

El corte más avanzado

Eficiencia para el recorte de papel

Iiro Harjunkoski, Simo Säynevirta

Es un hecho bien conocido que el éxito de las operaciones complejas depende en gran medida de la posibilidad de planificarlas con antelación. Por eso, una buena parte del trabajo de gestión está destinado a planificar detalladamente las actividades industriales. Aunque las herramientas informáticas de planificación están lejos de ser competitivas frente a la flexibilidad analítica del cerebro humano, los ordenadores realizan determinadas tareas tan bien o mejor que las personas.

En una fábrica de papel, las bobinas gigantes que salen de la máquina de papel se han de cortar en rollos más estrechos de acuerdo con los deseos de los clientes. Un operario humano que ha de encontrar la mejor manera de cortar la bobina necesita bastante tiempo para este trabajo y no tiene garantía alguna de haber encontrado la mejor solución, la que tiene menos pérdidas y asegura la calidad del producto. El problema es más complejo si además hay que desechar algunas zonas del papel por problemas de calidad. No existen dos tareas idénticas, las posibilidades son infinitas. ABB ofrece un paquete de software que determina la estrategia óptima de corte.



Sensores y control

En muchos procesos industriales todavía existe un gran potencial de reducción de costes que espera ser explotado simplemente con mejores estrategias de planificación del tiempo y de las materias primas. En este artículo discutimos una estrategia avanzada de optimización que aúna la planificación off-line con la mejora de la calidad on-line. La solución considera los perfiles de calidad de la bobina gigante y las exigencias que han de satisfacer los rollos cortados de ésta. El resultado es una solución geométrica completa para este problema, el llamado problema 'trim-loss'. Este método conduce a soluciones óptimas, o casi óptimas, y consigue grandes ahorros al abordar el problema de la pérdida de calidad, es decir, la pérdida económica causada por la degradación de la calidad del producto. Entre las ventajas de este método están la reducción del consumo de energía y de materias primas (costes y carga medioambiental), la mejora de la fiabilidad para responder a las demandas del cliente y el aumento de beneficios, gracias a una reducción general de los costes.

El corte de papel

Una máquina de papel típica produce una lámina de diez metros de anchura a una velocidad de 120 km/h (o 33 m/s, es decir, papel suficiente para producir más de 5.200 hojas A4 por segundo). Con un gramaje típico de 80 g/m², esta capacidad equivale a 97 toneladas por hora. La planificación de un proceso como éste afecta decisivamente al producto y a la eficiencia y rentabilidad del proceso. ABB ya ofrece un sistema completo de gestión, total-

mente integrado, de la producción de papel, que cuenta con modernas herramientas de control de calidad (QCS¹) y de inspección óptica de la bobina (WIS). Además, el programa ABB de planificación de la producción está considerado a menudo como la mejor solución. Por consiguiente, es natural que ABB esté buscando métodos que hagan aún mejores y más económicas las soluciones existentes. Esto garantizará que el papel necesario se produce con la máxima eficiencia posible y reduciendo los costes de producción, además de reducir la carga medioambiental por medio de un consumo óptimo de la energía y de los materiales.

El corte de estas 'bobinas gigantes' en otras más pequeñas tiene lugar en una bobinadora posconectada inmediatamente a la máquina de papel. El objetivo principal para reducir los problemas en la producción de papel es minimizar la pérdida de corte, es decir, el desperdicio que se produce cuando no se puede aprovechar toda la anchura de la bobina gigante para producir los rollos buscados. Por ejemplo, si se han de cortar rollos de 1,5 metros de anchura de una bobina gigante de diez metros de anchura, se desperdiciará una banda de 1,0 metros de anchura (10% del total). El problema de intentar combinar varias anchuras de rollos para reducir las pérdidas se conoce comúnmente como problema de minimización de pérdidas por corte o papel sobrante. Para resolver este problema se identifican patrones de corte que se aplican a continuación con una guillotina que tiene las cuchillas en las posiciones deseadas **1**. Los dos objetivos más comunes del problema son los siguientes:

- Determinar una estrategia de corte que produzca las anchuras de rollos requeridas usando la menor cantidad posible de material, es decir, minimizando la pérdida por corte.
- Minimizar el número de patrones diferentes y ordenarlos en secuencia para evitar ajustes innecesarios de cuchillas y maximizar la eficiencia de la producción.

El método adoptado para alcanzar estos objetivos, en ocasiones contradic-

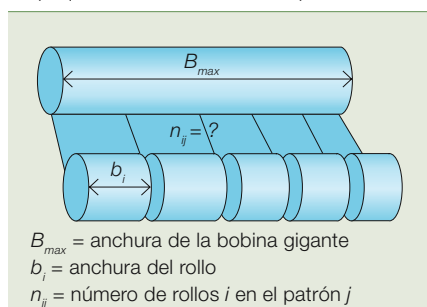
torios, influye enormemente en la solución que finalmente se obtenga. Dado el amplio número de variables discretas, la optimización implica el uso de matemáticas complejas. A menudo existen millones de formas posibles de disponer en la bobina gigante los rollos buscados. Al analizarlas, enseguida se hace evidente que no hay ninguna forma práctica de probar todas las posibilidades, ni siquiera utilizando un superordenador. La magnitud del problema se desborda con el número de rollos, debido al gran número de estrategias posibles de corte. Aunque existen realmente muchos métodos heurísticos y matemáticos para resolver eficientemente un problema de este tipo, ninguno de ellos garantiza un resultado global óptimo. Entre estos métodos están la heurística de redondeo, los métodos de generación de columnas, la resolución parcial de problemas y otros algoritmos de tipo mochila², por citar tan sólo algunos. Viendo este conjunto de métodos conocidos, podría parecer que el problema es resoluble. Pero, ¿proporcionaría un método como éstos, por sí solo, resultados adecuados para el problema del corte de papel?

La calidad del papel

En las modernas fábricas de papel, el problema de pérdidas por corte se resuelve habitualmente cuando se planifica la producción, mucho antes de fabricar realmente las bobinas gigantes.

Esta planificación avanzada sería totalmente adecuada si se pudiera suponer que el papel presenta una calidad uniforme, es decir, es de óptima calidad de principio a fin. Desafortunadamente, eso no siempre es así, ya que pueden producirse variaciones de calidad. Durante el proceso de fabricación del papel se recoge con varios dispositivos de medición y exploración en línea gran cantidad de datos de calidad de acuerdo con diversos criterios, datos que luego se procesan y analizan detenidamente. Casi toda la información resultante está disponible poco después de haber finalizado la producción de la bobina gigante y antes de proceder al corte de la misma. En la figura **2**, las desviaciones de la calidad perseguida se representan por medio de colores.

- 1** Corte de la bobina gigante y problema de pérdidas por corte. ¿Cuál es la mejor forma de cortar una bobina gigante en rollos pequeños de dimensiones especificadas?



Al comparar la distribución real de la calidad con los patrones de corte planificados de una bobina gigante, el plan de corte predeterminado puede estar lejos del óptimo. Por ejemplo, los rollos más valiosos para los clientes pueden haber sido asignados a las peores posiciones en la bobina gigante. Si el papel se cortara de esta forma habría que rechazar esas secciones.

Los antiguos métodos de modelación para la optimización del corte no soportaban la optimización basada en la calidad, ya que el problema estándar de la pérdida por corte no tenía en cuenta la posición exacta de cada rollo en un patrón. El problema se centraba simplemente en las cantidades totales a producir, es decir, en cuántos rollos de un tipo dado contenía cada patrón de corte.

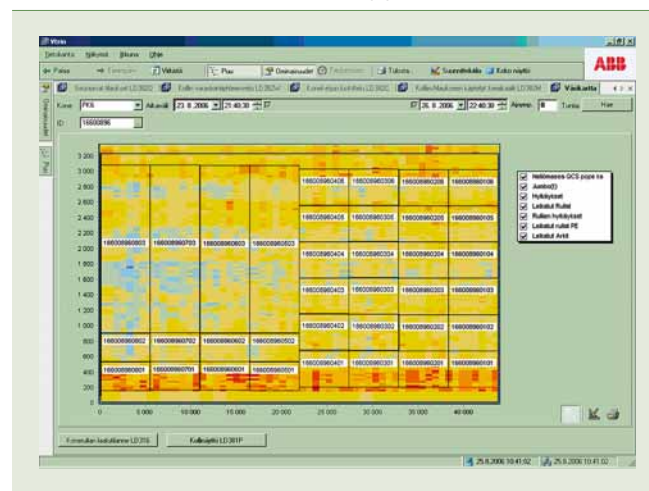
Un método matemático original de programación

El sistema de control de calidad (QCS) realiza exploraciones continuas a lo largo de la bobina de papel y registra información sobre la calidad de la misma. Algunas propiedades como la humedad, el grosor y el brillo se miden muy frecuentemente: en sentido transversal generalmente cada 10-50 mm y en el sentido de la máquina cada pocos centenas de metros, dependiendo de la velocidad de la máquina de papel y del tiempo que necesita el dispositivo de exploración para moverse a todo lo ancho del papel. En la práctica, esto significa que incluso una pequeña máquina de papel registrará miles de puntos de medición para cada criterio de calidad.

Otra tecnología de ABB es el sistema imaging web de la bobina de papel (WIS). En este sistema, varias cámaras buscan todos los defectos visuales (agujeros, grietas, pliegues); las imágenes se analizan eficientemente con métodos basados en redes neuronales, lo que garantiza un proceso rápido y fiable de clasificación y determinación del tipo de defecto.

Además de estos métodos en línea, que proporcionan información rápida y precisa, la calidad se analiza tam-

2 Análisis de la calidad de una bobina gigante (Sistema CPM de ABB)



bién fuera de línea en laboratorios. Esta verificación consume mucho más tiempo y, por tanto, es más adecuada para rastrear tendencias generales de la calidad que para observar las variaciones a corto plazo. La supervisión se basa en muestras seleccionadas y puede conducir al rechazo de una bobina gigante completa.

Integrar estos aspectos de calidad en un modelo matemático estándar de la pérdida por corte aumentaría aún más su complejidad y llegaría a hacerlo irresoluble, ya que añadiría otras exigencias, no implementables, y muchas decisiones discretas. Se necesita un planteamiento alternativo de creación de modelos para conseguir una optimización del corte basada en la calidad. ABB ha desarrollado un original e ingenioso método matemático basado en la programación para el cálculo automático de una solución optimizada del problema de la pérdida por corte. El modelo asume un plan de

corte existente y puede cubrir los diversos perfiles de calidad de una bobina gigante por medio de una representación geométrica al realizar un nuevo corte. Gobernado por requisitos de rendimiento muy estrictos, el modelo matemático en sí mismo es modular y en un primer enfoque considera un patrón (o conjunto) de corte cada vez. Un nuevo posicionamiento de los rollos en el conjunto tiene en cuenta la posición geométrica exacta, así como la información sobre la calidad en toda la anchura de la bobina. Un segundo enfoque examina to-

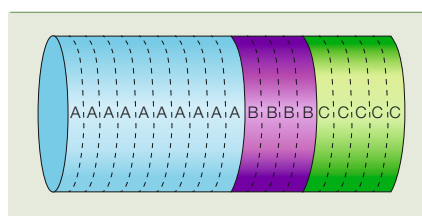
da la bobina gigante con el propósito de establecer del mejor modo posible una nueva secuencia de los patrones fijos de corte. Más tarde, estos dos enfoques se pueden combinar arbitrariamente con un algoritmo inteligente que también puede incluir patrones de todo el proceso de producción. También se tienen en cuenta implícitamente las zonas de rechazo y de empalme. Este planteamiento da como resultado soluciones óptimas o casi óptimas reduciendo significativamente la pérdida de calidad, es decir, la pérdida económica causada por la degradación de la calidad. Esto aumenta la rentabilidad de la producción y ofrece más fiabilidad a los clientes: un mejor enfoque de la gestión de la calidad aumenta la satisfacción del cliente.

Dos pasos hacia el éxito

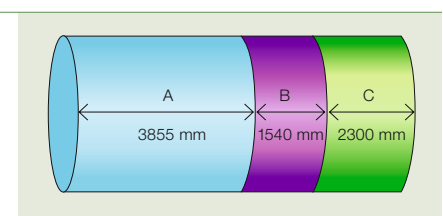
Para hacer resoluble este importante y complejísimo problema, el nuevo planteamiento matemático incluye dos pasos principales. En el primero, la

3 Dos métodos para encontrar la forma óptima de cortar la bobina gigante

a Método discreto: el algoritmo explora el papel, la solución considerada sólo puede variar en pasos discretos.



b Método continuo: las dimensiones son infinitamente variables. Este método es mucho más difícil de optimizar que el método discreto de a.



Sensores y control

bobina gigante se transforma en elementos discretos dividiéndola en ‘trozos’ **3a**. La calidad de cada trozo se correlaciona con los requisitos de los clientes. El modelo de optimización resultante se basa en una clasificación de la calidad, por ejemplo calidad A, B o C. La calidad final de cada rollo se calcula combinando la correlación de calidades con los requisitos básicos del rollo de producto. Este método, basado en la división en elementos discretos, genera una buena aproximación a la solución óptima.

La solución se perfecciona en un segundo paso, que aplica un método continuo y exacto, garantizando la viabilidad de la solución final. Esto permite también un suave ajuste del borde de cada conjunto. El método continuo se basa en dividir la bobina gigante en zonas de calidad continua, o sectores, de acuerdo con las diversas clasificaciones de la calidad **3b** de cada rollo. Cada sector se asocia a su respectiva calidad (de nuevo: A, B, C). Análogamente al primer paso, el cálculo combina la correlación de la calidad con ciertos parámetros básicos del rollo de producto. El resultado de este paso es una estrategia óptima que tiene en cuenta la distribución de la calidad en la bobina gigante.

Ninguna de estas dos estrategias puede tratar problemas muy complejos de forma exacta y eficiente, pero este método de dos pasos es robusto y eficaz. Este planteamiento permite evitar la naturaleza no convergente del problema y garantiza rápidamente una solución casi óptima.

Matemáticas ocultas

El usuario no tiene que ocuparse de las matemáticas o algoritmos subyacentes al sistema. La funcionalidad puede integrarse completamente en el entorno existente; la solución trabajará silenciosamente en la sombra, simplemente generando ventajas para los clientes. No obstante, a continuación examinamos algunas características principales del sistema para aquellos lectores interesados en mirar detrás del escenario.

El planteamiento comprende la resolución de programas lineales de números enteros mixtos (MILP) dentro de algoritmos especializados y utiliza

tecnologías robustas y probadas. Los modelos matemáticos tienen ciertas similitudes con la programación de la producción, ya que ambos incluyen decisiones lógicas esenciales. En la programación, el horizonte temporal se discretiza mediante un número fijo de puntos de cuadrícula que se asignan a trabajos por medio de variables binarias. En el contexto de optimización del recorte de papel, la anchura o la longitud de la bobina gigante ocupa el lugar de la variable del tiempo.

Centrémonos en el nuevo corte de un conjunto y supongamos que un rollo se representa con un índice r y cada ‘trozo’ discreto con un índice j . Entonces, la variable binaria (cero-uno) xd_{rj} toma el valor uno en la posición de la bobina gigante j , en la que comienza el rollo r (borde izquierdo). Para realizar una optimización que maximice el valor total de un conjunto de corte se requiere también un coeficiente de costes, c_{rj} , que indica el valor del rollo en la posición dada. La función objetivo es muy sencilla, ha de definir las posiciones de rollos r que maximicen el valor total de un conjunto de corte. Esto se expresa en la ecuación (1) siguiente:

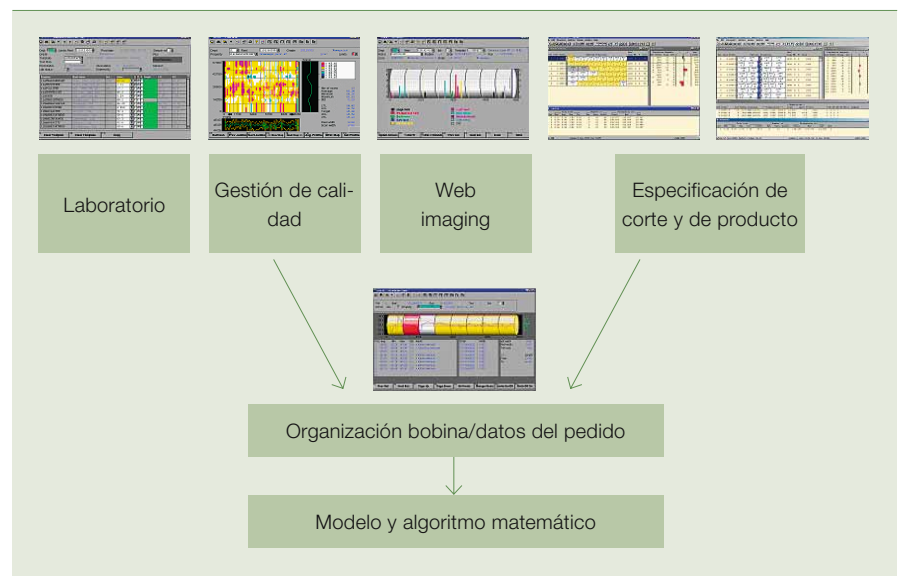
$$\max \sum_{r,j} c_{rj} \times xd_{rj} \quad (1)$$

$$xd_{rj} \in \{0,1\}$$

Para que todo esté definido matemáticamente de forma correcta, se introducen ecuaciones que garantizan el no solapamiento de los rollos y que cada rollo se fabrique exactamente cuando corresponde. Tales ecuaciones pueden parecer triviales, pero en ocasiones resultan ser bastante complejas. El problema discretizado da como resultado un plan de corte óptimo con respecto a una densidad de cuadrículas elegida. Para bobinas gigantes con anchuras típicas de hasta 10.000 mm, una cuadrícula fina (1 mm) haría irresoluble la magnitud del problema. Por consiguiente, se selecciona una cuadrícula más gruesa (10-20 mm). En este caso, las anchuras de los rollos se han de redondear por defecto para mantener la viabilidad del problema (por ejemplo, 578 mm se convierten en 570 mm cuando se usa una cuadrícula de 10 mm). Estos errores de redondeo se corrigen en un paso continuo consecutivo.

El paso continuo se asemeja también a algunas estrategias de planificación, ya que divide la bobina gigante en espacios pequeños (slots). Estos slots se ordenan de izquierda a derecha, y los bordes entre ellos son continuamente variables, es decir, pueden adaptarse a las respectivas anchuras de rollos de clientes. A cada rollo se le asigna exactamente un slot y un sector de calidad utilizando variables binarias.

- 4** Componentes de aplicación cruzada, al buscar un óptimo global se han de considerar muchos factores distintos.



En las ecuaciones (2)-(5), los slots se indican con la variable n y los sectores con s . Así pues, una variable binaria x_{rn} toma el valor uno sólo si el rollo r está asignado al slot n . Análogamente, la variable x_{rs} indica que el rollo r está situado en el sector de calidad s . W_r indica la anchura del rollo, r_r^{start} la posición del borde izquierdo de un rollo, W_n^B y W_n^E las posiciones inicial y final de un slot y, finalmente, S_s^B y S_s^E las posiciones inicial y final de los sectores.

$$W_n^E = W_n^B + \sum_r x_{rn} \cdot W_r \quad (2)$$

$$r_r^{start} = W_n^B \text{ if } x_{rn} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_s x_{rs} = 1 \quad (4)$$

$$S_s^B \leq r_r^{start} \leq S_s^E \text{ if } x_{rs} = 1 \quad (5)$$

$$x_{rn}, x_{rs} \in \{0,1\}$$

En resumen, la ecuación (2) ajusta la anchura de un slot de acuerdo con el rollo que se le ha asignado. El slot debe empezar exactamente en el borde izquierdo del rollo, condición impuesta en la ecuación (3). El hecho de que un rollo sólo pueda pertenecer a un sector de calidad se expresa en la ecuación (4), y finalmente el rollo ha de estar situado dentro de este sector, condición indicada por la ecuación (5). Éstas son tan sólo algunas limitaciones básicas del problema que ilustran algunas de las principales dependencias matemáticas y lógicas.

Un algoritmo inteligente puede reducir al mínimo físico las pérdidas de calidad. Esto garantiza que la planificación tiene en cuenta todos los datos de calidad conocidos.

Un algoritmo para integrar todos los componentes

Los componentes discutidos hasta ahora se visualizan en 4. Más importante que dominar los detalles matemáticos del modelo es comprender cómo ensamblar los elementos para formar un concepto robusto y uniforme. Para ilustrar esto vamos a ver de nuevo el problema original. Los aspectos del modelado matemático antes expuestos, combinados con el planteamiento de dos pasos, permiten encontrar una solución del problema de recorte eficiente y basada en la calidad. La estrategia resultante se puede aplicar de varias formas: la reorganización se puede ejecutar con un conjunto cada vez 5a, o cambiando la secuencia de conjuntos en una bobina gigante 5b.

En el caso anterior (enfocado a un conjunto de corte planificado), el conjunto se ajusta de modo que los rollos

se reposicionan para maximizar el valor total (rendimiento de la calidad), minimizando, por tanto, el efecto de las desviaciones de la calidad. Un ejemplo simplificado sería situar el rollo más valioso en una buena zona. En 5a, el color rojo indica que se debe rechazar el rollo y el color amarillo indica la existencia de desviaciones de la calidad poco importantes (calidad B).

La misma técnica podría utilizarse también para reordenar la secuencia de los conjuntos en una bobina gigante 5b. Como consecuencia del principio anterior, combinando la información sobre la distribución de la calidad con el plan de corte de la bobina gigante se puede mejorar el rendimiento de la calidad. Esto se consigue situando los conjuntos en aquellas posiciones donde el valor total es máximo.

Un algoritmo inteligente que resuelva estos dos problemas en una secuencia dada puede reducir las pérdidas de calidad a un mínimo físico. Esto garantiza que la planificación actual tiene en cuenta todos los datos de calidad conocidos. También se pueden implementar en la solución zonas de empalme y rechazo automáticos de la bobina gigante en sentido transversal, además de considerar patrones de todo el proceso de producción. Como conclusión, la aplicación cruzada entre planificación de la producción y gestión de la calidad ofrece posibilidades adicionales para hacer más atractiva la producción, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

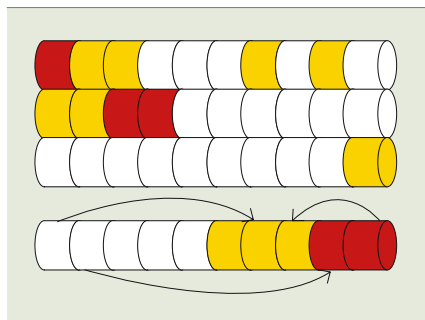
Un ejemplo ilustrativo

Seguidamente se discute un ejemplo simplificado. Se supone un conjunto de corte con las anchuras de rollos del Cuadro de la página 58.

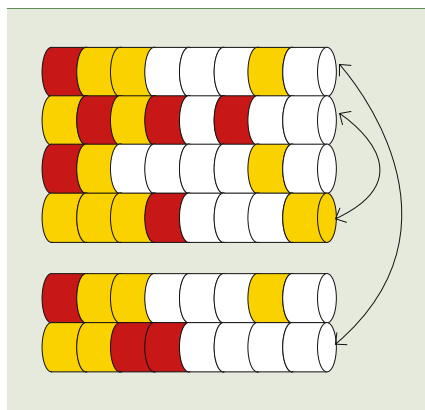
La bobina gigante del ejemplo tiene una anchura de corte de 8.000 mm. La suma de las anchuras de los rollos a cortar es 7.915 mm, lo que origina una pérdida por corte de 85 mm. En este ejemplo, se supone que cada rollo tiene exactamente los mismos requisitos de calidad. Por consiguiente, el ejemplo se puede simplificar dividiendo directamente la bobina gigante en varias zonas de calidad.

5 Métodos de optimización

a Ajuste de un conjunto



b Cambio de la secuencia de conjuntos



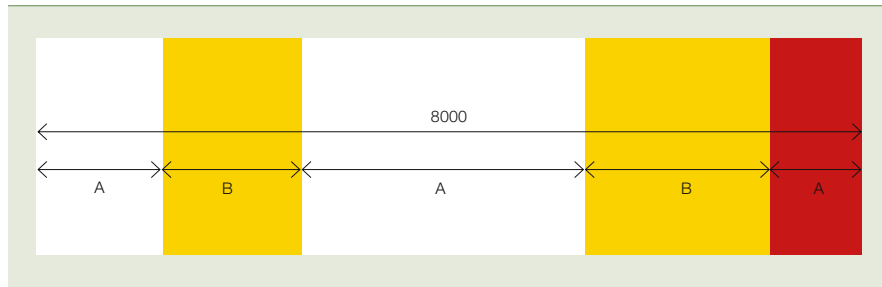
Rollos de papel fuera de la máquina, listos para embalar



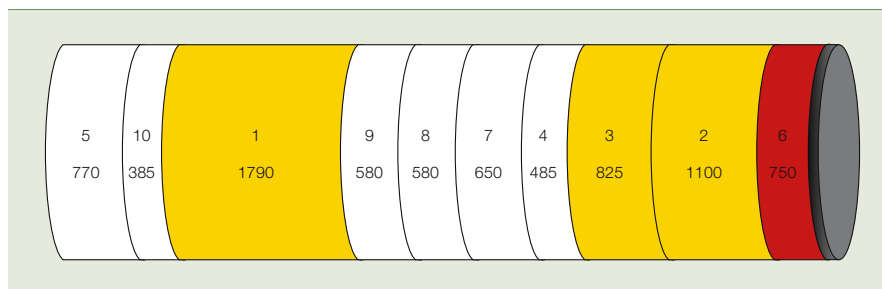
Sensores y control

6 Esquema de calidad de la bobina

a El problema



b El conjunto de corte resultante (calidades: A = blanco, B = amarillo, C = rojo)



Cuadro Datos para el problema ejemplo (anchuras de rollo)

Rollo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anchura (mm)	1790	1100	825	485	770	750	650	580	580	385

Si un rollo comprende varias zonas de calidad, se valora de acuerdo con la calidad peor. A efectos de ilustración se muestra una distribución de la calidad en 6a, donde ésta se divide en calidades A, B y C. Para los problemas de optimización indicados más abajo, el valor de cada rollo se calcula a partir de los supuestos siguientes: longitud del conjunto = 5.896 m, peso del papel = 80 g/m², precio = 500 €/tonelada, calidad A (calidad completa) =

100 por ciento del precio, calidad B (defectos poco importantes) = 70 por ciento del precio y calidad C (rechazada) = 0 por ciento del precio. Sin optimización, simplemente ordenando los rollos en el conjunto como se indica en el Cuadro, resultaría un beneficio total de 1.236 €. El algoritmo de recorte basado en la calidad halla una solución de 1.427 € 6b, que representa una mejora en torno al 15 por ciento. La eficiencia de la optimización se puede ajustar y siempre hay una alternativa entre calidad y eficiencia de la solución. Sin embargo, la estrategia combinada proporciona un buen resultado en un tiempo razonable.

Eliminación de pérdidas

La solución discutida no eliminará los problemas de calidad pero minimizará sus efectos garantizando que la planificación esté siempre orientada hacia la opción más rentable, aprovechando al máximo la calidad real dada. Además, un mejor conocimiento de la calidad también permite mejorar la

cultura general de planificación y reforzar la capacidad de identificar y analizar la eficiencia de la producción respecto de la calidad.

El objetivo principal en los problemas de corte es minimizar el desperdicio que se produce cuando no se puede aprovechar toda la anchura de la bobina gigante para producir los rollos buscados.

Menor pérdida de calidad significa:

- menores tiempos de producción
- menos reciclaje de rollos rechazados
- menor consumo de energía y materias primas
- mayor compromiso con los requisitos de calidad del cliente
- fechas de entrega más fiables
- mínimo impacto medioambiental
- menores costes totales de producción
- menos reclamaciones por falta de calidad
- más satisfacción del cliente

Estos aspectos pueden parecer triviales, pero, en realidad, la solución propuesta contribuye a integrar este punto de vista en el pensamiento de operación de cada día.

Iiro Harjunkoski

ABB Corporate Research
Ladenburg, Alemania
i.iro.harjunkoski@de.abb.com

Simo Säynevirta

ABB Process Industries
Helsinki, Finlandia
simo.saynevirta@fi.abb.com

Notación

$x d_{rj}$	= 1, si el rollo r comienza en el punto de cuadrícula j
c_{rj}	= valor del rollo r en el punto de cuadrícula j
x_{rm}	= 1, si el rollo r está asignado al slot m
x_{rs}	= 1, si el rollo r está situado en el sector s
r_r^{start}	= borde izquierdo del rollo r
W_r	= anchura del rollo r
W_n^B	= comienzo (borde izquierdo) del slot n
W_n^E	= final (borde derecho) del slot n
S_s^B	= comienzo (borde izquierdo) del sector de calidad s
S_s^E	= final (borde derecho) del sector de calidad s

Notas

¹⁾ QCS: Sistema de Control de Calidad

²⁾ El problema de la mochila es una tarea de optimización combinatoria, cuyo objetivo es identificar el subconjunto de un determinado conjunto de objetos de modo que la suma de sus valores esté lo más cerca posible de un límite dado, sin superarlo. El nombre proviene de un caso en el que hay que colocar el mayor número posible de objetos dentro de una mochila de tamaño limitado.