

Simulación y Optimización de la Planificación de un Proceso Continuo: Aplicación a un Tren de Laminación *

David de la Fuente García¹, Raúl Pino Diez², Paolo Priore³, Nazario García Fernández⁴, Alberto Gómez Gómez⁵, Francisco Javier Puente García⁶, José Parreño Fernández⁷, Isabel Fernández Quesada⁸.

¹Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, david@etsiig.uniovi.es

²Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, pino@etsiig.uniovi.es

³Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, priore@etsiig.uniovi.es

⁴Doctor en Económicas, ETS de Ingenieros de Gijón, ngarcia@correo.uniovi.es

⁵Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, agomez@etsiig.uniovi.es

⁶Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, jpuente@etsiig.uniovi.es

⁷Doctor Ingeniero Industrial, ETS de Ingenieros de Gijón, parreno@etsiig.uniovi.es

⁸Licenciada en Económicas, ETS de Ingenieros de Gijón, bel@etsiig.uniovi.es

RESUMEN

En este Proyecto se simulará el funcionamiento del Tren de Laminación Semicontinuo de la factoría de Aceralia en Avilés (Asturias), con el objeto de hacer un análisis exhaustivo de todas las variables que afectan a su funcionamiento, y poder detectar posibles problemas, cuellos de botella, etc. En función de los resultados del estudio, se propondrán posibles mejoras que optimicen el funcionamiento del tren. El segundo objetivo del Proyecto consiste en la utilización de algoritmos de Aprendizaje Automático para resolver problemas de Planificación en el proceso, mediante la construcción de un Sistema de Apoyo a la Decisión basado en Inteligencia Artificial, que determinará cuál es la mejor política de planificación que se debe de aplicar de acuerdo al estado que presente el sistema de fabricación en cada momento.

1. Introducción.

El proyecto que presentamos aquí, consiste en el empleo de técnicas de simulación y de Inteligencia Artificial para ayudar en la resolución del problema de planificación de un proceso continuo, como es un tren de laminación. El Proyecto tiene dos objetivos fundamentales:

1. En primer lugar se pretende estudiar el funcionamiento del Tren de Laminación Semicontinuo de la factoría de Aceralia en Avilés (Asturias), con el objeto de hacer un análisis exhaustivo de todas las variables que afectan a su funcionamiento, y poder detectar posibles problemas, cuellos de botella, etc. En función de los resultados del estudio, se propondrán posibles mejoras que optimicen el funcionamiento del tren. La herramienta fundamental que se empleará en esta fase, es la Simulación del Tren de Laminación mediante el software adecuado.
2. El segundo objetivo del Proyecto consiste en la utilización de algoritmos de Aprendizaje Automático para resolver problemas de Planificación en Sistemas de Fabricación:

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación con el mismo título, correspondiente a la convocatoria de fecha 31 de enero de 2001, proyectos de I+D en el marco de programas nacionales del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003, del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Referencia MCT-01-DPI-3433).

- Se diseñará un sistema de decisión que determine cual es la mejor política de planificación que se debe de aplicar de acuerdo al estado que presente el sistema de fabricación en cada momento.
- Se estudiará en el Proyecto la idoneidad de cada uno de los tres algoritmos de aprendizaje automático utilizados (Aprendizaje Inductivo con el programa C4.5, Razonamiento Basado en Casos utilizando el Algoritmo de los Vecinos más Próximos y Redes Neuronales Artificiales del tipo Perceptron Multicapa o Backpropagation) y la bondad del “conocimiento de planificación” obtenido.
- Se analizará el número de ejemplos de entrenamiento necesario para poder utilizar estos algoritmos de forma adecuada.
- Se comprobará el funcionamiento en tiempo real del sistema de fabricación utilizando el “conocimiento de planificación” obtenido

En este trabajo abordamos únicamente la primera parte del trabajo, puesto que es la que se esta llevando a cabo en la actualidad (el proyecto tiene una duración de tres años habiéndose comenzado en Enero de este año).

2. Planificación, Simulación y Aprendizaje Automático.

Debido a la creciente importancia de obtener la máxima rentabilidad de todos y cada uno de los recursos disponibles, la posibilidad de hacer pruebas y tests antes de invertir tiempo y capital en un proyecto, es extremadamente atractiva. Esto es precisamente lo que ofrece fundamentalmente la simulación por computador [1].

Cuando se pretende analizar un sistema de producción existente o cuando se está planificando, sería deseable contar con una herramienta que permita experimentar con el diseño y/o el funcionamiento del sistema, para tratar de optimizar una o varias variables, como podrían ser la productividad o la eficiencia. Esto se podría hacer en una planta de fabricación, el sistema de gestión de equipajes de unas líneas aéreas, o el flujo de documentación entre varias oficinas. Mediante herramientas como la simulación por computador, es posible crear un modelo del sistema real, en un breve periodo de tiempo, con el que se pueden comprobar los efectos de diferentes decisiones relativas a la planificación, diseño de operaciones, distribución en planta, etc.

Cuando se pretende analizar el funcionamiento de cualquier sistema que contiene elementos discretos que se mueven entre dos o más puntos, existen básicamente tres opciones [2], [3]:

- Observación del sistema real.
- Análisis matemático del funcionamiento del sistema.
- Simulación.

La observación es posible si la planta o el sistema están disponibles para su estudio, pero está limitada cuando se quieren probar diferentes cargas de trabajo, secuenciaciones de las tareas, o distribuciones físicas de los recursos, ya que todas estas posibilidades deberían ser probadas sobre el sistema real, lo que supondría un considerable esfuerzo y tiempo, además de producir perturbaciones en el funcionamiento normal del sistema. El análisis matemático es inadecuado para sistemas que contienen factores aleatorios como averías en las máquinas, tiempos de operación variables, etc. La simulación es el sistema más adecuado en la mayoría de los casos, ya que ofrece significativas ventajas en el estudio y optimización de sistemas simples o complejos:

- Gran velocidad, dependiendo de la complejidad del modelo (por ejemplo, un año completo de funcionamiento se puede simular en menos de una hora).
- Es posible construir modelos muy aproximados a la realidad en muy breve periodo de tiempo.
- Es posible evaluar diferentes estrategias y reglas, haciendo numerosas simulaciones de diferente longitud y condiciones.
- Se pueden resolver rápidamente cuestiones como: ¿qué pasaría si se mueve la máquina “A” a otra situación?, o ¿si aceleramos este proceso, qué nuevos cuellos de botella aparecerán?
- Los datos y resultados se recopilan y analizan automáticamente después de cada simulación.
- Es posible obtener los resultados de forma gráfica, además de poder construir animaciones realistas del funcionamiento del sistema.

De forma paralela al desarrollo de los sistemas de fabricación, han surgido multitud de enfoques para el estudio de los problemas de planificación en estos sistemas. Las principales técnicas utilizadas para resolver estos problemas son la programación matemática, la simulación, los métodos heurísticos y la inteligencia artificial.

Esta última disciplina contiene un campo denominado aprendizaje automático que incluye diversos tipos de algoritmos. Éstos, intentan determinar la solución de un problema mediante el empleo de otros problemas resueltos en el pasado, denominados ejemplos de entrenamiento, similares al planteado. Para ello, estos algoritmos obtienen, con los ejemplos de entrenamiento, el “conocimiento del dominio” necesario para resolver nuevos problemas que se presenten. Los algoritmos de aprendizaje automático que se emplearán son: el *C4.5*, el algoritmo de los vecinos más próximos y las redes neuronales “backpropagation” [4], [5], [6], [7].

Un punto importante cuando se aplican los algoritmos de aprendizaje automático es la obtención de los ejemplos de entrenamiento que necesitan los diversos algoritmos utilizados. Para ello, es necesario determinar los atributos de control que definen el estado del sistema de fabricación en cada instante. A continuación, se aplican estos algoritmos y se determina la bondad del “conocimiento obtenido” y la influencia del número de ejemplos de entrenamiento empleados.

Uno de los mayores problemas que surgen al aplicar el algoritmo de los vecinos más próximos, es que su comportamiento depende de los pesos asignados a cada uno de los atributos de control que se utilizan. Para resolver este problema, se propone un algoritmo genético (*GA*) que determina los pesos óptimos que se deben asignar a cada uno de los atributos [8]. Asimismo, para intentar mejorar la bondad del “conocimiento” obtenido por los diferentes algoritmos de aprendizaje automático, se diseña un módulo que determina las combinaciones “útiles” de los atributos de control originales.

Finalmente, una vez extraído el “conocimiento de planificación”, se emplea éste para tomar decisiones en tiempo real. Para ello, es necesario definir un período de supervisión adecuado, que determine los momentos en los cuales se observa el estado del sistema, para tomar la decisión de secuenciación idónea empleando el conocimiento obtenido de antemano.

3. Descripción del Proceso.

Los semi-productos o desbastes obtenidos en la colada continua del acero, no son susceptibles de empleo comercial y requieren un proceso de conformación y mejora de sus características: la laminación en caliente. Ésta, aplicada a los desbastes adecuados, sirve para la fabricación de productos largos o bien para la obtención de productos planos, en ambos casos laminados en caliente.

En el proceso de laminación en caliente, no sólo se busca la alteración de forma del planchón, para obtener el producto plano bobina en caliente, sino que a través del proceso de laminación termomecánica se trata de controlar la microestructura para lograr un producto de propiedades y prestaciones prefijadas.

Se define una bobina, como un producto plano (banda) de acero, de ancho superior a 550 mm y espesor no superior a 20 mm, laminado en caliente por procesos continuos (Tren Semicontinuo) y enrollada, después de la pasada final de laminación, en espirales regularmente superpuestas de forma que las caras laterales resultantes sean prácticamente paralelas.

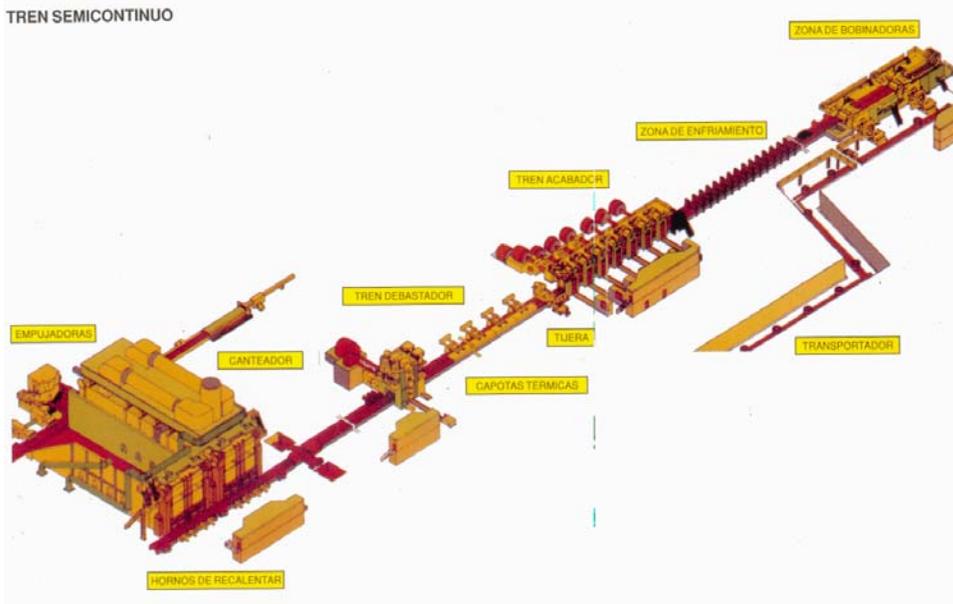


Figura 1: Tren de Laminación Semicontinuo (Fuente: ACERALIA).

El Tren de Laminación Semicontinuo de la Factoría de Aceralia en Avilés (figura 1), consta de las siguientes zonas de trabajo:

- *Hornos de recalentar*: En ellos el chapón se recalienta hasta la temperatura adecuada para su posterior laminación
- *Tren desbastador*: Se trata de un tren reversible que consigue alargar el chapón y reducir considerablemente su espesor.

- *Tren Acabador*: Este tren cuenta con siete cajas de cilindros que acaban de darle a la banda, la longitud, el ancho y el espesor requeridos.
- *Zona de enfriamiento*: Consiste en un sistema de refrigeración por flujo laminar que permite enfriar uniformemente la banda.
- *Zona de bobinadoras*: Es el proceso final, en la que la chapa es enrollada para su posterior evacuación de Tren.

4. Simulación del Proceso.

Los datos necesarios para crear el modelo correspondiente al Tren de Laminación Semicontínuo de la Factoría de Avilés, fueron facilitados por el departamento de I+D de la citada factoría. Esta información, extraída directamente de la base de datos del Tren, está formada por los registros de 5000 bobinas laminadas en esas instalaciones. Entre los datos facilitados, se hizo especial hincapié en todo lo relacionado con tiempos de proceso y variables que pudiesen influir en los mismos. El primer paso fue, por lo tanto, el análisis y clasificación de toda esta información y el diseño de un procedimiento de lectura de tiempos de proceso, en función de unas determinadas características del producto a laminar.

Como consecuencia del estudio de los tiempos de proceso en la parte del Tren correspondiente al *acabador* de 7 cajas, se determinó que las variables que tenían una mayor influencia en la duración del proceso, eran:

- Ancho Objetivo de la banda
- Espesor Objetivo de la banda
- Familia del Acero (existen 4 familias diferentes, en función de la composición de la aleación)

Dada la gran variedad de anchos y espesores objetivos que se recogían en los 5000 procesos de los que se tenía información, se optó por agrupar los anchos en 14 rangos (desde 850 hasta 1450 mm), cada uno de ellos con sus correspondientes espesores (desde 1,5 a 14,4 mm).

Cada combinación de ancho, con su espesor y familia, dan lugar a un tiempo de proceso distinto en el acabador. Se agruparon los casos que tenían un mismo ancho objetivo, espesor objetivo y familia, y ayudados por la herramienta *Input Analyzer* del programa Arena 4.0, se buscó la distribución de probabilidad que mejor se ajustaba a ese conjunto de tiempos. De esta forma, se fueron determinando los tiempos de cada una de las combinaciones de variables de entrada, y toda esta información se recogió en un Libro de Excel, para su posterior lectura desde Arena. En el caso que nos ocupa, se requería la participación de una herramienta que ligara el programa y modelo de simulación, con el entorno que se había creado para clasificar y almacenar los datos. Esta lectura de datos debía realizarse en un punto y momento determinado del desarrollo de nuestra simulación, y tenía que tratarse de una búsqueda basada en los valores de unas variables de entrada.

El programa Arena 4.0 tiene integrado un *Visual Basic for Applications* (VBA) muy útil en casos en los que se quiera realizar un modelo interactivo que permita al usuario modificar aspectos del modelo o ligar éste con aplicaciones ajenas al mismo.

Haciendo uso del VBA se creó el código necesario para buscar el tiempo del acabador en el archivo de Excel que se había realizado previamente.

Para la construcción del modelo, se utilizará el programa Arena y de su sistema de construcción de modelos a partir de bloques. El entorno del programa y su pantalla, presentan tres paneles principales en los que se agrupan los bloques que pueden ser utilizados para llevar a cabo las simulaciones.

En nuestro proyecto, se utilizarán básicamente los siguientes tipos de bloques:

- **Create:** Es el primer bloque que suele aparecer en el modelo, ya que en él se define la forma de llegada de las entidades o piezas al sistema y cuáles han de ser sus características.
- **Process:** Representa, por ejemplo, un proceso en una máquina, y en él se especificarán todas las particularidades del mismo.
- **Decide:** Servirá para evaluar una condición determinada en un punto del sistema, y hará que las entidades tomen rumbos diferentes en función del resultado de la citada evaluación.
- **Assign:** Se utiliza para asignar valores a atributos o variables que tengamos definidos en nuestro sistema y que caracterizarán a las entidades.
- **VBA block:** Se introduce este bloque en el modelo, en el punto exacto en el que queremos ligar nuestro programa con otro, o cuando queremos que nos aparezca en pantalla un formulario que solicite información al usuario. Este bloque permite introducir una zona de código en Visual Basic, con instrucciones exactas de los pasos que queremos que dé nuestra "entidad".

Combinando adecuadamente estos módulos, hemos construido un modelo del tren de laminación, que utilizaremos para analizar el funcionamiento del tren, y posteriormente hacer las pruebas de las diferentes soluciones de planificación, con el objetivo de la optimización del sistema. En la figura 2 se muestra un resumen del modelo de Arena utilizado.

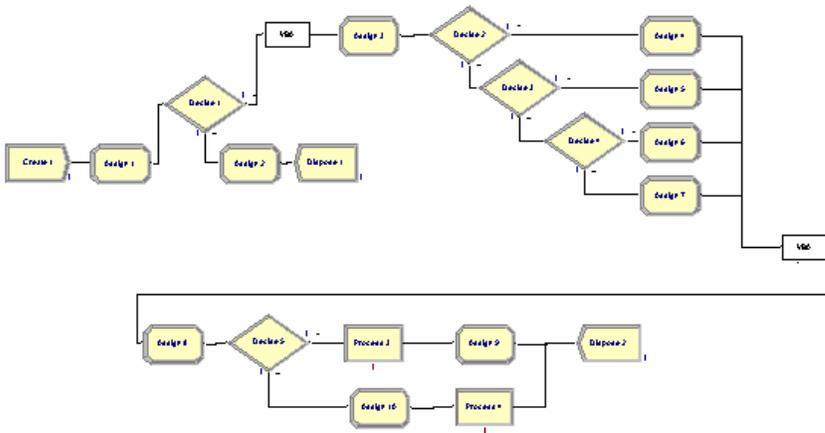
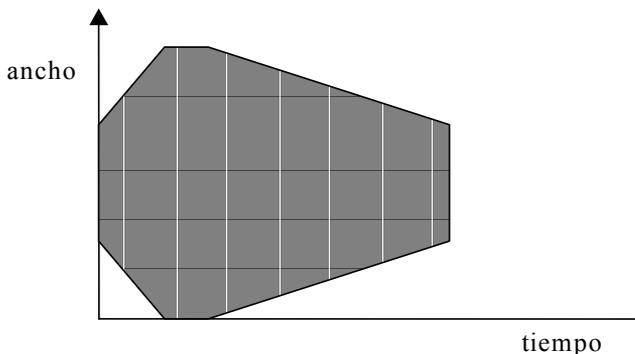


Figura 2: Representación esquemática del modelo construido.

La planificación de la producción en este tipo de trenes, se realiza siguiendo una secuencia de productos que varían en sus Anchos Objetivo de una forma determinada. La organización de las bandas a fabricar, se hace de forma que las tensiones en los cilindros de trabajo del Tren, sean lo menos perjudiciales posible. De esta forma, los pedidos se realizan en orden creciente

de anchos, para después ir descendiendo de forma más gradual. Se intentaría pues describir una tendencia como la mostrada en la figura 3.



Dado el deterioro que sufren los cilindros del Tren, éstos deberán ser repuestos periódicamente. El plan de producción que se lleva a cabo entre 2 cambios consecutivos de cilindros, se conoce con el nombre de *campana*.

Basándonos en esto, y en la información recopilada en la base de datos del Tren, diseñaremos una serie de campañas Tipo, que se ajustarán a las que se dan con más frecuencia en la realidad. Por otro lado, gracias al VBA y a la posibilidad de desplegar formularios que aumenten la interactividad del modelo, también permitiremos que el propio usuario pueda crear una campaña personalizada en función de sus intereses.

Posteriormente, utilizaremos el modelo construido, para simular la producción de las diferentes campañas, con lo que podremos obtener resultados referidos a tiempos de fabricación, utilización de los diferentes procesos (hornos, trenes desbastador y acabador, bobinadoras, etc), posibles cuellos de botella, ineficiencias en el proceso, lo que nos dará la suficiente información para poder tomar decisiones.

5. Conclusiones.

En este trabajo se ha hecho una breve descripción del proyecto de investigación denominado “Simulación y Optimización de la Planificación de un Proceso Continuo: Aplicación a un Tren de Laminación”, que estamos realizando desde Enero de 2002 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Gijón, en el marco de programas nacionales del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003, del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

El proyecto tiene dos vertientes: en primer lugar se pretende estudiar el funcionamiento del tren de laminación semicontinuo de la factoría de Aceralia en Avilés (Asturias) con el objeto de buscar y proponer mejoras. La herramienta fundamental que se empleará en esta fase será la simulación del tren mediante el software de simulación ARENA. En segundo lugar, se intentará optimizar la planificación de los trabajos del tren para lo cual se emplearán técnicas de aprendizaje automático, como son el aprendizaje inductivo, las redes neuronales artificiales y el razonamiento basado en casos.

En el trabajo que presentamos aquí, se describe únicamente la primera fase del proyecto (simulación del tren de laminación), que es en la que estamos trabajando actualmente.

Referencias

- [1] Banks, J. (1998): *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*. John Wiley & Sons.
- [2] Cloud, D.J. and Rainey, L.B. (1998): *Applied Modeling and Simulation: An integrated Approach to Development and Operation*. McGraw Hill
- [3] Kelton, W.D.; Sadowski, R.P. and Sadowski, D.A. (1998): *Simulation with Arena*. McGraw Hill.
- [4] Quinlan, J.R. (1993): *C4.5: Programs for Machine Learning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- [5] Freeman, J.A.; Skapura, D.M. (1991): *Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Reading, MA: Addison Wesley.
- [6] Michalewicz, Z. (1996): *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin: Springer Verlag.
- [7] Watson, I. (1997): *Applying Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise Systems*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- [8] Goldberg, D.E. (1989): *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA: Addison Wesley