio entre procesos de producción el stock generado entre instalaciones puede ser un auténtico problema, a lo que hay que añadir el coste de este material en sí mismo que todavía no genera ingresos.

- Cambios de calibre: Requiere cambios en el tren para adaptarlo al material que se va a laminar. Puede ser un proceso costoso en tiempo lo que provoca pérdida de producción y de productividad al mantenerse los costes fijos.
- Stock de producto acabado: El departamento de planificación publica o hace visible parte de la cartera de pedidos a los equipos de producción, especificando una fecha en la que cada pedido debe ser realizado teniendo en cuenta todo el proceso productivo y las diferentes instalaciones. Cuando estos pedidos son ejecutados, los equipos de producción (locales a cada instalación) tienden a no respetar las fechas planificadas intentando optimizar su parte del proceso con una visión local. Esto genera adelantos y retrasos en los distintos pedidos que se acarrean en cada proceso productivo, dando lugar al efecto conocido como *dispersión*. Para asegurar que el material llegue al cliente a tiempo, gran parte de la producción se hace con adelanto a las fechas planificadas generando gran cantidad de stock de producto acabado en el almacén previo a la distribución. Este stock es muy caro e incluso existe la posibilidad de degradación del material.
- Operaciones intermedias: Muchos productos tienen que pasar por operaciones intermedias que tienen restricciones en cuanto a tonelaje o porcentaje respecto a tonelaje total de producción. Son cuellos de botella del proceso.
- Restricciones de calidad: la fabricación de determinadas calidades puede ralentizar la producción debido a que es necesario realizar una preparación especial de la línea, formar acopio de material para fabricar en campañas, disminuir el ritmo de producción y por consiguiente la capacidad de laminación.

De cara a generar el modelo de optimización adecuado a cada tren teniendo en cuenta las particularidades de los mismos, se generó un cuestionario que cubre los aspectos comentados anteriormente. Las respuestas al cuestionario permiten conocer las particularidades de cada tren y así, adaptar el modelo matemático de forma que se optimice el coste de producción respetando las fechas prometidas a los clientes.

#### **Cuestión 1.**

A modo general, ¿Cuáles se consideran las principales restricciones de la instalación?

#### **Cuestión 2.**

¿Cuáles son las capacidades estimadas de las instalaciones (semanales/mensuales)?

#### **Cuestión 3.**

¿Se debe fabricar alguno de los productos en campañas por restricciones de calidad?

#### **Cuestión 4.**

¿Existe algún número de toneladas mínimo a fabricar en cada cambio de calibre?

#### **Cuestión 5.**

¿Cuáles son las calidades más restrictivas o difíciles de fabricar?

#### **Cuestión 6.**

¿Cómo se gestiona la fabricación de calidades/calibres con frecuencia baja (exóticos)? ¿Se lamina el pedido aún no teniendo un número de toneladas suficiente para darle un buen servicio al cliente y se guarda el material sobrante en stock?, ¿Se espera a que lleguen más pedidos de ese calibre/calidad para juntarlos, aún dando un mal servicio al cliente?

**Cuestión 7.**

¿Hay alguna información que se considere particularmente importante y que no se vea reflejada en las preguntas anteriores?

**3 Desarrollo de los modelos**

Una vez obtenida la información, **se procede a la creación de los modelos, la fase de Desarrollo. En este caso al ser modelos específicos la modelización se puede precisar.**

Para resolver un problema de optimización se debe encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

Independientemente del tren y de sus particularidades, el objetivo final siempre será la minimización del coste de producción respetando las fechas de entrega comprometidas con los clientes. Con carácter general, se desarrollaron unas ecuaciones atendiendo a una serie de indicadores, a saber:

- Pedidos laminados a tiempo
- Niveles de stock
- Número de cambios de calibre

Estas ecuaciones generales están basadas en parámetros que pueden ser fácilmente asignados en función de las respuestas dadas al cuestionario. Hay que tener en cuenta que, si bien las ecuaciones desarrolladas cubren con carácter general las necesidades de un tren de alambón, podría ser necesario el desarrollo de alguna otra ecuación atendiendo a necesidades específicas o particularidades de algún tren en concreto, hecho que se detectaría también en las respuestas obtenidas al cuestionario.

**Pedidos laminados a tiempo**

Es una proporción para cada semana en la que intervienen:

- Las diferentes semanas prometidas a los clientes en el libro de pedidos
- El número de pedidos que estarían laminados a tiempo en cada semana
- El número de pedidos planificados para cada semana

**Niveles de stock**

Se calculan los stocks totales para cada semana teniendo en cuenta:

- Las diferentes semanas prometidas a los clientes en el libro de pedidos
- Las toneladas laminadas de cada pedido en las diferentes semanas
- Las toneladas laminadas en avance de cada pedido en las diferentes semanas
- Capacidad de almacenamiento en el almacén de distribución en cada semana
- Coste debido a los stocks en cada semana

**Número de cambios de calibre**

Se calculan los cambios de calibre realizados en cada semana teniendo en cuenta:

- Las diferentes semanas prometidas a los clientes en el libro de pedidos
- Los calibres que son laminados en cada semana
- Coste del cambio de calibre en cada semana

- Cambios posibles de calibre realizados en cada semana

El modelo de optimización desarrollado está basado en *Programación Lineal Entera* y es totalmente parametrizable. Para su fácil uso se ha desarrollado una aplicación software que se comenta a continuación.

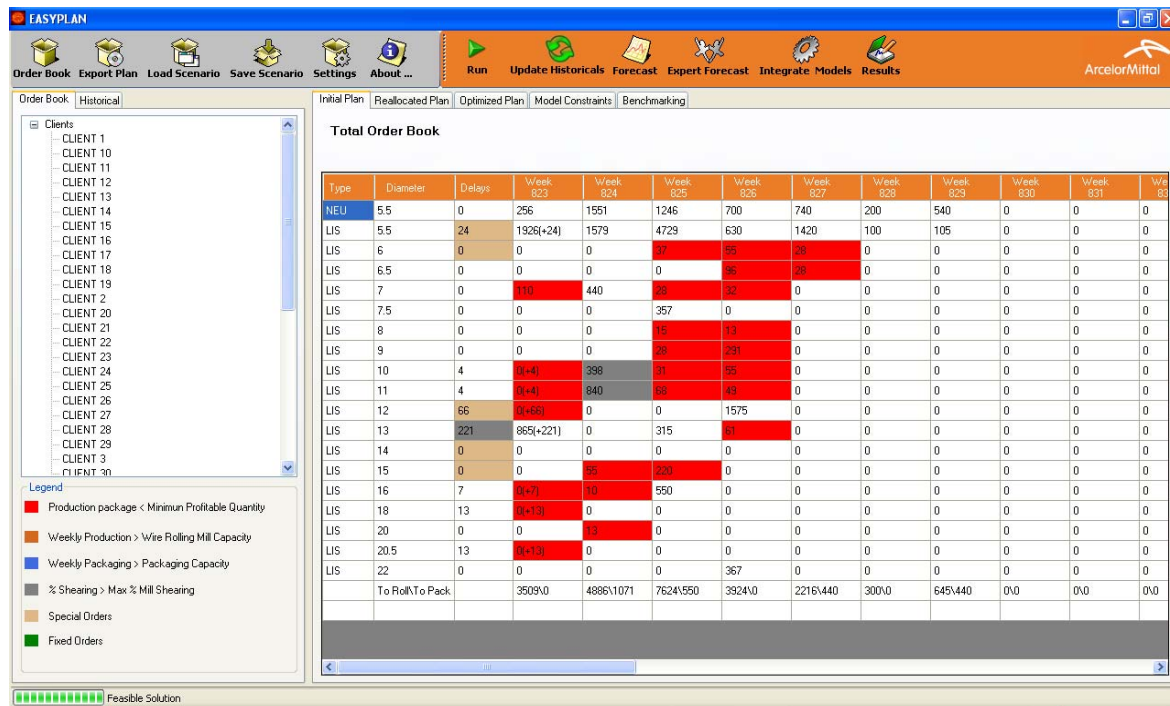
#### **4 Implementación**

Una vez que el tren ha sido caracterizado y los modelos matemáticos desarrollados, es necesario ocultar la complejidad de los mismos y ofrecer a los futuros usuarios un entorno amigable, parametrizable y fácil de usar. Dichos usuarios tienen gran conocimiento del negocio, de sus instalaciones, de los productos fabricados y de la casuística particular de sus líneas, pero en general su conocimiento respecto a modelos matemáticos y herramientas informáticas de ayuda a la decisión es escaso. Proporcionarles una herramienta sencilla, robusta, que a partir de los parámetros que comprenden les proporcione la programación de los pedidos a coste mínimo de una forma entendible es clave para la implantación, el uso y por consiguiente la obtención de éxito en la gestión del cambio.

La herramienta de ayuda a la decisión dispone de un módulo de configuración donde se asignan valores a una serie de parámetros, como puede ser el tonelaje mínimo a fabricar en cada cambio de calibre. La entrada de datos es sencilla realizándose la importación del libro de pedidos a programar mediante la lectura de un fichero *Excel*. Si bien, como se ha comentado anteriormente, los usuarios no están familiarizados en general con modelos matemáticos y herramientas informáticas nuevas, sí lo están con herramientas ofimáticas. En todo caso se ha desarrollado un asistente que se ejecuta directamente al arrancar la herramienta que guía al usuario en los pasos que debe tomar para alimentarla con el libro de pedidos, configurar las restricciones a tener en cuenta y obtener los resultados.

Una vez cargado el libro de pedidos de la instalación, el usuario puede marcar las restricciones de la instalación, restricciones específicas de los pedidos o incluso preferencias de laminación para poder simular diferentes escenarios y obtener la programación acorde a distintas configuraciones.

Figura 1: Aspecto de la herramienta de ayuda a la decisión



Una vez optimizada la programación del libro de pedidos, la herramienta divide el interfaz en dos partes bien diferenciadas:

- La parte izquierda muestra una estructura de árbol con los diferentes clientes
- La parte derecha muestra el tipo de producto, calibre y toneladas a producir en el horizonte de semanas especificado por el usuario.

La herramienta ejecuta el modelo de optimización y devuelve una propuesta de laminación óptima en coste y cumpliendo las restricciones, a no ser que alguna sea imposible de satisfacer. En estos casos, se muestran al usuario en la parte derecha mediante un código de colores posibles situaciones anómalas como pueden ser:

- Tonelaje a producir menor que el mínimo especificado como rentable en cada cambio de calibre
- Producción semanal mayor que la capacidad del tren
- Tonelajes que el usuario ha fijado para alguna semana, producto y calibre en particular

La herramienta permite la exportación de los resultados a un entorno ofimático, en particular *Excel*, para posteriores análisis particularizados que se deseen realizar o para emitir órdenes de producción a los equipos de las instalaciones.

### 3. Aplicación a un tren de alambIÓN

En el proceso de desarrollo de la metodología se hizo un pequeño estudio de las características de dos trenes de alambIÓN en Europa pertenecientes al grupo *ArcelorMittal*. La comprobación de la metodología, así como el desarrollo de la herramienta de ayuda a la decisión se realizaron en colaboración con el departamento de programación del tren objeto

de estudio, para la adecuación de los valores de los parámetros y restricciones en dicho caso concreto.

### 3.1 Respuestas del tren español al cuestionario

#### Cuestión 1.

A modo general, ¿Cuáles se consideran las principales restricciones de la instalación?

*Principalmente el cambio de calibre ya que las pérdidas de tiempo son muy grandes.*

*También marca la programación el paso de algunos pedidos por las operaciones de ensacado o corte.*

#### Cuestión 2.

¿Cuáles son las capacidades estimadas de las instalaciones (semanales/mensuales)?

*Por supuesto depende de la demanda, ya que hay cierta flexibilidad dependiendo de la situación, por lo que no es un valor fijo.*

#### Cuestión 3.

¿Se debe fabricar alguno de los productos en campañas por restricciones de calidad?

*Sí, existen dos familias, que se deben fabricar en campañas cada 15 días, aproximadamente.*

#### Cuestión 4.

¿Existe algún número de toneladas mínimo a fabricar en cada cambio de calibre?

*Se considera que no se debe hacer ningún montaje con menos de 300 toneladas, ya que no sería rentable.*

#### Cuestión 5.

¿Cuáles son las calidades más restrictivas o difíciles de fabricar?

*Las aplicaciones para el automóvil, como neumáticos y estampación.*

#### Cuestión 6.

¿Cómo se gestiona la fabricación de calidades/calibres con frecuencia baja (exóticos)? ¿Se lamina el pedido aún no teniendo un número de toneladas suficiente para darle un buen servicio al cliente y se guarda el material sobrante en stock?, ¿Se espera a que lleguen más pedidos de ese calibre/calidad para juntarlos, aún dando un mal servicio al cliente?

*Se intenta esperar a tener el tonelaje mínimo para poder hacer ese montaje.*

#### Cuestión 7.

¿Hay alguna información que se considere particularmente importante y que no se vea reflejada en las preguntas anteriores?

*No que detectemos en estos momentos, consideramos muy importante el tonelaje mínimo por cada cambio de calibre y los pedidos para el sector del automóvil que son muy exigentes. Sí sería aconsejable reducir las producciones en adelanto debido a que a veces genera problemas en el almacén de productos acabados por exceso de stock.*

### 3.2 Parametrización de los modelos a través del interfaz

Una vez cubierto el cuestionario se realizaron los ajustes necesarios en los parámetros para adecuar la herramienta de ayuda a la decisión a las necesidades de la programación del tren. Todas las limitaciones indicadas en el cuestionario se traducen en restricciones del



modelo. En este caso particular se observa que el principal problema radica en las pérdidas de tiempo requeridas para el cambio de calibre disminuyendo la productividad de la instalación, por lo que será la restricción que más penalizará el modelo. Otro parámetro a considerar es la realización de adelantos, es decir, la fabricación de material antes de la fecha planificada debido a que generaría problemas de exceso de stock de producto final.

Una vez determinados los pesos de cada una de las restricciones y variables se procedió a un tiempo de pruebas y ajustes, para el afino de la herramienta al usuario final, el departamento de programación de la producción.

### 3.3 Resultados

La herramienta ofrece una comparativa económica entre el método de programación tradicional y la herramienta de ayuda a la toma de decisiones, en cada una de las ejecuciones de la misma. De esta forma el departamento de programación puede comprobar los beneficios obtenidos empleando los modelos y el envoltorio desarrollado.

El principal KPI con el que se trabaja en este caso es el número de cambios de calibre que ha pasado de una media de 4,78 cambios semanales a 2.

Respecto a los stocks de productos acabados, manteniendo la media de pedidos laminados a tiempo, se ha conseguido una reducción alrededor de las 500 Tn., pasando de una media de 1670 Tn. a 1184 Tn.

## 4. Conclusiones

La programación de un tren de laminación de alambrón requiere tener en cuenta diversos factores y restricciones. Por las características y limitaciones del proceso no es posible seguir un esquema FIFO a no ser con un coste asociado totalmente inviable. En contraposición, laminar toda la producción basada en campañas provocaría retrasos en muchos de los pedidos dando lugar a una carencia absoluta de satisfacción del cliente. La solución está en un punto intermedio, intentar maximizar la productividad respetando las fechas de entrega comprometidas. Esto es posible mediante la aplicación de la metodología desarrollada, caracterizando al tren por medio del cuestionario y parametrizando adecuadamente a posteriori los modelos matemáticos.

Es importante insistir en la creación de un envoltorio que oculte a los usuarios finales la complejidad de los modelos y permita, de una forma sencilla a la vez que eficaz, hacer uso de los mismos y obtener el rendimiento deseado, la programación del libro de pedidos a coste mínimo respetando las restricciones.

## 5. Bibliografía

Schrage, L., *Optimization Modeling with Lingo*, 6<sup>th</sup> Edition, Lindo Systems Inc., April 2006.  
Users guide, *Lingo the modeling language and optimizer*, Lindo Systems Inc., 2006.

## 6. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en colaboración con el departamento de programación de la producción, en particular de productos largos y producto alambrón que la empresa *ArcelorMittal* tiene en España. A través de ellos ha sido posible contactar con el tren objeto de estudio y tener acceso de igual modo a las características del tren y problemáticas principales para la elaboración del cuestionario.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Gestión del Área de Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Oviedo.

Phone: +34 985 10 42 72

Fax: +34 985 10 42 56

E-mail: [gestion@api.uniovi.es](mailto:gestion@api.uniovi.es)

URL : <http://www.api.uniovi.es>