

Desarrollo de un algoritmo para la generación y elección de soluciones de corte en la operación de canteo y despuntado en aserraderos

Development of an algorithm to generate and evaluate cutting solutions in edging and trimming operations at sawmills

*Francisco Vergara González^{*1}, Felipe Baesler Abufarde², Mario Ramos Maldonado¹*

¹ Departamento de Ing. en Maderas, Fac. de Ingeniería, Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile

² Departamento de Ingeniería Industrial, Fac. de Ingeniería, Univ. del Desarrollo, Concepción, Chile

(Recibido el 1 de febrero de 2010. Aceptado el 8 de febrero de 2011)

Resumen

En este trabajo se desarrolló un algoritmo que integra las mejores prácticas aplicadas en los aserraderos y una metodología de análisis geométrico de líneas de corte. La aplicación fue programada en lenguaje C++, siendo alimentada con las dimensiones de las piezas deseadas de producir, sus respectivos precios y la geometría en 2-D de la tapa a cortar, generando como resultado una solución de corte en ancho y largo para tapa ingresada. Las soluciones obtenidas se compararon con un patrón que corresponde a soluciones entregadas por un equipo de corte “optimizado”, de un aserradero del sur de Chile. Cuatro tipos de soluciones se obtuvieron al ingresar la geometría de las tapas, la cual fue capturada con 4 pasos de lectura diferentes. Los resultados muestran que las soluciones obtenidas con paso de lectura 100 mm son en promedio un 4% superior al patrón, y muy superiores a las otras soluciones obtenidas con los otros 3 pasos.

Haciendo abstracción de las condiciones particulares de operación de cada método. Una comparación teórica de tiempos por método de solución, indica que los 77 milisegundos empleados por SISCORMAD, son significativamente inferiores a los 320 milisegundos obtenidos con programación dinámica, 890 milisegundos con enumeración exhaustiva, y 140 milisegundos obtenidos con método heurístico geométrico como tiempos de solución reportados

* Autor de correspondencia: teléfono: + 1 + 604 + 822 09 21, fax: + 1 + 604 + 822 91 06, correo electrónico: fvergara@ubiobio.cl. (F. Vergara)

por programación dinámica [6]. Esta característica hace muy atractivo al algoritmo desarrollado para ser empleado en futuras aplicaciones. Sin embargo, dada la naturaleza heurística de SISCORMAD, constituye solo una solución de alta calidad, pero no óptima.

----- *Palabras clave:* Tapa, algoritmo, heurística, solución de corte

Abstract

In this research work an algorithm that gathers the best procedures applied in sawmills was developed, along with a methodology based on cutting geometrical line analysis. This application was programmed under the C++ language, sizes objective board and its prices, and the 2-D slab geometry are the input data, obtaining length and width solutions for every slab. Its outcomes have been compared with a pattern that matches the solutions provided by an “optimized” cutting machine in a southern sawmill in Chile. Four types of solutions were obtained when inputting slabs geometry, which was captured with four different reading steps. Outcomes show that solutions achieved with a reading width of 100 mm were 4% better in average than the pattern, and far better to other solutions achieved with the remaining 3 steps.

Leaving aside the particular operating conditions of either method; a theoretical comparison of time by solution method, indicates that the 77 milliseconds SISCORMAD employed are significantly lower than those obtained with dynamic programming 320 milliseconds, 890 milliseconds with total enumeration, and 140 milliseconds obtained with geometric heuristic as solution times reported by [6]. This feature makes the developed algorithm very attractive for future applications. However, given the heuristic nature SISCORMAD, it is just a high quality solution, but not optimal.

----- *Keywords:* Slab, algorithm, heuristic, cutting solution

Introducción

El problema de corte longitudinal y transversal, de piezas de bordes irregulares, llamadas tapas, provenientes del primer corte del tronco en aserraderos, llamado canteo y despuntado, consiste en encontrar una solución en tiempo real, formada por 2 líneas de corte longitudinal y transversal que maximizan el área o valor de la pieza cortada, sobre la superficie de la tapa (ver figura 1).

[1] muestra a través de un procedimiento para el entrenamiento de operadores de este tipo de máquinas cómo se resuelve el problema. La tapa se introduce longitudinalmente en una mesa, la cual tiene montado sobre sus bordes un marco que contiene un juego de lienzas; estas

están posicionadas y espaciadas en el sentido longitudinal y transversal del marco, con el propósito de representar las posibles líneas de corte de canteo y trozado sobre la tapa que se encuentra debajo de ellas.

El entrenamiento se inicia, indicándole al operador que primero debe encontrar la pieza más larga y angosta, para ello busca el par proyecciones longitudinales y transversales de lienza que estén contenidas en la tapa y produzcan la pieza más larga, esta es la primera tabla posible de cortar (solución de corte). A continuación, se debe observar si las líneas de corte son posibles de amplificar, para ello busca las líneas de corte que proyectan el ancho inmediatamente superior, manteniendo el mismo largo, si la pieza inscrita no excede excesivamen-

te los bordes de la tapa, es una nueva solución de corte. Sin embargo, si la solución excede los bordes, ahora debe reducir el largo, esto es buscando proyecciones o líneas transversales más cercanas, lo que significaría una solución de corte más corta. Es posible continuar la búsqueda analizando sucesivamente diferentes proyecciones, incluso girando la pieza cuando esta no es simétrica. El valor de cada solución se puede estimar con la ayuda de una tabla de valor, que corresponde al producto entre el ancho, el largo y el precio de la solución encontrada (tabla inscrita), de manera que el operador pueda determinar cuál es la solución más valiosa. El procedimiento de búsqueda manual de soluciones de corte y su valoración se puede ver en la figura 2.

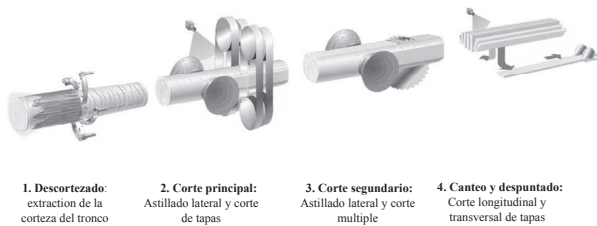


Figura 1 Descripción del proceso de aserrió

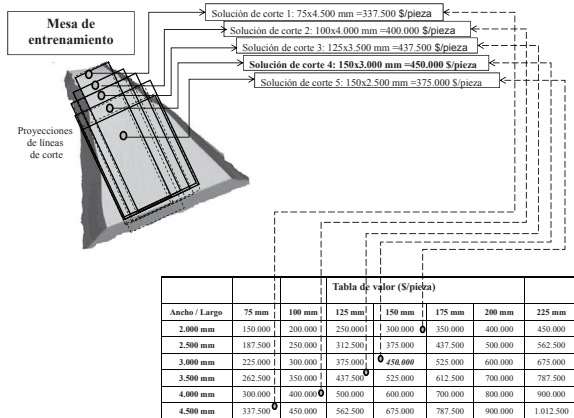


Figura 2 Procedimiento de búsqueda manual de soluciones de corte y su valoración

El proceso termina cuando se obtiene la pieza más ancha y larga posible, considerando que la solución puede tolerar una proporción del área con aristas o cantos faltantes, llamados cantos muertos.

En la solución del problema se han desarrollado diferentes enfoques entre ellos [2], quienes plantearon que la solución de corte óptima se obtiene a través de la generación iterativa de combinaciones de líneas de canteo y despuntado, y la selección de la combinación de líneas de corte que maximizan el valor obtenido. Igualmente [3] reportan que en la operación manual solo se alcanzan valores entre un 62 y 78% del valor óptimo. Por lo tanto, para alcanzar desempeños mayores, la búsqueda a través de miles de soluciones requiere la asistencia del computador tanto en la lectura de la geometría de la pieza como en la búsqueda de la solución. Los datos de la geometría de cada tapa deben ser provistos por un sistema de lectura y son empleados en una búsqueda exhaustiva de ramificación y acotamiento.

Para Pastorius [4] el uso de lectores láser en la lectura en 3 dimensiones de la geometría de la tapa y la incorporación de técnicas de optimización en la búsqueda de una solución de corte es una ventaja para analizar miles de soluciones considerando la forma real de la tapa. El algoritmo ubica las líneas de corte de las sierras desde el centro de la superficie hasta los bordes, donde el canto de la tapa es curvo, efecto provocado por el corte de la tabla en el borde del tronco.

Otro enfoque basado en un algoritmo exacto fue desarrollado por Song [5] usando la misma técnica de ramificación y acotamiento. Sin embargo expertos afirman que una parte esencial del problema radica en resolverlo varias veces, dado que para cada posible posición que adopte la tapa antes de ser cortada se pueden probar un sinnúmero de posiciones de desfase lateral y giro desde su eje, las cuales generan una nueva alternativa de corte, efecto que mejora o empeora las soluciones, determinando una explosión del universo de soluciones.

Torodoki et al. [6] exploraron tres métodos de decisiones de corte para el problema de corte transversal y longitudinal de tapas (canteo y despuntado). En los métodos de solución,

la tapa es dividida en niveles equidistantes, llamados niveles de discretización, que definen una potencial posición de línea de corte, tal que entre el primer y el último nivel, una pieza de mínimas dimensiones puede ser obtenida.

En Programación Dinámica (PD). El problema se dividió en etapas y estados, representadas por niveles de discretización. El problema se modela como una red, donde los nodos representan la posición de las líneas de corte. El largo de los arcos que conecta pares de nodos, representa los anchos de las piezas, y el costo del arco es el valor de la pieza obtenida.

El segundo método fue Enumeración Exhaustiva (EE), permitió encontrar una solución óptima (o cercana). El método se inicia con la generación recursiva de todas las soluciones factibles de combinaciones de tablas para los anchos dados, seguido por la permutación de cada una de las soluciones generadas, para cada permutación, se superpone una línea de referencia sobre la tapa a regulares intervalos, y se determina el rendimiento asociado a cada intervalo, finalmente se eligió la permutación que entrega el mayor rendimiento. Una combinación factible, fue aquella que su ancho total no fue mayor que los bordes de la tapa.

Finalmente un método heurístico geométrico (HG), simuló líneas de corte paralelas sobre la tapa.

Los resultados evidencian que el método PD, toma 3320 milisegundos en encontrar una solución, en cambio el método EE, tarda 890 milisegundos. Sin embargo ambos alcanzan iguales volúmenes de solución. En cambio, el método HG, es el más eficiente en términos de tiempo, ya que solo toma 140 milisegundos en encontrar una solución, sin embargo, sus soluciones en volumen son un 24% inferiores a las obtenidas con DP y EE.

Existen otros puntos de vista para el problema de corte en dos dimensiones en otras áreas de la manufactura, por ejemplo [7] indican que existen enfoques en base a: programación lineal, programación dinámica, enfoques basados en

heurísticas, como simulated annealing (SA), algoritmos genéticos (AG) y enfoques basados en sistemas expertos. Igualmente [8] indican que este tipo de problemas han sido abordados con métodos de búsqueda heurísticos, estos, visitando apenas una parte del dominio de soluciones posibles, son capaces de encontrar buenas soluciones, esto quiere decir que aunque no garantizan la determinación de una solución óptima, son eficientes en términos del tiempo empleado en encontrarlas. En la elección del método de búsqueda se debe ser muy cuidadoso considerando la naturaleza del problema, [9] mencionan que el método de ramificación y acotamiento, usado en una amplia gama de problemas combinatorios, es razonablemente eficiente en problemas de tamaño pequeño, atributo que lo excluye de ser aplicado en problemas reales de gran tamaño, por lo tanto sugiere el uso de algoritmos heurísticos, frecuentemente usados para la búsqueda de soluciones en tiempo real. Un ejemplo de ello lo exhiben [10] quienes particularmente para el problema de corte en dos dimensiones del vidrio, propone una solución en base a una simple heurística basada en el orden y secuencia de corte de las órdenes de producción, la cual entrega soluciones adecuadas y eficientes. Igualmente [11] presentan un algoritmo híbrido basado en simulated annealing para el problema de corte ortogonal. En una comparación con una extensa lista de problemas de prueba disponibles en la literatura demostró que en promedio, el algoritmo propuesto supera a distintos métodos de solución existentes. Otros artículos que presentan heurísticas exitosas pueden ser encontrados en [12-15]. Una exhaustiva revisión de la literatura asociada a los problemas de corte puede ser encontrada en [16]

En el problema de canteo y trozado, existen muy pocos procedimientos de generación de soluciones de corte en tiempo real que garanticen soluciones óptimas. Aproximaciones a través de algoritmos exactos se reportan pero con limitaciones evidentes en la magnitud del problema y al tiempo de búsqueda. En otras áreas de la manufactura el problema de corte ha

sido resuelto con procedimientos que combinan el conocimiento particular del problema con heurísticas que garantizan soluciones eficientes pero no óptimas, siendo esta la única alternativa válida para resolverlos en tiempo real.

La lectura de la geometría de la tapa a partir de sensores se realiza en tiempo real y ha sido ampliamente estudiada, desde el punto de vista de la captación de la imagen. Sin embargo, en relación a cuál es el espaciamiento (pasos) entre los sensores que entrega la mejor solución no hay información concluyente, por lo tanto en este trabajo se estudiarán 4 pasos de lectura de la geometría de la pieza para explorar su impacto en la calidad de la solución alcanzada.

Finalmente, el objetivo central de este trabajo fue desarrollar un enfoque para la generación de soluciones integrando: el procedimiento de búsqueda manual de soluciones de corte y un modelo matemático para el análisis de líneas de corte y su intersección con los bordes irregulares de la tapa, permitiendo encontrar la combinación de corte en el ancho y en el largo en el mínimo tiempo posible, que tienda a maximizar el valor o área de la pieza obtenida. El rendimiento de las soluciones se determinó al comparar los resultados entregados por el enfoque heurístico con una base de datos de soluciones de corte obtenidas desde una operación de corte similar de un aserradero del sur de Chile.

Metodología

La metodología de trabajo abordó 3 aspectos esenciales: desarrollar una propuesta para la generación de las soluciones de corte en base a un método heurístico, la adopción de un método manual de lectura de la geometría de tapas para capturar su forma en dos dimensiones, la determinación de la factibilidad de la solución a través de análisis geométrico. Finalmente, se estudió el efecto del espaciamiento de lectura de la tapa en la solución de corte. Esto se realizó comparando las soluciones encontradas con el algoritmo (4 espaciamientos de lectura) y un

patrón de soluciones de corte, en un experimento factorial.

Generación de soluciones

El enfoque empleado para la generación de soluciones de corte, fue el descrito por [1] a la cual se le llamó heurística teórica de corte (HTC); esta se estructura en función de rectas de corte sobre la superficie de la tapa antes de ser cortada.

Primero, el algoritmo toma las coordenadas de la primera tapa en análisis, estas están almacenadas en una secuencia de pares ordenados que describen dos contornos de la tapa, al contorno de mayor área se le llamo trascara, y el contorno de menor área se le llamo cara. En segundo lugar, se unen las coordenadas de todos los pares ordenados adyacentes, de la cara y la trascara, ajustando una línea recta entre ellos; formando las curvas de borde superior e inferior de la cara, y las curvas de borde superior e inferior de la trascara de la tapa.

A continuación, se inicia una secuencia de análisis de rectas longitudinales y transversales, que imita la HTC. La secuencia, es capaz de ir escalando la solución inicial en incrementos o decrementos conocidos en el ancho y en el largo, los cuales se calculan en base a las dimensiones de las piezas posibles de cortar. Cada una de las soluciones generadas, es evaluada en términos de factibilidad, es decir si los bordes de la pieza obtenida exceden o no la tolerancia máxima de canto muerto aceptada para esa dimensión de tabla cortada.

El proceso de generación de la forma de la tapa, se pueden ver en la figura 3A; que muestra un diagrama de las coordenadas de contorno de la cara y trascara de la tapa, y luego la unión de las coordenadas para formar las curvas de borde. Por otro lado, una descripción de los criterios empleados para posicionar las líneas de corte longitudinales y transversales (canteo y despuntado), y la generación de la primera y segunda solución de corte se describe en la figura 3B.

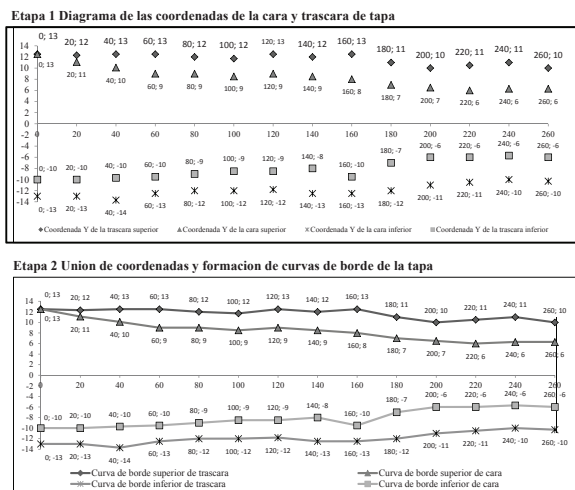


Figura 3A Diagrama de las coordenadas de la tapa, y formación de sus curvas de cara y trascara

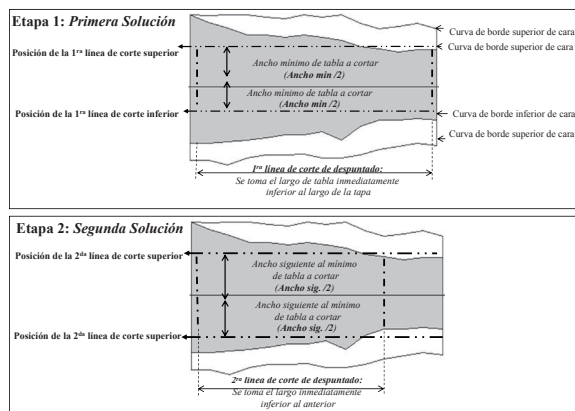


Figura 3B Criterios empleados para posicionar las líneas de corte sobre la tapa

Conceptualmente, el procedimiento que describe la secuencia de generación de soluciones corte se puede plantear a través del siguiente algoritmo:

- i Se une por una línea recta los puntos descritos por los pares ordenados o coordenadas adyacentes del contorno exterior e interior de la tapa, se calcula el largo de la tapa.
- ii Se genera una línea paralela y sobre el eje x, a una distancia igual a la mitad del ancho mínimo de tabla a cortar ingresado, a esta recta se le llamará línea de corte superior.
- iii Se genera una línea paralela y por debajo del eje x, a una distancia igual a la mitad del

ancho mínimo de tabla a cortar, a esta recta se le llamará línea de corte inferior.

- iv. El primer largo de corte para esta solución, se obtiene asumiendo que este debe ser menor o igual al largo calculado de la tapa (largos ingresados).
- v. Se calculan los puntos de intersección entre las curvas de borde, y las líneas de corte superior e inferior.
- vi. Conocidos los puntos de intersección, se determina el área de intersección en todos los cantos de la tapa, a esta se le llamo área de canto muerto, y queda asociada a esa solución.
- vii. Se compara el área total de canto muerto de la solución (pieza), con la tolerancia de canto muerto existente para esa dimensión de pieza en el archivo de dimensiones de tablas.
- viii. Si el área no excede el máximo valor de canto muerto para esa dimensión de tabla, *la solución es factible*, se calcula su valor y se graba como “solución actual” con el subíndice $j=1$. Si excede el valor máximo de canto muerto se pasa a xi.
- ix Se incrementa j , tal que $j=j+1$.
- x Es solución actual j mayor a todas las otras soluciones actuales $j-1$, solución actual j es la mejor y se debe tomar la siguiente tapa, empezando en i. Si no es así, puede haber una solución factible mejor, entonces se pasa xi.
- xi Se toma el ancho de corte siguiente; este número se resta al ancho anterior usado, y se divide por 2, la próxima recta de corte superior se posiciona paralela a la recta de corte superior anterior a una distancia igual al valor obtenido, y se vuelve a v.
- xii Se toma el ancho de corte siguiente; este número se resta al ancho anterior usado, y se divide por 2, la próxima recta de corte inferior se posiciona paralela a la recta de corte inferior anterior a una distancia igual al valor obtenido, y se vuelve a v.

xiii Se reduce el largo de la solución, es decir se toma el largo de pieza inmediatamente inferior al largo anterior empleado, y se inicia el proceso nuevamente desde ii.

Una vez que el proceso se termina para las coordenadas en su forma original. Se toma un ángulo horario de 0.1° , se giran en sentido horario todas las coordenadas de las tapas (se giran $0,1^\circ$), se genera una base de datos de coordenadas giradas y se repite el algoritmo. Tres ángulos horarios y anti horarios fueron empleados para explorar soluciones en tapas asimétricas.

Lectura de la geometría de la pieza

En los equipos automáticos de corte, la lectura de la geometría de las tapas se realiza con lectores ópticos “scanner” que digitalizan la forma de la tapa y calcula sus coordenadas. En la figura 4 se puede ver un equipo de medición típico, donde la tapa pasando transversalmente por cabezales de lectura espaciados cuidadosamente, es leída por los rayos emisores y captore, y se transforma en un sólido de 3 dimensiones. La calidad de esta lectura es determinada por la resolución de los lectores y su espaciamiento, la información de las lecturas es entregada al programa que busca las soluciones de corte en otra etapa del proceso. En este trabajo, se estudió el impacto de espaciamiento de lectura en la calidad de la solución. Dado que no se contaba con un equipo real, la geometría se obtuvo a través de la medición manual de las aristas de las piezas (4 bordes), espaciadas a 4 pasos de lectura (100/200/300/400 mm). Para ello, se empleó un instrumento de medición, el cual se puede ver en figura 4, que consiste en una pieza de madera con reglas plásticas, espaciadas cada 100 mm fijadas transversalmente a ella. El instrumento se posicionó sobre el eje de simetría de la tapa a medir, el observador debió mantener una mirada lo más ortogonal posible, para no distorsionar las mediciones. Por lo tanto, cada punto de borde de cara y trascara fue medido con respecto al eje de simetría de la tapa y al punto inicial, transformándose estas en las coordenadas de los puntos de los bordes superior e inferior de la cara y tras cara.

Análisis de factibilidad de la solución de corte

La factibilidad de cada solución de corte obtenida por la secuencia heurística, se realiza a través de un análisis geométrico de intersección de rectas de corte y las curvas de borde de la tapa. El cálculo se realiza por secciones, que coinciden con los pasos de lectura usados para leer la geometría de la tapa, llamadas pasos de lectura. De esta manera se presentan diversos casos de estudio dependiendo de la posición de la línea de corte con respecto a las curvas de borde de la tapa que se presente, gráficamente los casos de estudio se muestran en la figura 5.

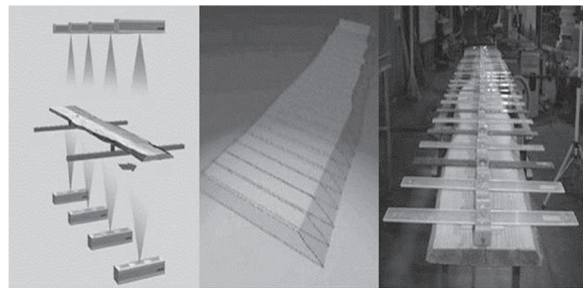


Figura 4 Medición electrónica y manual de la geometría de las piezas

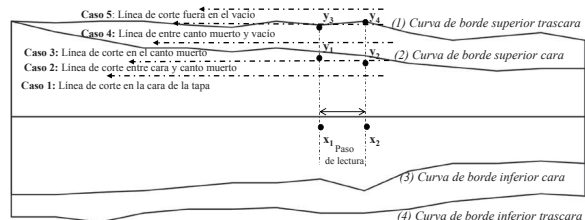


Figura 5 Casos de estudio para el análisis geométrico de intersección

A modo de ilustración, se trazaron líneas de corte en todas las posiciones posibles sobre la cara y el borde la tapa, solo en la parte superior de esta (a modo de ejemplo), de manera de ilustrar todos los casos posibles de intersección entre las curvas de borde de cara y trascara y la línea de corte. Es decir, se originaron 5 casos de estudio. En cada uno de ellos, el área de canto muerto,

queda determinada por las coordenadas de los puntos (X_1, Y_1) , (X_1, Y_3) , (X_2, Y_2) , (X_2, Y_4) , y las intersecciones con las curvas de borde (pequeñas rectas) (1) y (2) y la respectiva línea de corte considerada.

Resultados y discusión

El algoritmo de corte, llamado SISCORMAD (Sistema de Corte de Madera) se programó en

lenguaje C++, entregando 4 tipos de resultados de soluciones de corte, obtenidas al hacer correr el algoritmo con un paso de lectura determinado (100, 200, 300 y 400 mm). Estas soluciones de corte, obtenidas de 30 tapas de diferente geometría, se compararon con un patrón (base de datos de soluciones de corte en un aserradero con tecnología de corte automática y optimizada), los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados de soluciones de corte patrón y algoritmo con 4 pasos de lectura

Pieza	Solución Patrón		Solución Algoritmo							
	Paso 100		Paso 400		Paso 300		Paso 200		Paso 100	
	Area (mm ²)	Tiempo seg ⁻³	Area (mm ²)	Tiempo seg ⁻³	Area (mm ²)	Tiempo seg ⁻³	Area (mm ²)	Tiempo seg ⁻³	Area (mm ²)	Tiempo seg ⁻³
1	296.298	2.850	Sin Sol.	60	Sin Sol.	20	296.298	40	384.090	50
2	384.090	2.780	352.065	40	271.593	40	493.830	50	493.830	71
3	384.090	2.550	352.065	30	352.065	30	384.090	40	384.090	50
4	452.655	3.010	370.305	30	452.655	40	352.065	20	519.715	40
5	493.830	2.990	352.065	40	370.305	50	493.830	70	493.830	90
6	384.090	2.450	352.065	30	377.890	40	384.090	50	493.830	90
7	384.090	3.020	320.040	40	352.065	50	384.090	60	566.990	90
8	452.655	3.010	352.065	20	352.065	30	384.090	30	566.990	30
9	384.090	2.550	452.655	40	352.065	40	493.830	50	384.090	80
10	698.678	2.650	452.655	50	377.890	50	452.655	61	463.296	90
11	599.912	3.010	452.655	40	499.872	50	493.830	70	577.964	101
12	610.886	3.020	352.065	60	539.833	80	669.414	80	384.090	50
13	493.830	2.880	352.065	31	352.065	40	384.090	50	296.298	60
14	493.830	2.710	452.655	50	352.065	51	493.830	60	493.830	100
15	621.860	2.700	472.440	40	519.715	50	621.860	70	566.990	90
16	599.912	3.010	463.296	40	472.440	50	472.440	50	509.656	90
17	452.655	2.410	288.015	20	472.440	210	472.440	20	509.656	10
18	493.830	3.020	509.656	40	472.440	401	493.830	60	556.016	100
19	296.298	2.010	509.656	10	472.440	10	493.830	10	556.016	10
20	296.298	3.110	509.656	10	472.440	120	493.830	0	556.016	10
21	296.298	2.110	425.165	30	472.440	270	493.830	20	556.016	40
22	352.065	2.550	425.165	0	472.440	10	493.830	10	556.016	10
23	384.090	2.410	425.165	20	472.440	250	296.298	30	384.090	40
24	698.678	3.110	519.715	60	472.440	431	566.990	80	610.886	121
25	566.990	2.890	613.599	50	472.440	491	527.304	60	603.540	100
26	296.298	2.733	472.440	40	472.440	350	452.655	41	370.305	60
27	621.792	3.150	593.481	80	472.440	391	577.964	90	669.414	160
28	680.388	3.110	623.658	70	472.440	461	660.541	110	669.414	170
29	680.388	2.050	519.715	70	472.440	490	680.388	100	669.414	140
30	647.466	2.600	613.599	71	472.440	451	566.990	90	658.440	161
Total	14.498.330		12.949.841		12.608.743		14.525.052		15.504.818	
Media	483.278	2.748	446.546	40	434.784	168	484.168	52	516.827	77
Desv. Est	136.541	325	93.351	19	66.114	176	99.754	28	99.745	45

En forma complementaria se graficaron los resultados alcanzados en términos de área de solución (mm^2); de manera de apreciar algún grado de relación entre ellos, con respecto al patrón. De esta manera, en la figura 6 se puede ver como la solución del algoritmo con paso 100 mm supera a las soluciones obtenidas con los otros pasos de lectura, e incluso en muchos casos a la solución patrón.

En relación a los tiempos empleados para encontrar una solución de corte, se puede mencionar que el algoritmo SISCORMAD, encuentra una solución en un tiempo promedio de CPU de 174,6 milisegundos con paso 100 mm, 113,8 milisegundos con paso 200 mm, 177,6 milisegundos con paso 300 mm, y 72,1 milisegundos con paso 400mm (ver figura 7) . Tiempos auspiciosos en comparación con los 2730 milisegundos, que empleo el patrón para cortar una pieza. Sin embargo no hay que olvidar que este último tiempo incluye: lectura, posicionamiento, búsqueda de solución y corte de la tapa.

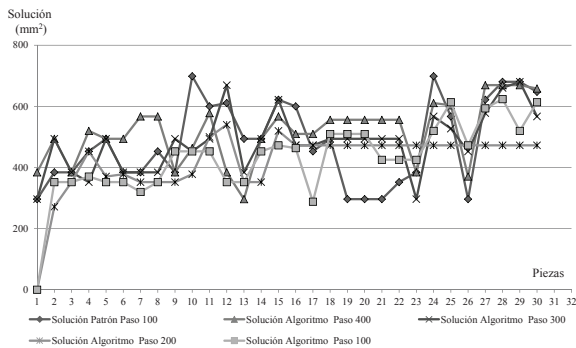


Figura 6 Comparación gráfica de soluciones de corte

Para establecer la bondad de las soluciones del algoritmo en relación al patrón, se realizó una comparación a través de un experimento de diseño factorial, de un factor a 4 niveles más un patrón, con 30 repeticiones. Se estudió la contribución de cada uno de los niveles en el modelo, y la interpretación del análisis de varianza fue la siguiente:

- i. Sol. patrón v/s sol. Algoritmo paso 300, evidencia “débil” para sostener que son distintos
- ii. Sol. algor. paso 100 v/s sol. algor. paso 300, evidencia “muy fuerte” para sostener que son distintos
- iii. Solución algoritmo paso 100 v/s solución algoritmo paso 400, evidencia “muy fuerte” para sostener que son distintos.
- iv. Sol. Algor. paso 200 v/s sol. algoritmo paso 300, evidencia “débil” para afirmar que son distintos.
- v. Sol. Algor. paso 200 v/s sol. algoritmo paso 400, evidencia “débil” para afirmar que son distintos

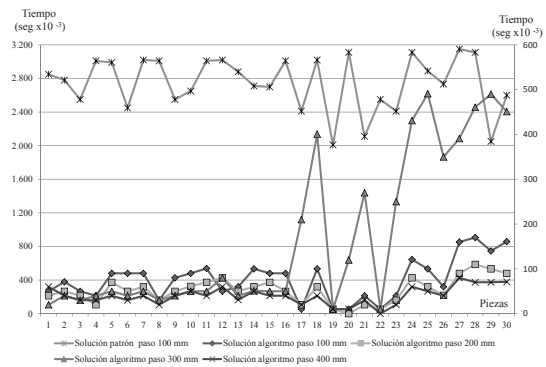


Figura 7 Comparación gráfica de tiempo empleados para encontrar soluciones de corte

El gráfico de análisis de un factor, presentado en la figura 8 reafirma lo planteado. Estableciendo que no siendo tremendamente superior, en términos de área de corte, con el algoritmo con paso 100 mm, obtiene soluciones que son en promedio 4 %, -5 %, -17% y -11%, superiores o inferiores con respecto a las soluciones encontradas por: el patrón con paso 100 mm, el algoritmo con paso 200 mm, el algoritmo con paso 300 mm, y el algoritmo con paso 400 mm respectivamente.

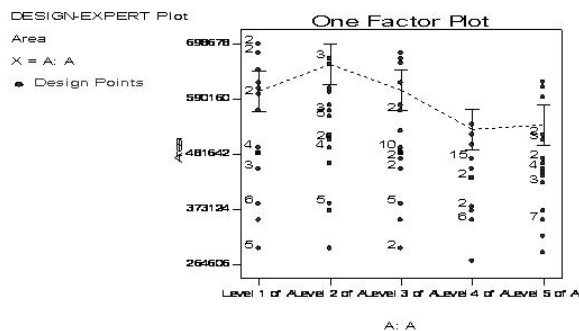


Figura 8 Gráfico de análisis de un factor

Conclusiones

Se puede afirmar que el algoritmo desarrollado en base a la HTC, permite generar y seleccionar soluciones de corte eficaces al compararlas con un patrón de corte. En particular al emplear el paso de lectura de 100 mm. Las soluciones son en promedio un 4% superior al patrón usado, el cual opera con una lógica desconocida, pero comercialmente vendida como de corte óptimo, lo que evidencia que aunque SISCORMAD aplico otro enfoque heurístico, sus soluciones también son eficientes.

En relación al paso de lectura de la geometría de las tapas, el paso 100 mm. Fue el paso más eficaz, desechándose los otros 3, dado que entregan soluciones inferiores en términos de área de corte. En relación a la eficiencia del proceso de búsqueda y selección de la solución, el tiempo de CPU alcanzado por SISCORMAD en encontrar una solución fue en promedio de 175 milisegundos, tiempo auspicioso considerando el rendimiento actual de la tecnología de corte en máquinas de corte automático citado en [17], el cual que alcanza un rendimiento teórico de 35 tapas por minuto (1714 milisegundos por tapa). Sin embargo, durante el experimento realizado, la maquina automática solo alcanzo un rendimiento promedio 2748 milisegundos por tapa. Esto significa que para una tapa de 4 m de largo, el equipo demora casi 3 segundos en procesarla completamente, esto considera tiempo necesario para: la operación de lectura, el algoritmo busque

la solución, posicionamiento y transporte de la tapa a la entrada de la máquina, posicionamiento de las sierras y corte de la tapa.

Tal como mencionan Todoroki et al. [6], los únicos autores que resuelven un problema similar usando métodos exactos y heurísticos, existe un significativo compromiso entre eficacia y eficiencia en los métodos seleccionados, y la calidad de las soluciones encontradas.

Haciendo abstracción de las condiciones particulares de operación de cada método. Una comparación teórica de tiempos por método de solución, indica que los 77 milisegundos empleados por SISCORMAD, son significativamente inferiores a los 320 milisegundos obtenidos con PD, 890 milisegundos con EE, y 140 milisegundos obtenidos con HG como tiempos de solución reportados por [6]. Esta característica hace muy atractivo al algoritmo desarrollado para ser empleado en futuras aplicaciones. Sin embargo, dada la naturaleza heurística de SISCORMAD, constituye solo una solución de alta calidad, pero no óptima. Es decir están a lo más un 24% por debajo de la solución óptima en términos de volumen o valor de la solución.

Es importante resaltar las condiciones particulares del problema, las cuales indican que la investigación futura debería enfocarse en el aumento de la eficacia de los métodos heurísticos, disminuyendo al máximo la brecha en la calidad de solución de estos, con respecto a los métodos exactos.

El uso de ajuste lineal para unir las coordenadas y formar las curvas de borde, simplificó el análisis geométrico, sin embargo en este trabajo no se probó el impacto de otro tipo de ajuste (polinomial) en la eficiencia y eficacia del algoritmo.

Agradecimientos

El presente proyecto contó con el apoyo del Proyecto de Investigación DIUBB N.º 0531123/R Universidad del Bío-Bío.

Referencias

1. S. Rony. *Edging and trimming operations and optimization*. Course notes of Sawmilling Techniques. Ed. Kymenlakson University of applied Sciences. Kotka. Finlandia. 2004. pp. 1-20.
2. C. Regalado, D. Kline, P. Araman. "Optimum edging and trimming of hardwood lumber". *Forest Products Journal*. Vol. 42. 1992. pp. 8-14.
3. D. Schmoldt, H. Song, P. Araman. "Real time Value Optimization of Edging and Trimming Operations for rough, Green Hardwood Lumber". *Proceedings of ScanTech 2001 International Conference*. Seattle (Washington). 2001. pp. 87-99.
4. W. Pastorius. "Optimization in lumber industry, Laser Scanning". *Documento Técnico*. Ed. LMI Technologies Inc. Ontario (Canadá). 2000. pp. 1-5.
5. H. Song. *An Accurate and Efficient Algorithm for edging trimming Optimization*. Master of Science Thesis. Biological System Engineering. University of Wisconsin Madison (Wisconsin). 2001. pp. 1-120.
6. C. L. Todoroki, E. M. Ronnqvist. "Secondary log breakdown optimization with dynamic programming". *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 48. 1997. pp. 471-478.
7. A. Elmaghraby, E. Abdelhafiz, M. Hassan. *An Intelligent Approach to Stock Cutting Optimization*. MsC. Thesis. Univ. of Louisville. Louisville (KY) 2001. pp. 1-4.
8. A. Provedel, A. Gómes, V. Parada. "Una Contribución al Problema de Corte de Piezas en la Industria Textil". *Revista Latinoamericana de Tecnología Textil*. Vol. 1. 1997. pp. 57-63.
9. G. De Puy, R. Moraga, G. Whitehouse. "Meta-RaPS: A Simple and Effective Approach For Solving The Traveling Salesman Problem". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 41. 2005. pp. 115-130
10. W. Benfold, M. Manfrin, A. Rodrigues, S. Spinella. "A Genetic Algorithm for 2D Glass Cutting Problem". *IRIDIA Technical Report Series*. Vol. 13. 2005. pp. 1-9.
11. E. Burke, G. Kendall, G. Whitwell. "A Simulated Annealing Enhancement of the Best-Fit Heuristic for the Orthogonal Stock-Cutting Problem". *Journal on Computing*. Vol. 21. 2009. pp. 505-516.
12. D. Zhang, Y. Kang, A. Deng. "A new heuristic recursive algorithm for the strip rectangular packing problem" *Computers and Operations Research*. Vol. 33. 2006. pp. 2209-2217.
13. D. Zhang, S. Han, W. Ye. "A bricklaying heuristic algorithm for the orthogonal rectangular packing problem" *Chinese Journal of Computers*. Vol. 23. 2008. pp. 509-515.
14. A. Bortfeldt. "A genetic algorithm for the two-dimensional strip packing problem with rectangular pieces". *European Journal of Operational Research*. Vol. 172. 2006. pp. 814-837.
15. S. Leung, Z. Defu. "A New Heuristic Approach for the Stock-Cutting Problems". *Proceedings of World Academy of Science, Engineering & Technology*. Vol. 41. 2009. pp. 688-693.
16. J. Oliveira, G. Wäscher. "Cutting and Packing" *European Journal of Operational Research*. Vol. 183. 2007. pp. 1106-1108.
17. Soderhamn Eriksson. *Programa versión 3.x Edgar Sistema de escaneo y optimización*. Manual Técnico. Soderhams (Suecia). 1997. pp. 1-155.