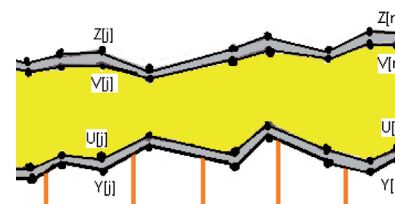


# Heurística para obtener la mejor región rectangular en piezas irregulares y su implementación en máquinas de corte de madera

## HEURISTIC TO FIND THE BEST RECTANGULAR REGION IN IRREGULAR PIECES AND ITS IMPLEMENTATION IN WOOD SAWS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7297> | Recibido: 15/09/2014 • Aceptado: 10/12/2014



■■■  
Carlos Gorria Corres, Mikel Lezaun Iturralde

UPV/EHU. Facultad de Ciencia y Tecnología. Dpto. de Matemática Aplicada y Estadística e Investigación Operativa.  
Calle Sarriena, s/n - 48940 Leioa. Tfno.: + 34 946015343

### ABSTRACT

- This paper presents a heuristic for finding parallel cutting lines on an irregular piece of lumber so as to eliminate the bark or wane and obtain the largest possible rectangle of usable wood. The algorithm is translated into "C" programming language & implemented on a microprocessor built into a power saw so that the machine is regulated automatically. The production line, comprising conveyor chains, positioning arms and saw blades, is completed with the incorporation of a number of scanners to detect and approach the edges of planks and the frontier between wane and useful wood by polygonal lines. The algorithm designed uses a small number of variables and arithmetical operations, so as to optimise microprocessor memory performance and minimise computation costs. Automating the saw improves the processing times for sawing planks and makes better use of useful wood.
- **Keywords:** wood cutting, saw machines, automatic regulation, heuristic.

### RESUMEN

En este artículo se presenta una heurística para determinar las líneas paralelas de corte de un tablón irregular de madera, con el fin de eliminar la capa de corteza o gema desechable y obtener el mayor rectángulo de madera útil. El algoritmo se ha traducido a lenguaje de programación "C" e implementado en un microprocesador integrado en una serradora, de forma que la regulación de la máquina sea automática. Para ello, la línea de producción, compuesta por cadenas de transporte, brazos posicionadores y mecanismo de serrado, se ha completado incorporando una serie de dispositivos escáner que detectan y aproximan los bordes del tablón y las fronteras entre la gema y madera útil, por líneas poligonales. El algoritmo diseñado utiliza un número reducido de variables y operaciones aritméticas, con el propósito de optimizar el rendimiento de la memoria del microprocesador y reducir al máximo el coste computacional.

La automatización de la máquina serradora proporciona una mejora en los tiempos del proceso de serrado de tabloneros y un mayor aprovechamiento de la madera útil.

**Palabras clave:** corte de madera, máquina serradora, regulación automática, heurística.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las serrerías, lo habitual es recibir tabloneros de madera de forma alargada, anchura variable y espesor constante. Los bordes laterales largos no suelen ser rectos y pueden contener una estrecha capa de corteza o gema no aprovechable que hay que eliminar. En la Figura 1 se muestra de forma esquemática la pieza inicial a cortar, en la que la corteza o gema está coloreada en gris y la madera aprovechable en amarillo. Las capas desechables se eliminan utilizando dos sierras que trabajan en paralelo. Tradicionalmente esta operación se hace utilizando potentes sierras de banda [1], compuestas por sierras horizontales [2] y cadenas de serrado, inventadas a comienzos del siglo XX [3]. En ellas, un operario se encarga de centrar la pieza irregular de madera en la mesa de corte, con la ayuda de unas guías luminosas que marcan dos bordes paralelos [4]. Entre esos límites solo debe haber madera aprovechable y obviamente deben situarse lo más distanciado posible para minimizar la merma o pérdida de madera útil. Como resultado se obtiene un tablón rectangular que debe superar una anchura mínima prefijada. Dada la forma alargada de los tabloneros, cuando se hable de rectángulos o de tabloneros rectangulares

se referirá a piezas en las que sólo los dos lados largos tienen que ser paralelos. Los dos bordes cortos no tienen corteza y sólo una vez serrados los largos se cortan estos extremos para que los tablones tengan la longitud demandada. Notemos que el espesor constante de los tablones hace que el problema geométrico se reduzca a uno bidimensional. En la Figura 1 se muestra un resultado que se obtendría de forma directa con el método manual tradicional. Más adelante se verá que esa orientación del tablón resultante puede que no sea la mejor solución.

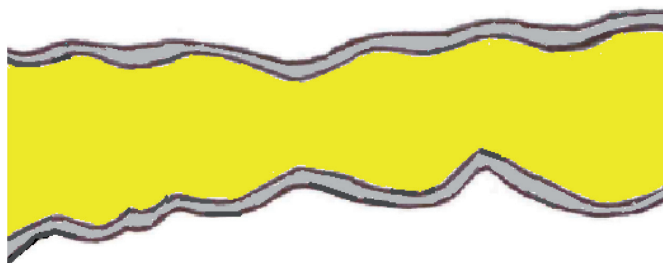


Fig. 1: Imagen esquemática del tablón inicial a cortar

En la revisión bibliográfica no se han encontrado referencias a este problema particular. Un problema similar, que ha sido extensamente tratado, es el del reparto eficiente de piezas rectangulares en recintos de medidas establecidas [5], muy recurrente en la literatura de los problemas de optimización de espacio y recursos en almacenamiento y transporte. Conforme a la clasificación de tipos de problemas de corte y almacenamiento descritos por Wäscher, Haubner y Schuman en su artículo [6], el aquí tratado puede considerarse como una variante del problema de la mochila en dos dimensiones (*The Two-Dimensional Knapsack Problem*). Este problema es una generalización de la optimización del contenido de una mochila, la cual debe incluir el mayor número de un conjunto dado de objetos, sin que se supere el peso máximo admisible. En este caso el contenedor o mochila no es un rectángulo, sino una figura con bordes poligonales que se le aproxima. Los objetos a encajar en el contenedor son los tablones de madera comercializados por la empresa. La solución consiste en obtener la pieza rectangular de mayor área, o equivalentemente de mayor anchura, inscrita entre los dos bordes poligonales.

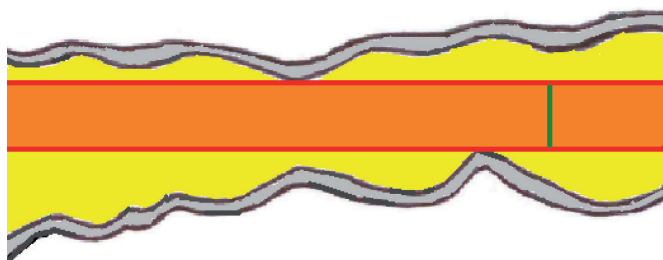


Fig. 2: La región de color marrón es un tablón rectangular útil resultante. Sus lados horizontales rojos son las líneas de corte de las dos sierras. El segmento verde indica la anchura del rectángulo

La optimización de la anchura del tablón es un problema no trivial. Para abordarlo, en primer lugar aproximaremos las

fronteras exteriores del tablón y las que separan la madera útil de la corteza, por líneas poligonales. Esta operación se realiza gracias a las medidas obtenidas por unos dispositivos escáner, los cuales detectan las coordenadas de puntos en los bordes exteriores del tablón y en las líneas divisorias entre la corteza y madera útil. Como se verá más adelante, la optimización se puede así formular como la maximización de una función no lineal que calcula la distancia entre dos rectas paralelas, y restricciones lineales en forma de desigualdad. Estas imponen que las rectas solución estén dentro de la zona de madera aprovechable delimitada por las líneas poligonales. Las limitaciones prácticas en términos de cálculo y memoria que presenta su implementación en un microprocesador integrado en la máquina serradora hacen que la resolución directa de este problema no lineal no sea lo más apropiado. Por ello, se ha optado por una heurística consistente en buscar la mayor amplitud entre dos rectas paralelas para las distintas configuraciones de la frontera poligonal de la parte útil de madera. Con la aproximación de las fronteras por segmentos rectos, en el peor de los casos apenas se pierden unos pocos milímetros de madera aprovechable con respecto a la solución geométrica óptima [7]. De acuerdo con las simulaciones realizadas, esta pérdida se reduce aproximadamente a un 0,5% de la anchura de la madera en una de cada tres piezas serradas, lo cual en la práctica es insignificante. Esto es debido a que la aproximación de la frontera de la zona a cortar proviene de un número finito de escáneres instalados longitudinalmente en la mesa de corte, lo cual hace que, eventualmente, no se detecten algunas muescas o estrechamientos de la madera entre dos puntos consecutivos de medición.

El objetivo de este proyecto es diseñar un algoritmo en un lenguaje estructurado de programación e implementarlo en un microprocesador integrado en una máquina serradora, de forma que su regulación sea automática y el resultado el mejor tablón rectangular de madera aprovechable en términos de anchura. Con el fin de optimizar el rendimiento del microprocesador, reducir el coste computacional y en consecuencia aumentar la velocidad de ejecución, el algoritmo utilizará un número reducido de variables y operaciones aritméticas.

## 2. MÉTODO DE RESOLUCIÓN

### 2.1. FORMULACIÓN ANALÍTICA DEL PROBLEMA

Para traducir el problema geométrico a uno analítico, se define en la mesa de la serradora un rectángulo graduado, dos de cuyos lados contiguos perpendiculares harán de ejes de coordenadas. El tablón de madera a serrar se incluirá dentro de ese rectángulo apoyado en unos toques que sirven para sujetarlo y orientarlo, tal y como se muestra en la Figura 3. En el esquema de la Figura 3 se observan cuatro líneas irregulares que dividen el tablón en sus distintas zonas. A continuación se describen estas fronteras comenzando por la parte inferior del dibujo.

- La primera línea la denotaremos  $y=Y(x)$ . Es un borde exterior de la pieza de madera, incluyendo la corteza.
- La siguiente, que separa la región gris de la amarilla, es la línea divisoria entre la gema y la madera aprovechable. La denotaremos  $y=U(x)$ .

- La tercera línea separa la región amarilla de la gris superior. Define la otra frontera entre la madera aprovechable y la gema y se denotará  $y=V(x)$ .
- La cuarta línea se denotará  $y=Z(x)$  y es el otro borde exterior de la pieza a serrar.

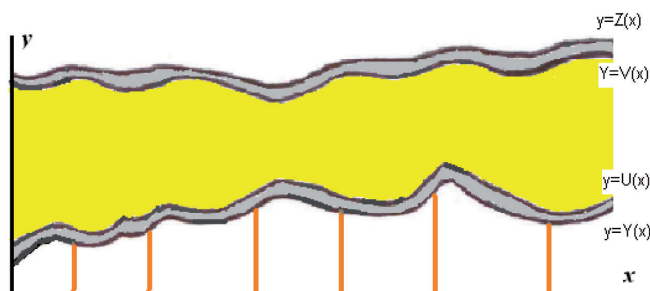


Fig. 3: Tablón a serrar en la mesa de corte. Las líneas verticales marrones representan los toques en los que se apoya la pieza. Sirven para sujetar y orientar el tablón en la mesa de corte

Una vez orientado y fijado el tablón en la mesa de corte, con el fin de aproximar las fronteras por líneas formadas por trozos de recta, se eligen sobre el eje de abscisas  $n$  posiciones  $x_1, \dots, x_n$ . Mediante sensores láser, para cada una de esas posiciones, se localizan los puntos en la dirección del eje  $y$  que están sobre las líneas descritas anteriormente. Se obtienen así cuatro conjuntos de  $n$  puntos

$$\{(x_1, Y(x_1)), (x_2, Y(x_2)), \dots, (x_n, Y(x_n))\},$$

$$\{(x_1, U(x_1)), (x_2, U(x_2)), \dots, (x_n, U(x_n))\},$$

$$\{(x_1, V(x_1)), (x_2, V(x_2)), \dots, (x_n, V(x_n))\},$$

$$\{(x_1, Z(x_1)), (x_2, Z(x_2)), \dots, (x_n, Z(x_n))\}.$$

Estos puntos los denotaremos

$$Y[i] = (x_i, Y(x_i)), \quad U[i] = (x_i, U(x_i)), \quad V[i] = (x_i, V(x_i)),$$

$$Z[i] = (x_i, Z(x_i)) \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n.$$

Uniendo los puntos consecutivos de cada colección  $Y[i]$ ,  $U[i]$ ,  $V[i]$ ,  $Z[i]$  con  $i=1, 2, \dots, n$ , se obtienen las líneas poligonales que aproximan respectivamente a las fronteras  $y=Y(x)$ ,  $y=U(x)$ ,  $y=V(x)$ ,  $y=Z(x)$  (ver la Figura 4). De aquí en adelante

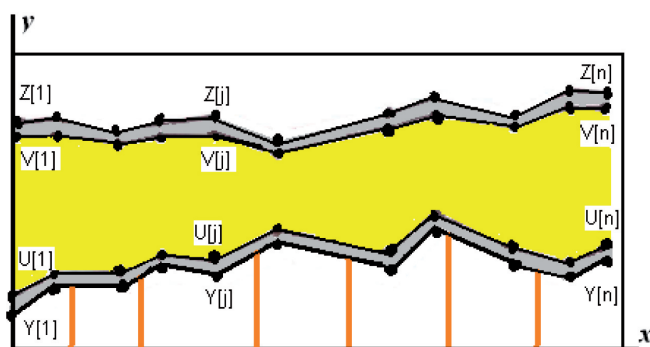


Fig. 4: Puntos en las cuatro líneas que delimitan la pieza a serrar, la gema y la madera aprovechable en la mesa de corte

se trabajará sobre estas aproximaciones de las fronteras reales de las distintas zonas del tablón.

El problema analítico consiste en hallar, a partir de los conjuntos de puntos  $U[i]$  y  $V[i]$  con  $i=1, 2, \dots, n$ , el rectángulo de mayor anchura inscrito en la región de madera aprovechable. Su formulación matemática directa es como sigue.

Hallar dos rectas paralelas  $y = ax + b$ ,  $y = ax + c$  con  $c < b$  (más exactamente hallar  $a$ ,  $b$  y  $c$  con  $c < b$ ) tales que

$$U(x_i) \leq ax_i + c \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

$$ax_i + b \leq V(x_i) \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

y sea máxima la distancia  $d$  entre las rectas, o equivalentemente su cuadrado  $d^2$  que es con lo que se trabajará, donde

$$d = \frac{b - c}{\sqrt{1 + a^2}}$$

La solución de este problema no lineal, se puede calcular mediante métodos numéricos de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales. Ahora bien, su implementación en lenguaje C en el microprocesador integrado en la cadena de producción plantea dificultades debido al elevado número de operaciones en aritmética de punto flotante que precisa.

Para hallar la solución óptima de forma eficaz en este contexto, se diseñará un algoritmo que, en un número reducido de operaciones aritméticas, obtenga un rectángulo incluido entre las líneas poligonales que aproximan el borde de la madera aprovechable y su anchura sea la máxima.

## 2.2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE RESOLUCIÓN

El algoritmo de resolución seguirá paso a paso las distintas posibles configuraciones geométricas del tablón dentro del rectángulo graduado de la mesa de la serradora.

**Paso 0.** Se fija la anchura mínima del tablón resultante.

**Paso 1.** La solución óptima deberá contener al menos un punto  $U[k]$  de la frontera inferior y un punto  $V[j]$  de la superior de la madera útil. Se buscan, si los hay, los puntos  $U[k]$  y  $V[j]$  con  $j, k=1, 2, \dots, n$ , tales que las dos rectas paralelas que pasan por cada uno de ellos y son perpendiculares al segmento que los une dejan todos los puntos  $U[i]$  y  $V[i]$ , con  $i=1, 2, \dots, n$ , ya sea sobre esas rectas o fuera de la franja comprendida entre ellas (ver Figura 5). En estas comprobaciones, en cuanto uno de los puntos no cumple esa condición, se descarta la pareja  $\{U[k], V[j]\}$ . Para cada par  $U[k]$  y  $V[j]$  válido, se retiene el rectángulo de lados tangentes a esos puntos y perpendiculares a la recta que los une y cuya anchura es la distancia entre ellos.

Si es el caso, en cuanto se encuentre un rectángulo admisible con esta configuración se finaliza el proceso. Si la anchura del rectángulo es menor que la mínima prefijada, se retira la pieza de la serradora. Si es mayor, se sierra el tablón. Esto es así debido a que esa anchura es la máxima posible. En efecto, cualquier otro rectángulo válido deberá dejar los dos puntos  $U[k]$  y  $V[j]$  seleccionados en su frontera o fuera de ella y tendrá una anchura menor o igual a la del rectángulo seleccionado. Si no hay ningún rectángulo admisible con esta configuración, se continúa con el paso 2.

Esta etapa requiere aparentemente  $O(n^3)$  comparaciones, cada pareja de puntos  $\{U[k], V[j]\}$ , con los restantes  $U[i]$  y

$V[i], i, j, k=1,2,\dots,n$ . En la práctica, sólo hay que considerar los  $n$  pares  $\{U[j], V[j]\}, j=1,2,\dots,n$ , ya que los dispositivos escáner miden estos puntos para idéntica coordenada  $x_j$ , por lo que cualquier otro par  $\{U[k], V[j]\}$  con  $j \neq k$  generaría dos rectas cuya pendiente no cumpliría la condición mencionada. Además, de haberlo, hay un único par  $U[i]$  y  $V[i]$  válido: el que tiene esos puntos más cerca uno del otro. El rectángulo tendrá sus lados horizontales.

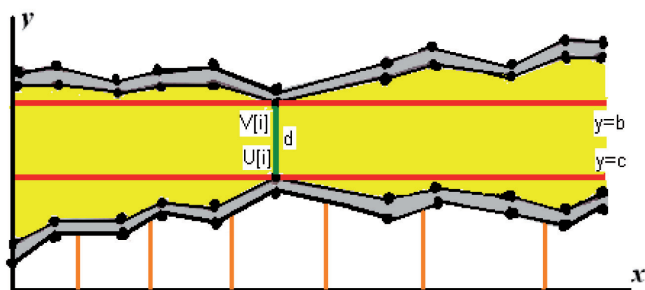


Fig.5: Esquema de la región madera aprovechable y del rectángulo de mayor anchura contenido en ella obtenido en el paso 1

#### Paso 2.

a) Para cada punto  $U[j]$  con  $i=1,2,\dots,n$  de la frontera inferior de la zona de madera útil, se busca, si lo hay, el punto  $U[k]$  con  $j < k$  tal que la recta por  $U[j]$  y  $U[k]$  deja a los puntos  $U[i]$  con  $i=1,2,\dots,n$ , sobre esa recta o por debajo de ella. Si es así, se selecciona la pareja  $U[j]$  y  $U[k]$ . En esta búsqueda, en cuanto un punto  $U[i]$  está por encima de la recta, se descarta la pareja considerada. Por otro lado, para cada  $U[j]$  dado, si  $U[k]$  con  $j < k$  es un punto tal que la recta por  $U[j]$  y  $U[k]$  deja todos los puntos  $U[i]$  con  $i=1,2,\dots,n$  en ella o por debajo, ningún punto intermedio  $U[m], j < m < k$  cumple la misma condición. Por ello, para un  $U[j]$  se irán analizando los  $U[k]$  con  $j < k$  desde el más lejano al más cercano a  $U[j]$ . En cuanto se encuentra una solución se para y se retiene el resultado. A continuación, para cada par  $U[j]$  y  $U[k]$  válido, se busca el punto  $V[h]$  con  $h=1,2,\dots,n$  del límite superior de la madera aprovechable, tal que la recta que pasa él y es paralela a la anterior deja los puntos  $V[i]$  con  $i=1,2,\dots,n$  sobre esa recta o por encima (Figura 6). Para ello se analizan los  $V[h]$  en orden de menor a mayor ordenada. En cuanto se tiene una solución se para y se retiene el rectángulo limitado por las rectas paralelas que pasan una por  $U[j]$  y  $U[k]$  y la otra por  $V[h]$ .

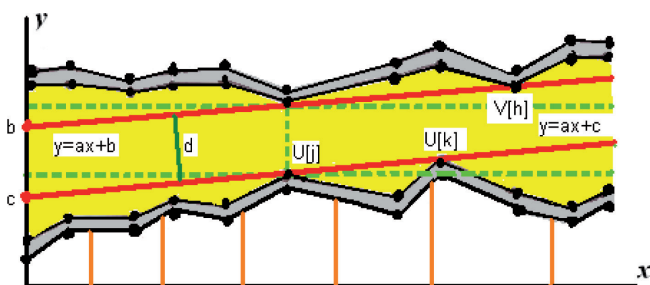


Fig. 6: Esquema de la región madera aprovechable y del rectángulo de mayor anchura contenido en ella obtenido en el paso 2

Entre los rectángulos así construidos se retiene el de mayor anchura y se continúa con el paso siguiente.

Este paso aparentemente necesita  $O(n^3)$  comprobaciones. Ahora bien, como se ha indicado, conforme se van aceptando o rechazando opciones no es necesario comprobar todos los emparejamientos. Esto hace que en la práctica este paso requiere  $O(n^2)$  comprobaciones.

b) De forma análoga, para cada punto  $V[j]$  con  $j=1,2,\dots,n$  de la frontera superior de la zona de madera útil, entre sus siguientes puntos  $V[k]$  con  $j < k$ , se busca el que la recta que lo une con  $V[j]$  deja todos los puntos  $V[i]$  con  $i=1,2,\dots,n$  en ella o por encima. Luego, para cada par de puntos  $V[j]$  y  $V[k]$  válidos, se considera el  $U[h]$  con  $h=1,2,\dots,n$  del límite inferior de la madera aprovechable tal que la recta que pasa por él y es paralela a la anterior deja en ella o por debajo todos los puntos  $U[i]$  con  $i=1,2,\dots,n$ . Estas dos rectas conforman un rectángulo.

La forma de proceder para obtener el rectángulo anterior y el número de operaciones son similares a las del paso 2a).

Entre los rectángulos obtenidos y el retenido en el paso 2a), se elige el más ancho. Si su anchura es menor que la mínima prefijada, se retirará la pieza de la serradora. Si es mayor, se sierra el tablón.

Una vez terminados los cálculos, la máquina se ajusta automáticamente para realizar el serrado que, como se ha indicado, se hace con dos sierras paralelas. La separación entre las sierras es la distancia  $d$  entre las dos rectas solución. El camino de las sierras sobre el tablón viene dado por los lados de ese rectángulo. Debido al mecanismo para orientar los tabloncillos instalado en la mesa serradora, este camino se define dando las distancias  $s_i$  entre los puntos  $Y[i]$  de la frontera exterior del tablón, con sus correspondientes puntos  $(x_i, ax_i + c)$  situados sobre la recta solución  $y = ax_i + c$  próxima a esa frontera. De forma más precisa, el algoritmo da como resultado los valores  $d$  y  $s_i = ax_i + c - Y(x_i)$  con  $i=1,2,\dots,n$ .

En la Figura 7 se expone un diagrama de flujo donde se representan las sucesivas etapas del algoritmo diseñado.

## 3. RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS

### 3.1. RESULTADOS

En este artículo se muestra el desarrollo de un algoritmo eficiente en términos de costo y memoria utilizada, el cual calcula de forma sistemática en un número reducido de pasos, la separación que habrá entre dos lados paralelos del mayor rectángulo comprendido entre dos líneas quebradas, determinadas cada una de ellas por  $n$  puntos de los que se conocen sus coordenadas  $(x_i, Y(x_i)), (x_i, U(x_i)), (x_i, V(x_i)), (x_i, Z(x_i))$ , con  $i=1,2,\dots,n$ , obtenidas con  $n$  dispositivos escáner de medida. Los valores de salida que regulan la máquina son  $d$  y  $s_i$ , con  $i=1,2,\dots,n$ . Además, durante el cálculo se definen unas variables accesorias, lo que hace un total de  $28 + 5n$ . En las simulaciones y pruebas realizadas, el número de operaciones no ha superado  $6n^2 - 10n + 5$  multiplicaciones/divisiones más una raíz cuadrada para calcular la anchura máxima.

El resultado en la práctica ha sido la implementación del algoritmo en un microprocesador integrado en una máquina serradora de madera, conectado a dispositivos de medición y



posicionamiento de las sierras, con el fin de automatizar el proceso de corte de tablonos para obtener las piezas rectangulares de máxima anchura.

En las pruebas realizadas sobre una máquina estándar, con sólo tomar  $n=8$  los resultados han sido completamente satisfactorios. El tiempo de ejecución es 0.016 segundos. En cualquier caso, la aplicación de este algoritmo con  $n=20$  es totalmente asumible por un microprocesador, con tiempos de procesado acordes con la velocidad de trabajo de la máquina serradora.

En las simulaciones realizadas en ordenador en piezas cuyos flancos están determinados por vértices elegidos de manera aleatoria y aproximadamente alineados, la tasa de soluciones donde la anchura se ha determinado en el paso 1 del algoritmo es, como cabría esperar, aproximadamente el 12,5%. Sin embargo, en los ensayos reales en máquina, la tasa

es superior y llega al 28%. Esto es debido a que la mayoría de las piezas irregulares a trabajar tiene una geometría bastante simétrica con respecto a un hipotético eje que lo divide longitudinalmente en dos partes iguales.

### 3.2. POSIBLES MEJORAS

En el caso en que el deterioro de uno de los extremos del tablón haga que el rectángulo resultante no supere la anchura mínima prefijada, en principio se tienen dos opciones. Retirar la pieza y aprovecharla más adelante para obtener tablonos más estrechos o explorar la posibilidad de obtener un tablón más corto, pero que rebase la anchura mínima prefijada. La adaptación del algoritmo definido para contemplar esta segunda opción sería como sigue.

Para empezar, también habría que prefijar la longitud mí-

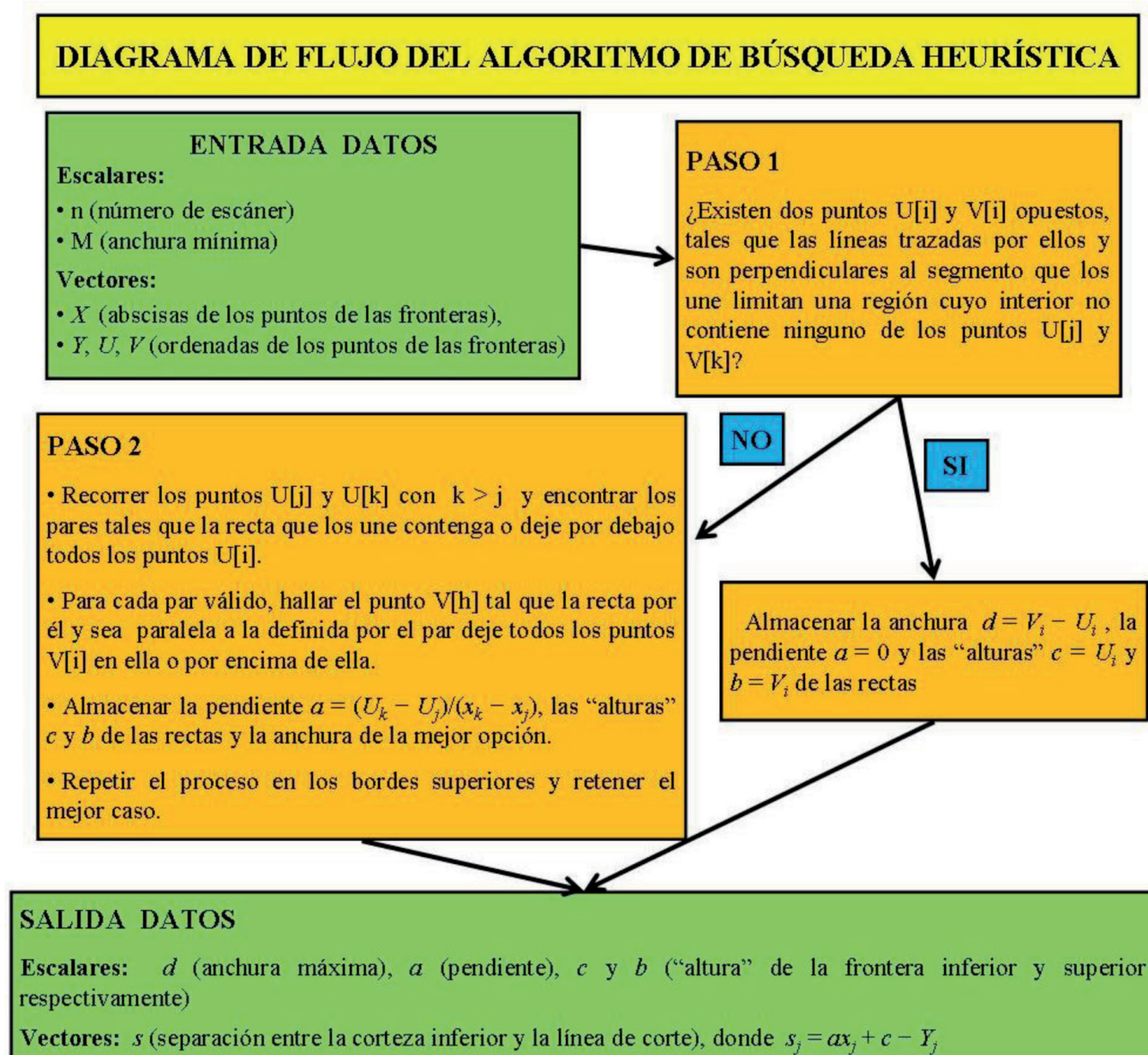


Fig. 7: Diagrama de flujo del proceso de cálculo y toma de decisiones que se sigue en el algoritmo de búsqueda heurística.

En este diagrama  $Y_i = Y(x_i)$ ,  $U_i = U(x_i)$ ,  $V_i = V(x_i)$ .

nima del tablón. Una vez fijadas en el eje de abscisas las  $n$  posiciones  $x_p$ , se comienza aplicando el algoritmo al total, es decir a la región delimitada por los puntos  $U[x_p]$  y  $V[x_p]$  obtenidos en todas las abscisas  $\{x_p, \dots, x_n\}$ . Si el mayor rectángulo obtenido supera la anchura mínima, se detiene el algoritmo y retiene este resultado. Si no es así, se aplica el algoritmo a las dos posibles piezas donde sus fronteras laterales están limitadas por las  $n-1$  abscisas consecutivas  $\{x_p, \dots, x_{n-1}\}$  y  $\{x_2, \dots, x_n\}$ . Si es el caso, entre los rectángulos admisibles que proporcionan esas dos opciones, se selecciona el de mayor tamaño y se detiene el proceso. En el caso en que con  $n-1$  abscisas no se obtenga ningún rectángulo admisible, se repite el proceso con las tres posibles regiones parametrizadas por  $n-2$  posiciones consecutivas. Se repite este proceso sucesivamente hasta obtener un rectángulo de anchura y longitud superiores a las prefijadas o, si no lo hay, retirar el tablón. Las abscisas consecutivas que conforman el rectángulo final indican por donde hay que acortar la pieza. Esta modificación del algoritmo es especialmente útil para aprovechar piezas curvadas o trapecoidales que proceden de árboles con estas formas.

#### 4. CONCLUSIONES

El algoritmo diseñado ha sido probado con éxito en la cadena de producción instalada en la serrería *Maderas Alonso de Trespaderne* (Burgos, España). El mayor rendimiento y beneficio económico se debe a la mejora de la velocidad de producción, que ha pasado de 4 a 10 piezas/minuto. Además, en los ensayos se ha comprobado que la velocidad podría aumentarse hasta 15 piezas/minuto. Otro beneficio deriva de la estabilidad del ritmo de producción, que pasa a ser independiente del momento en el que se trabaja, en contraposición con el ritmo que mantiene un operario orientando las piezas, que es sensible a su estado físico y decrece cuando aumenta el cansancio. Ahora bien, aún cuando la solución matemática es óptima en la zona comprendida entre las aproximaciones poligonales, la medición de los bordes de las piezas de madera mediante los dispositivos escáner es sensible a pequeños errores producidos por astillas o muescas en la madera, y ello a pesar de los filtros que se han implementado en la programación para evitar estos “engaños”. Este hecho puede traer consigo que en la pieza resultante aparezcan pequeñas imperfecciones geométricas, lo cual supone una desventaja con respecto a la manipulación por parte de un operario, el cual puede observar estas anomalías y corregirlas en el momento. En cualquier caso, los ensayos prácticos muestran que la ganancia obtenida en las piezas sin irregularidades compensa claramente las pérdidas por pequeños defectos. En consecuencia, se puede afirmar que en la práctica se mantiene la eficiencia de aprovechamiento de material con respecto al método manual, mientras que la velocidad de producción se triplica y el coste se abarata al poder prescindir de un operario.

#### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por la empresa *Montajes Luan Arzubia S.L.* Los autores agradecen a Pablo Roig de Montajes Luan Arzubia S.L. por su implicación

en el proyecto y a Arturo Alonso de *Maderas Alonso S.L.* por su disposición a la implementación y puesta a punto en su empresa del software diseñado.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto del Ministerio de Economía y Competitividad de España, Ref. MTM2013-40824-P.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wang V. "Horizontal Band-Saw". US Patent App. 12/186,597, 2010.
- [2] Stuart CC. "Horizontal band-saw". US Patent 748,025, 1903.
- [3] Brady M E. "Sawmill carriage". US Patent 1,813,291, 1922.
- [4] Boice WB. "Woodworking machine". US Patent 2,344,502, 1944.
- [5] Cui Y, Zhao X, Yang Y, Yu P. "Uniform Block Patterns for Constrained Guillotine Cutting of Rectangular Items". *Information and Management Sciences*, vol. 20, p. 89-101, 2009.
- [6] Wäscher G, Hauner H, and Schumann H. "An improved typology of cutting and packing problems". *European Journal of Operational Research*, vol. 183, p. 1109-1130, 2007. doi:10.1016/j.ejor.2005.12.047
- [7] Gorria C, Lezaun M, Mínguez JP. "Algoritmo de búsqueda de regiones rectangulares óptimas en piezas irregulares e implementación en máquinas de corte de madera". Inscrito en el Registro de la propiedad intelectual, 2014.