Optimización de cortes en bobinas de chapa de acero a través de un recurso de la inteligencia artificial

Giró Juan[1,2], **Mira Natalia**[1] **y Boggio Alejandra**[1]

[1]*Instituto Universitario Aeronáutico, Facultad de Ingeniería, Departamento Informática*

[2]*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información*

Abstract

Se presenta una experiencia realizada al resolver un problema de optimización combinatoria para la industria metalúrgica. El objetivo fue definir la mejor forma de distribuir cortes de flejes de distintos anchos en bobinas de chapas de acero y para ello se implementó un proceso de búsqueda en el espacio de estados. Se describe el método empleado, cuya originalidad está en la propia aplicación y en la forma en que fue implementado. Se discuten los resultados obtenidos con dos casos de estudio representativos del problema.

Palabras Clave

Optimización de cortes, búsquedas en el espacio de estados.

Introducción

A lo largo de toda su historia el hombre buscó la eficiencia y puede decirse que ésta es una de las manifestaciones de su inteligencia. Naturalmente que los recursos disponibles y el foco de la atención fueron cambiando en el tiempo; en un principio se buscaron mejores herramientas para tareas individuales realizadas en forma artesanal y con el advenimiento de la revolución industrial se sumó primero el interés por los procesos productivos y posteriormente por su planificación. Es así que a lo largo del tiempo la búsqueda de mejores resultados con menor esfuerzo, en un marco de rivalidad y competencia, fue una característica distintiva de la actividad humana. En este contexto se comprueba que los progresos en ciencia y tecnología tuvieron en las mejoras de la actividad industrial un destino prioritario. Más aún, esta última fue un estímulo para orientar un enorme esfuerzo de investigación hacia la mejora de los procesos productivos y su optimización.

Es así que los campos de la investigación operativa, inteligencia artificial, teoría de algoritmos, teoría de la complejidad computacional e ingeniería de software, con fronteras muchas veces difusas entre ellos, hicieron sus aportes a numerosas disciplinas orientadas a la optimización y entre ellas debe citarse a la *optimización combinatoria*. En particular, es la teoría de la complejidad computacional la que permite comprender la importancia de la *optimización combinatoria*, que se ocupa de problemas en los que existe un enorme espacio de estados o de condiciones, que aún con los recursos de computación actualmente disponibles, hace imposible la utilización del análisis exhaustivo para identificar una o más soluciones, o la mejor de ellas. Los algoritmos de *optimización combinatoria* logran superar esta dificultad reduciendo el tamaño efectivo del espacio de estados a través de técnicas heurísticas, lo que permite su exploración de manera eficiente. En otros términos, hay problemas cuya solución es de complejidad exponencial, están relacionados a problemas ***NP*** y son caratulados como *intratables*, pero pueden ser resueltos con técnicas de complejidad polinomial, al costo de no poder asegurar que la solución obtenida sea óptima pero sí suficientemente buena.

Entre los procedimientos empleados para resolver problemas de *optimización combinatoria* pueden citarse las técnicas de *búsqueda en el espacio de estados* y la *programación lineal*. Esta última está destinada a resolver problemas indeterminados, en la que se formulan sistemas de inecuaciones lineales que tienen por finalidad posibilitar la optimización de una función objetivo. La *programación lineal* brinda respuestas eficaces a numerosos problemas, muchos de ellos típicamente industriales, pero encuentra una seria restricción cuando las variables involucradas solo admiten valores enteros, lo que conduce a emplear técnicas específicas para abordar estos casos que desafortunadamente son muy frecuentes. Por el contrario, el uso de los métodos heurísticos de *búsquedas en el espacio de estados* tiene la ventaja de no presentar la limitación antes señalada. Se trata de un recurso clásico de la inteligencia artificial cuya aplicación a este tipo de problemas es más reciente.

Una aplicación muy frecuente de las técnicas de la *optimización combinatoria* es la denominada "optimización de cortes", que involucra la más amplia variedad de materiales y tipos de corte [1][2][3]. Pueden citarse como ejemplos los cortes de prendas de vestir, maderas, vidrio, piezas de plástico y metales, en todos los casos buscando la obtención de las formas y cantidades requeridas con el máximo aprovechamiento del material disponible [4][5].

El trabajo aquí presentado se refiere a la resolución de un problema de *optimización combinatoria* originado en la industria metalmecánica [6][7] y su finalidad es planificar el corte de bobinas de chapa de acero para cubrir la demanda diaria de flejes de diferentes anchos, espesores y calidades. Está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se detalla el problema y las condiciones requeridas para resolverlo, en la Sección 3 se describen las soluciones implementadas y en la Sección 4 se presentan dos casos de estudio, los resultados obtenidos con los métodos propuestos y su análisis. Finalmente, en la Sección 5 se enuncian las conclusiones de este trabajo y su proyección futura.

Descripción del problema

La materia prima que da lugar al problema objeto de este trabajo está constituida por bobinas de chapa de acero. Las bobinas se distinguen por la calidad del material y el espesor de la chapa, y la planta industrial puede tener acopiadas alrededor de medio centenar de estas bobinas, repartidas en varios espesores y calidades. Todas estas bobinas, cuando están completas, tienen un ancho del orden de 1.000 mm y un peso en el rango de 2.500 a 3.000 Kg. Además, hay también un stock de otro medio centenar de remanentes de bobinas de menor ancho y/o diámetro que son consecuencia de cortes efectuados con anterioridad.

El primer paso del proceso productivo consiste en cortar transversalmente las bobinas en "tiras" de acero de cierto ancho denominados "flejes", para lo cual la bobina es desenrollada, cortada y los flejes nuevamente enrollados e identificados hasta su utilización. La máquina de corte opera en forma continua y puede hacer hasta diez cortes longitudinales simultáneos sobre una bobina, generando hasta nueve flejes que pueden tener igual o diferentes anchos, descartando en cada extremo un borde de alrededor de 5 mm con el fin de eliminar defectos e irregularidades. El radio interior de las bobinas originales no es uniforme, pero a medida que la chapa es cortada los flejes son enrollados con un radio interior único ***r*** predeterminado.

Los cortes a ser efectuados obedecen a un "requerimiento de cortes" que surge de las previsiones de la planificación de la producción. Cada "requerimiento de cortes" se refiere a cierta calidad y espesor de chapa y establece: *i*) los anchos de los flejes requeridos y *ii*) las cantidades de chapa que son necesarios de cada uno de esos anchos, que son expresadas en kilogramos. Un "requerimiento de cortes" puede incluir hasta veinte anchos diferentes y normalmente involucra entre una y cinco bobinas.

El objetivo planteado es la definición de un "plan de cortes" óptimo que brinde respuesta a estos requerimientos, es decir que identifique las bobinas más convenientes para cada caso y distribuya en ellas los cortes de manera de cubrir la demanda de cada uno de los anchos con una cantidad mínima de material cortado en exceso.

Solución propuesta

Una vez analizado el problema planteado se llega a la conclusión de que su solución incluye dos etapas, según se describen a continuación:

a) Identificación del grupo de bobinas más apropiado para cubrir globalmente la demanda total de kilos de flejes de chapa a ser cortados con el menor excedente posible.

b) Definición del “plan de cortes”, que describe la distribución de los anchos a cortar de cada una de las bobinas del grupo identificado, de manera de alcanzar el total de kilos requerido para cada uno de los anchos solicitados con la condición que el material remanente sea mínimo.

Al plantearse las mencionadas etapas surgió el interrogante sobre la posibilidad de que ambas condiciones fueran en algunos casos mutuamente excluyentes, lo que representa un aspecto a ser analizado.

Identificación de bobinas

La identificación de bobinas implica conocer previamente aquellas que están disponibles en el stock, con el espesor y calidad requeridos, para luego seleccionar el conjunto que mejor cubra la demanda en kilos del requerimiento de cortes.

En su enfoque más simple, se trata de evaluar los pesos de combinaciones de ***n*** elementos agrupados en conjuntos de ***k*** elementos, donde ***n*** representa la cantidad de bobinas disponibles en el stock con la calidad y espesor requerido y ***k*** la cantidad de bobinas que integra cada grupo. Normalmente los valores de ***k*** están comprendidos entre uno y cinco, dándose prioridad a los grupos más numerosos por ser la forma de asegurar el consumo de los remanentes de bobinas de menor ancho y/o diámetro. Como resultado de esta tarea se espera conocer el conjunto de ***k*** bobinas cuyo peso total sea el más próximo al peso requerido.

Para estimar el esfuerzo demandado se tomó ***n*** = 30 como valor de referencia de la cantidad de bobinas de cierto material que pueden estar disponibles en el stock y se hizo una estimación de la máxima cantidad de conjuntos ***N*** de bobinas con $1 \leq \boldsymbol{k} \leq 5$ que pueden llegar a ser considerados, según se describe a continuación:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{N} &= \sum_{k=1}^{5} \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{n}} = \sum_{k=1}^{5} \frac{\boldsymbol{n}!}{(\boldsymbol{n}-\boldsymbol{k})!\,\boldsymbol{k}!} = \\ &= 30 + 435 + 4060 + 27405 + 142506 = \quad (1) \\ &= 174436 \end{aligned}$$

Si bien el valor indicado no es despreciable, tampoco representa un esfuerzo de cómputos significativo. Se implementó por lo tanto un algoritmo que evalúa en forma exhaustiva los pesos de los posibles conjuntos de bobinas, comenzando por los conjuntos más numerosos (***k*** = 5), hasta encontrar el conjunto cuyo peso esté más próximo a la cantidad de material requerido, tomando un margen en exceso compatible con los requisitos de la siguiente etapa.

Definición del Plan de Cortes

Una vez identificadas las bobinas que resultan más convenientes para totalizar un cierto peso, el próximo paso es definir la distribución de los anchos a cortar en cada una de estas bobinas hasta alcanzar el total de kilos requerido para cada uno de los anchos solicitados. La condición que el material remanente sea mínimo implica: *i*) aprovechar completamente el ancho de las bobinas con excepción de los bordes de 5 mm (scrap) y *ii*) incluir como variable el espesor (***e*** = ***R*** - ***r***) de la corona a ser cortada para cierta distribución de anchos. Esto significa que puede quedar un remanente de la bobina de radio exterior ***R***, que será utilizado con otro esquema de cortes para ese mismo plan de cortes o será devuelto al stock para ser utilizado en otra oportunidad.

Aquí es necesario analizar las implicancias del problema planteado, ya que definir la distribución óptima de anchos para el aprovechamiento total de una bobina implica explorar un espacio de estados muy numeroso. Considerando que de cada bobina se obtienen como máximo nueve flejes ($\boldsymbol{b} = 9$) y los distintos anchos a cortar pueden ser hasta veinte ($\boldsymbol{a} = 20$), se deduce que la dimensión $\boldsymbol{X}$ del espacio de estados del problema (Ecuación 2) es de nada menos que quinientos mil millones de combinaciones de cortes, aclarando que muchas de ellos representan una solución inviable por exceder el ancho de las bobinas.

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{a} + \boldsymbol{a}^2 + \boldsymbol{a}^3 ... + \boldsymbol{a}^b = \\ = \frac{(\boldsymbol{a}^b - 1)\boldsymbol{a}}{(\boldsymbol{a} - 1)} \approx \boldsymbol{a}^b \approx 0,5 \times 10^{12} \quad (2)$$

Ante la enorme dimensión del espacio de estados del problema se concluye que es absolutamente impracticable buscar la solución a través de un análisis exhaustivo y es necesario emplear recursos alternativos de cálculo. Después de evaluar diversas opciones se optó por los métodos heurísticos *primero el mejor* y *A**, que son clásicos de las búsquedas en el espacio de estados. A través de heurísticas apropiadas estos métodos reducen enormemente la dimensión del espacio de estados a ser explorado, llevando el problema a uno de complejidad polinomial.

Aquí es necesario recordar que el uso de métodos heurísticos implica incorporar estrategias de control en los procesos de búsquedas a partir de la utilización de funciones que permitan comparar la conveniencia de alcanzar un cierto estado en relación con otros. Así, el proceso de búsqueda se centra en identificar sucesivos estados intermedios que tengan las mejores posibilidades de conducir al estado objetivo y su eficacia está supeditada a la adecuada selección de las funciones heurísticas. En efecto, una función heurística inadecuada no cumplirá su misión de reducir la dimensión del espacio de estados y degenerará en una búsqueda exhaustiva en el mismo. Con fines ilustrativos se representa en la Figura 1 el esquema de una bobina, los cortes previstos y la fracción imaginaria del árbol de espacios de estados que conduciría a definir la secuencia de cortes que resulta más apropiada para aprovechar completamente la dimensión de la bobina.

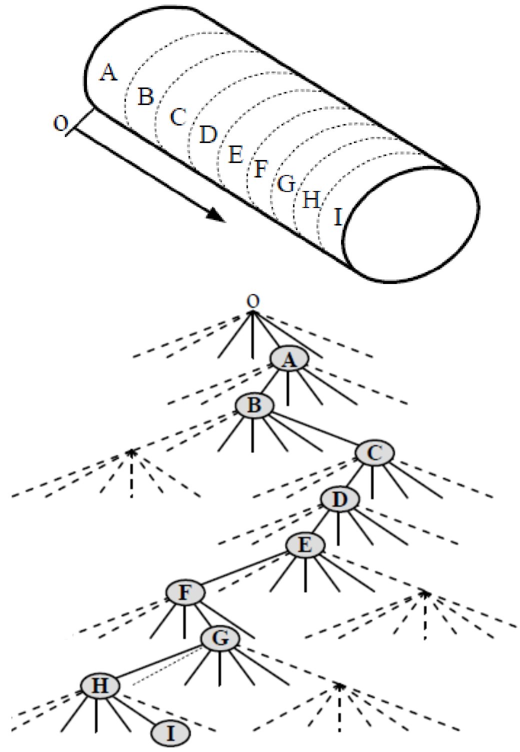

Figura 1: Esquema de los cortes previstos en una bobina y del árbol de búsqueda en el espacio de estados que permitió su determinación.

Normalmente se reserva el nombre de *búsqueda primero el mejor* [8] para el procedimiento en que se adopta la función heurística $\boldsymbol{f} = \boldsymbol{h}$, donde $\boldsymbol{h}$ considera la conveniencia que ofrece cada estado en relación con el estado objetivo. En el caso de la implementación realizada, $\boldsymbol{h}$ representa el largo remanente de bobina a ser cortada cuando en cada nivel se opta por un cierto ancho de fleje.

La variante clásica del método anterior consiste en incorporar la evaluación de una función adicional, de manera que $\boldsymbol{f} = \boldsymbol{h} + \boldsymbol{g}$, donde $\boldsymbol{h}$ tiene el mismo significado anterior y $\boldsymbol{g}$ represente el costo de las opciones ya elegidas hasta el momento, dando lugar al método denominado ***A**** [8]. En el problema estudiado $\boldsymbol{g}$ es evaluado a partir de la profundidad alcanzada en el árbol del espacio de estados.

Tal como el problema ha sido planteado y a raíz de la forma en que la función $\boldsymbol{h}$ es evaluada, en la previsión de cortes tienen preferencia los mayores anchos y los valores menores son usados para completar el ancho de las bobinas o quedan agrupados al final. Para poder revertir esta situación se incorpora a la función heurística f un nuevo término αw destinado a penalizar los mayores anchos, resultando:

$$f = h + g + \alpha w \qquad (3)$$

donde w representa el ancho de fleje asociado a cada estado y α es un multiplicador que debe ser ajustado en cada caso. A medida que aumenta α los menores anchos tienen mayor prioridad en la selección de los cortes.

Por último, se incorporó la condición de que en caso de que el último fleje de cada ancho exceda en un porcentaje β al total del peso requerido para esa dimensión, éste sea asignado a la última bobina. Esto permite reunir en la última bobina a todos los flejes que hubiesen sido cortados en exceso y su finalidad es poder desdoblar esa bobina en dos. La primera tendrá el espesor de corona necesario para cubrir la demanda de los flejes ya asignados y la segunda puede también ser utilizada con otros anchos en caso que haya más material a cortar o ser devuelta al stock en caso de no utilizarse.

Para completar la definición de la solución propuesta falta señalar que la implementación del proceso de búsqueda en el espacio de estados responde al esquema clásico de operar sobre dos listas, una de nodos "abiertos" y otra de "cerrados" [8][9].

Casos de estudio y resultados obtenidos

Con el objeto de mostrar el desempeño del método propuesto se presentan dos casos de estudio, que son descriptos y sus resultados analizados a continuación.

Caso de Estudio N. 1

El primer Caso de Estudio tiene la finalidad de ilustrar el efecto de la variación de los coeficientes α y β en el proceso de resolución de problemas. Con este fin se utilizan dos cilindros de idéntico diámetro que deben ser cortados en respuesta a un requerimiento que excede ampliamente el peso total de los cilindros. Esto es así para disponer de múltiples soluciones según los coeficientes utilizados, todas las cuales buscan el mejor aprovechamiento del material disponible. Al utilizarse cilindros iguales los flejes de cada ancho tienen el mismo peso, indistintamente del cilindro del que son cortados. Los resultados son representados sobre diagramas "radar" que tienen tantos ejes como anchos requeridos, en este caso ocho. Los cortes previstos son mostrados en la Tabla 1 y el material disponible en la Tabla 2.

Tabla 1: Requerimiento de cortes de flejes

No.	Ancho [mm]	Peso [Kg]	No.	Ancho [mm]	Peso [Kg]
1	190	1.000	5	150	1.000
2	180	1.000	6	140	1.000
3	170	1.000	7	120	1.000
4	160	1.000	8	30	1.000
		Peso Total			**8.000**

Tabla 2: Material disponible

	Peso [Kg]
Bobina 1	**2.538**
Bobina 2	**2.538**
Total	**5.076**

En la Figura 2 se muestran sobre el diagrama radar tres resultados obtenidos, con diferentes valores de α y donde el coeficiente β es nulo.

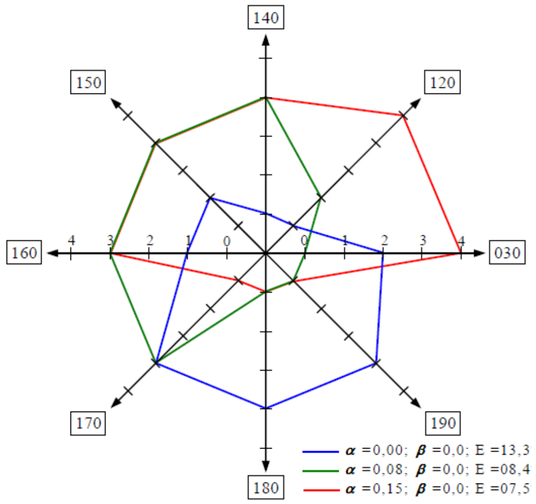

Figura 2: Cantidad de cortes de cada ancho con diferentes valores de α

En la Figura 3 se muestran con el mismo diagrama otros tres resultados obtenidos manteniendo α constante y variando β. En todos los casos la distribución geométrica de cortes obtenida fue óptima, en el sentido que se aprovechó completamente el ancho del material disponible.

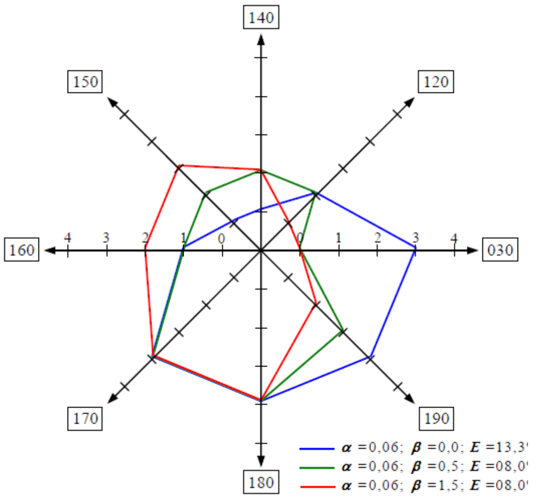

Figura 3: Cantidad de cortes de cada ancho con diferentes valores de β

Como se observa en la Figura 2, los valores crecientes de α corren notoriamente el polígono de la solución del problema hacia una menor presencia de flejes de mayor ancho y un aumento de la cantidad de flejes más angostos (polígono azul → verde → rojo). Con esta representación en el diagrama radar el polígono se recuesta primero abajo, luego a la izquierda y finalmente arriba. La variable E representa el porcentaje de material cortado en exceso sobre el total requerido.

Los resultados mostrados de la Figura 3 fueron obtenidos con un mismo valor de α = 0,06 y con el coeficiente β que aumentó de 0 a 0,5 y finalmente a 1,5. Como puede observarse, aquí el efecto es menos categórico que en el caso anterior, se verifica un reacomodamiento de las presencias de los diferentes flejes en las soluciones, sin que haya una tendencia tan notoria en el corrimiento de los polígonos correspondientes, que se mueven a la izquierda.

Como se aprecia, ambos coeficientes le brindan mucha flexibilidad al método propuesto al permitir la obtención de diferentes soluciones, todas geométricamente óptimas. Como contrapartida, estos coeficientes conducen a la necesidad de un proceso exploratorio, para determinar los valores de α y β más convenientes para alcanzar la mejor solución que haga mínimo el sobrepeso de los cortes requeridos. La definición de criterios que permitan una selección automática de los valores heurísticos más apropiados es un trabajo previsto que se apoyará en la experiencia que se reúna progresivamente.

Caso de Estudio N. 2

El segundo caso de estudio seleccionado corresponde a la definición de un plan de cortes para responder a una demanda de requerimiento de material que incluye los diez anchos de flejes diferentes que son presentados en la Tabla 3.

El primer paso es seleccionar el conjunto de bobinas que tengan el peso en exceso más próximo al peso total de material solicitado en los requerimientos. A partir del material disponible en stock se identificó ese conjunto, que está compuesto por cinco bobinas y es mostrado en la Tabla 4. Tal como fue anticipado en el punto anterior, la identificación de las bobinas es realizada a través de un análisis exhaustivo de las combinaciones posibles y no requiere brindar mayores detalles.

Tabla 3: Requerimiento de cortes de flejes

No.	Ancho [mm]	Peso [Kg]	No.	Ancho [mm]	Peso [Kg]
1	350	2.200	6	150	1.200
2	300	1.800	7	100	1.100
3	250	1.800	8	80	200
4	200	1.400	9	40	100
5	180	1.100	10	20	100
		Peso Total			11.000

Tabla 4 : Material seleccionado para cubrir los requerimientos [Kg]

Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4	Bobina 5
2.538	2.551	2.609	2.559	2.456

Una vez definidos los anchos requeridos y los pesos necesarios de cada uno, se procede a aplicar el método de búsqueda en el espacio de estados destinado a definir el Plan de Cortes. Como ya fue señalado, la eficacia de este método se apoya en la oportuna definición de las funciones heurísticas y esto debe por ahora ser hecho a partir de sucesivas pruebas, que se apoyan en la experiencia obtenida de casos anteriores.

Para comenzar se consideró nulo el valor de g (factor proporcional a la profundidad alcanzada en el árbol de búsqueda) y se asignaron diversos valores a α (asignación de mayor prioridad a los menores anchos), llegándose a determinar que α = 0,20 era un valor conveniente, mostrándose los resultados obtenidos en la Tabla 5. Aquí cabe aclarar que la agilidad del propio método y la de su implementación favorecen la realización de sucesivas pruebas.

Tabla 5 : Planilla del plan de cortes de bobinas con α = 0,20 y β = 0,00

No.	Bobina 1		Bobina 2		Bobina 2		Bobina 4		Bobina 5	
	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso
1	250	628	300	758	350	904	350	886	180	438
2	250	628	300	758	350	904	150	381	200	486
3	250	628	300	758	150	387	180	456	200	486
4	150	378	100	252	150	387	180	456	200	486
5	100	252	0	0	0	0	100	253	100	244
6	0	0	0	0	0	0	40	101	100	244
7	0	0	0	0	0	0	0	0	20	49
S	**10**	**24**	**10**	**25**	**10**	**27**	**10**	**26**	**10**	**23**
T	**1010**	**2538**	**1010**	**2551**	**1010**	**2609**	**1010**	**2559**	**1010**	**2456**

(S : anchos y pesos de bordes remanentes, T: anchos y pesos totales de las bobinas)

Como puede observarse, se obtuvo una selección óptima desde el punto de vista geométrico ya que las cinco bobinas fueron utilizadas en su totalidad, con el remanente previsto de 5 mm en cada borde para eliminar defectos del material. El valor de α utilizado le dio prioridad a los anchos intermedios y los anchos más chicos quedaron seleccionados al final.

Tabla 6 : Resumen de cortes de bobinas con α = 0,20 y β = 0,00

No.	Ancho	Peso solicitado	Peso cortado	Diferencia	Diferencia [%]
1	350	2200	2695	495	22.5
2	300	1800	2274	474	26.3
3	250	1800	1884	84	4.7
4	200	1400	1458	58	4.1
5	180	1100	1350	250	22.7
6	150	1200	1531	331	27.6
7	100	1100	1243	143	13.0
8	80	200	0	-200	-100.0
9	40	100	101	1	1.0
10	20	100	49	-51	-51.0
Peso en exceso		**10700**	**12536**	**1836**	**16.7**
Peso en defecto		**300**	**49**	**-251**	**-2.3**

Para evaluar la selección realizada desde el punto de vista de los pesos se preparó la Tabla 6. Aquí se observa que se cortó un 16,7 % del material en exceso y un 2,3 % en defecto. Este último corresponde en su totalidad a los anchos de 20 y 80 mm y su justificación es muy simple: las cinco bobinas habían sido cortadas completas y no había posibilidad de incorporar anchos adicionales.

El segundo caso estudiado corresponde a α = 0, lo que significa que se dará prioridad a los mayores anchos, y se variará el valor de β, que representa el exceso de peso en el último fleje que motiva su traslado a la última bobina. Se hicieron varias pruebas y se determinó que β = 0,70 es un valor apropiado, presentándose los resultados obtenidos en las Tablas 7 y 8. Al igual que en el caso anterior la selección es óptima desde el punto de vista geométrico, ya que las cinco bobinas son nuevamente utilizadas en su totalidad. La diferencia está en la ya anticipada prioridad de los mayores anchos, salvo que aquellos flejes donde se excede el peso requerido son reasignados a la última bobina. Puede observarse que de la Bobina 4 se corta el máximo de nueve flejes.

Tabla 7 : Planilla del plan de cortes de bobinas con $\alpha = 0{,}00$ y $\beta = 0{,}70$

No.	Bobina 1		Bobina 2		Bobina 2		Bobina 4		Bobina 5	
	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso	Ancho	Peso
1	350	880	300	758	250	646	180	456	350	851
2	350	880	250	631	200	516	150	381	300	730
3	300	754	250	631	200	516	150	381	180	438
4	0	0	200	506	180	465	100	253	150	365
5	0	0	0	0	150	387	100	253	20	49
6	0	0	0	0	20	52	100	253	0	0
7	0	0	0	0	0	0	100	253	0	0
8	0	0	0	0	0	0	80	202	0	0
9	0	0	0	0	0	0	40	101	0	0
S	**10**	**24**	**10**	**25**	**10**	**27**	**10**	**26**	**10**	**23**
T	**1010**	**2538**	**1010**	**2551**	**1010**	**2609**	**1010**	**2559**	**1010**	**2456**

Tabla 8 : Resumen de cortes de bobinas con $\alpha = 0{,}00$ y $\beta = 0{,}70$

No.	Ancho	Peso solicitado	Peso cortado	Diferencia	Diferencia [%]
1	350	2200	2611	411	18.7
2	300	1800	2242	442	24.6
3	250	1800	1908	108	6.0
4	200	1400	1539	139	9.9
5	180	1100	1359	259	23.5
6	150	1200	1512	312	26.0
7	100	1100	1012	-88	-8.0
8	80	200	203	3	1.5
9	40	100	101	1	1.0
10	20	100	101	1	1.0
Peso en exceso		**9900**	**11576**	**1676**	**15,2**
Peso en defecto		**1100**	**1012**	**-88**	**-0.8**

Como puede observarse en la Tabla 8, el peso total cortado en exceso se ha reducido levemente a 15,2 % y el material cortado en defecto se redujo a 0,8 %. Es decir que se mantiene un aprovechamiento completo del ancho de las bobinas cortando una cantidad algo menor de material en exceso. Aquí cabe aclarar que el corte en exceso no representa una pérdida, ya que la demanda de todos los flejes de diversos anchos es continua y en algún momento serán aprovechados, pero incrementa el stock y representa material temporariamente inmovilizado.

Al caso anterior, con los cortes de flejes excedidos concentrados en la última bobina, se le aplica el proceso de optimización con los resultados mostrados por las Tablas 9 y 10. Puede observarse que tres de los flejes más excedidos (anchos de 350, 300 y 180) son cortados hasta cierta profundidad ($\boldsymbol{e}_1$ = 89,3 mm) con una cierta distribución, dando lugar a la Bobina 5a, y luego se completa el corte del material usando el espesor de corona restante ($\boldsymbol{e}_2$ = 83,3 mm), dando lugar a la Bobina 5b.

Desde el punto de vista geométrico, las primeras cuatro bobinas fueron aprovechadas en su totalidad y la última dio lugar a dos piezas remanentes de espesores $\boldsymbol{e}_1$ y $\boldsymbol{e}_2$ respectivamente: un ancho de 140 mm de la Bobina 5a (177 Kg) y otro de 760 mm de la Bobina 5b (887 Kg.). Se trata de material que queda entero, disponible en el stock para su futuro aprovechamiento. Considerando los pesos, el corte en exceso se redujo a solo 5%, al tiempo que se cubrió completamente la cantidad de material requerido, mostrando el enorme beneficio de desdoblar la última bobina.

Tabla 9 : Planilla del plan de cortes optimizado de bobinas con $\alpha = 0,00$, $\beta = 0,70$

No	Bobina 1		Bobina 2		Bobina 3		Bobina 4		Bobina 5a		Bobina 5b	
	Anch	Peso	Anch	Peso	Anch	Peso	Anch	Peso	Anch	Peso	Anch	Peso
1	350	880	300	758	250	646	180	456	350	443	150	175
2	350	880	250	631	200	516	150	381	300	379	100	117
3	300	754	250	631	200	516	150	381	180	228	0	0
4	0	0	200	506	180	465	100	253	20	25	0	0
5	0	0	0	0	150	387	100	253	20	25	0	0
6	0	0	0	0	20	52	100	253	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	100	253	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	80	202	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	40	101	0	0	0	0
S	10	24	10	25	10	27	10	26	140	177	760	887
T	1010	2538	1010	2551	1010	2609	1010	2559	1010	1277	1010	1179

Tabla 10 : Resumen de cortes optimizado de bobinas con $\alpha = 0,00$, $\beta = 0,70$

No.	Ancho	Peso solicitado	Peso cortado	Diferencia	Diferencia [%]
1	350	2200	2203	3	0.1
2	300	1800	1891	91	5.1
3	250	1800	1908	108	6.0
4	200	1400	1539	139	9.9
5	180	1100	1149	49	4.5
6	150	1200	1322	122	10.2
7	100	1100	1129	29	2.6
8	80	200	203	3	1.5
9	40	100	101	1	1.0
10	20	100	102	2	2.0
Peso en exceso		**11000**	**11547**	**547**	**5.0**
Peso en defecto		**0**	**0**	**0**	**0.0**

Conclusiones y trabajo futuro

Para resolver un problema de optimización combinatoria se propuso la implementación de métodos exhaustivos de búsqueda en el espacio de estados, que si bien son un recurso clásico de la Inteligencia Artificial, su originalidad está en las particularidades de su aplicación en el medio industrial. En este caso el objetivo fue la definición de un plan de cortes de bobinas de chapa de acero que haga el mejor aprovechamiento geométrico del material disponible y reduzca hasta donde sea posible el peso de los cortes realizados en exceso. Se comprobó que los métodos y criterios adoptados son apropiados para resolver este tipo de problemas, revistiendo especial importancia las heurísticas destinadas a conducir la búsqueda de la solución en un inmenso espacio de estados. Es precisamente la definición de las funciones heurísticas la que además brindaron gran flexibilidad a las soluciones para adecuarlas según diferentes criterios. Al mismo tiempo, la necesidad de identificar los factores que resultan más convenientes en cada caso obligan por el momento a una inevitable tarea exploratoria. Se continuará trabajando con la finalidad de facilitar la selección de los mejores factores heurísticos con un mínimo esfuerzo, tarea que necesariamente se debe apoyar en la experiencia. Se confía en llegar a establecer un proceso automático de definición de tales factores que se realimente de la propia experiencia, siendo el objetivo desarrollar una forma de *sistema experto*.

Referencias

1. Faggioli, E. and Bentivoglio, C., Heuristic and exact methods for the cutting sequencing problem. European Journal of Operational Research, 110(3), 564-575 (1998).
2. Grandisar M. and Trkman, P., A combined approach to the solution to the general one-dimensional cutting stock problem. Computers & Operations Research, 32(7), 1793-1807 (2005).
3. Hifi, M. and Ouafi, R., Best-first search and dynamic programming methods for cutting problems: The cases of one or more stock plates. Computers & Industrial Engineering, 32(1), 187-205 (1997).
4. Muñoz Estéfano, R., Aplicación de técnicas heurísticas a una variante del problema de cortes de stock en industrias siderúrgicas, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (2010).
5. Gracia Calandín, P., Métodos y Algoritmos para resolver problemas de corte unidimensional en entornos realistas. Aplicación a una empresa del Sector Siderúrgico, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia (2010).
6. Karelahti, J., Solving the cutting stock problem in the steel industry, Msc. Thesis, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology (2002).
7. Armbruster, M., A solution procedure for a pattern sequencing problem as part of a one-dimensional cutting stock problem in the steel industry. European Journal of Operational Research, 141(2), 328-340 (2002).
8. Nilsson N., Inteligencia Artificial, una nueva síntesis, Ed.Mc Graw Hill, (2001).
9. Kvitka, A., Resolución de Problemas con Inteligencia Artificial, EBAI (1988).

Datos de Contacto:

Juan Giró[1,2]*, juanfgiro@gmail.com*
Natalia Mira[1]*, ncmira@gmail.com*
Alejandra Boggio[1]*, alejandra.boggio @gmail.com*

[1]*Dto. Informática, Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico, Av. Fuerza Aérea 6500, Ciudad de Córdoba.*

[2]*Dto. de Ingeniería en Sistemas de Información, FRC, UTN, Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad de Córdoba.*