

EL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN Y SECUENCIAMIENTO DE TAREAS EN EL PROCESO DE SECADO EN UN ASERRADERO

THE PROBLEM OF TASK SCHEDULING AND SEQUENCING IN THE SAWMILL DRYING PROCESS

JOSÉ LUIS ALFREDO MUÑOZ PINCHEIRA^{1*}

Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

* Quitratúe 568 Villa Acero, Comuna de Hualpén, Chile. Tel. 0-98812154, e-mail: joseluismunoz@gmail.com.

RESUMEN

El presente artículo trata sobre el estudio del problema de programación y secuenciamiento de productos en las cámaras de secado de un aserradero. Actualmente la programación de productos en el área de secado de los aserraderos se realiza en forma manual y es tarea de los operadores y planificadores de planta tomar la decisión de asignar un producto a una cámara de secado. Se desarrolla e implementa un método de solución que automatiza el proceso descrito y permite confeccionar programaciones factibles minimizando el tiempo total de secado y respetando las restricciones del proceso. Se programa un algoritmo heurístico constructivo basado en técnicas de reglas de despacho el cual es comparado con programaciones de un aserradero que posee veintidós cámaras de secado en paralelo y más de treinta y cinco productos diferentes. El algoritmo logra una mejora del 6,9% en el Makespan y un aumento de un 7,3% en la productividad, lo que implicaría secar 2.044 m³ adicionales de madera en el mes bajo las mismas condiciones, sólo por el hecho de programar y secuenciar de una mejor forma. El problema es clasificado como scheduling de máquinas paralelas no relacionadas sin interrupción con un criterio de optimalidad de la minimización del Makespan. $R_m // C_{max}$

Palabras claves: Algoritmo heurístico constructivo, aserradero, máquinas paralelas no relacionadas, programación, secadores, secuenciamiento.

ABSTRACT

The following paper deals with the study about the problem of product scheduling and sequencing sawmill dryers. Currently, product scheduling is performed manually. The plant operators are the ones who have the responsibility of making the decision to assign a product to a dryer at a certain time. A solution is developed and implemented which automates the described process and makes feasible the scheduling while respecting process restrictions. A heuristic constructive algorithm based on dispatching rule techniques is programmed and compared with real programming. The sawmill has twenty-two dryers and more than thirty five different products. The heuristic constructive algorithm obtains an improvement of 6.9% in Makespan and an increase of 7.3% in productivity, which would imply drying an additional 2,044 m³ of wood in a month under the same conditions, only due to a better programming and sequence. The problem is classified as $R_m // C_{max}$

Keywords: Construction heuristic algorithms, dispatching rules, dryers, saw-mill, scheduling, unrelated parallel machines.

Recepción: 14/12/06. Revisión: 20/03/07. Aprobación: 18/06/07.

¹ Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Industrial.

INTRODUCCIÓN

En los años 50 aparece la teoría de Scheduling como una rama independiente de la investigación de operaciones (French, 1982). El scheduling ha contribuido en gran medida al sector industrial en diversas áreas tales como manufactura, forestal, transporte, minería, agricultura, etc., logrando disponer de mejor forma los recursos existentes y optimizar los procesos productivos (Pinedo, 1999).

En el rubro forestal los estudios de optimización han sido dirigidos mayoritariamente con buenos resultados al mejoramiento de modelos de corte en la etapa de aserrío (Pradenas *et al.*, 2006) y a la simulación global del proceso productivo de un aserradero (Randhawa *et al.*, 1994). Por otro lado, en el área de secado de un aserradero, los estudios han sido orientados exclusivamente al mejoramiento de las técnicas de secado (Cloutier *et al.*, 1992) y no se ha abordado el problema de programación del conjunto productos-secadores.

Actualmente la programación y secuenciamiento de productos en las cámaras de secado en los aserraderos se realiza diariamente en forma manual, considerando los productos que están en espera, la disponibilidad de secadores y las restricciones de orden superior tales como el no ingreso de ciertos productos en determinadas cámaras y el cumplimiento de fechas de entrega de algunos productos. La programación se realiza analizando sólo algunas combinaciones de las múltiples posibles, asignando los productos de mayor prioridad en los primeros secadores disponibles. Este procedimiento no garantiza el cumplimiento de la demanda y no utiliza de forma óptima los recursos existentes.

El objetivo general es desarrollar un mé-

todo de solución que considere las restricciones del proceso y que permita encontrar el menor tiempo de secado para el conjunto de productos a programar, logrando de esta forma aprovechar de manera más eficiente la capacidad de secado del aserradero.

Según la configuración productiva y el tipo de problema enunciado, se clasifica como un problema de Scheduling de máquinas paralelas no relacionadas, en el cual se requiere minimizar el tiempo total de secado o Makespan (Muñoz, 2006). Considerando la notación dada por R.L. Graham (Graham *et al.*, 1979), el problema es formulado como: $R_m // C_{max}$

M. Pinedo señala que un problema $R_m // C_{max}$ es NP_Hard (Pinedo, 2001). Esto implica que no existe un algoritmo de tiempo polinomial para encontrar una solución óptima en función de la instancia del problema. Por otro lado, la utilización de métodos exactos sólo es factible para problemas de pequeños tamaños. A modo de ejemplo, una solución exacta para un problema de Scheduling tipo Job-Shop, con diez trabajos y diez máquinas, estuvo abierto por más de 25 años (Fisher y Thompson, 1963).

Debido a que el aserradero en estudio posee una instancia de veintidós secadores y más de treinta y cinco productos y considerando que se debe entregar una programación con periodicidad diaria en pocos minutos, se ha desarrollado un algoritmo heurístico constructivo el cual genera soluciones factibles y entrega soluciones en un tiempo parametrizable, permitiendo al usuario, en este caso los programadores y planificadores de secado de un aserradero, obtener soluciones en tiempo real y disponer de un sistema que optimice el proceso, el cual minimiza el tiempo de secado total del conjunto de productos a programar respetando las restricciones del proceso.

MODELAMIENTO

El problema es enunciado de la siguiente forma:

Dado un conjunto de productos $J=[1,\dots,n]$ y un conjunto de secadores $M=[1,\dots,m]$ en paralelo, se debe programar y secuenciar cada producto $j \in J$ en el conjunto de secadores M , respetando las restricciones del problema.

Se desea minimizar la siguiente función objetivo:

- a) Makespan, C_{\max} , que corresponde al tiempo de término del último producto $j \in J$ en ser procesado en un secador $i \in M$.

Las restricciones existentes son:

- 1) Un secador $i \in M$ puede procesar sólo un producto $j \in J$ a la vez.
- 2) En una hora de programación, la suma de los consumos de vapor en cada secador i en paralelo no debe exceder el recurso de vapor máximo, V_{\max} . Esto debe cumplirse para cada hora de programación en la totalidad de los secadores y en toda la programación.
- 3) Debido a condiciones tecnológicas del proceso de secado, algunos productos $j' \in J'$, siendo $J' \subset J$, no pueden ser programados en ciertos secadores $i \in M$.
- 4) Se debe cumplir con las fechas de entrega estipuladas para cada producto $j \in J$.

Se define la matriz de tiempos de procesamiento como:

$$P_{mn} = [p_{ij}] \quad (p_{ij} / i=1,\dots,m; j=1,\dots,n)$$

$$P_{mn} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

La cual indica el tiempo de procesamiento o secado del producto $j \in J$ en el secador $i \in M$.

Se define el vector vapor para cada producto i en cada secador j como:

$$V_{ij}(t) = v ; \{i=i, j=j, t=[1,\dots,p_{ij}], v \in [0, V_{\max}]\}$$

Siendo V_{\max} el valor máximo de toneladas de vapor por hora disponible.

Cada producto j es caracterizado por el tiempo de procesamiento p_{ij} y por la curva característica de consumo de vapor $V_{ij}(t)=v$. Estas dos variables dependen del secador i al cual es programado.

La Figura I muestra la distribución de consumo de vapor por hora y tiempo de secado total de un producto A en el secador i , y del mismo producto A en el secador j .

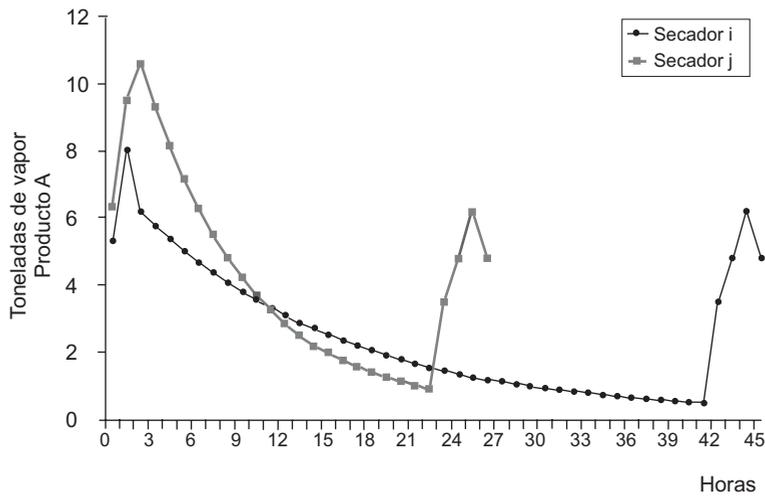


Figura I.

MÉTODO DE RESOLUCIÓN

Como método de resolución del problema, se programó una heurística constructiva basada en técnicas o reglas combinadas de despacho. Estas reglas de despacho buscan minimizar el tiempo total de secado (Panwalkar e Iskander, 1977) y de esta forma aumentar el porcentaje de utilización de los secadores.

La forma de operación del algoritmo heurístico constructivo es considerar que cada producto j es el último producto a programar y, por ende, lo asignará al secador que obtenga el menor tiempo en la programación.

Se definen las siguientes variables y funciones utilizadas en el algoritmo heurístico constructivo:

$Lotes = [Lotes(k)]$ ($Lotes(k)/ k=1, \dots, n^o$ de lotes ingresados): Cada elemento del vector lotes corresponde a un conjunto de productos que son del mismo tipo y que tienen la misma fecha de entrega.

$Secador = [secador(i)]$ ($secador(i)/ i=1, \dots, m$): Vector secador que indica el número de cámaras de secado.

$Asigna = Asigna[carga]$: Función que asigna un producto en una cámara de secado.

$Vapor = Vapor [carga, secador]$: Función que chequea el consumo de vapor en la totalidad de los secadores para una hora determinada. Este chequeo se repite a lo largo de todo el tiempo de la carga asignada ($t=t_i$ hasta t_{pij}).

$Contribución = Contribución[i,k]$: Función que almacena el valor del tiempo y número de secador del último producto en salir para cada asignación.

$Makespan = Makespan [programación, valor]$: Función que indica el valor del tiempo total de secado de una programación resultante.

Permuta = Permuta [Lotes]: Función que permuta el vector lotes.

Ordena = Ordena [Lotes]: Función que ordena el vector lotes según orden de prioridades.

Fecha_Entrega = Fecha_Entrega [Lotes(i)]: Función que guarda la fecha de entrega del elemento vector lote o Lote(i).

Criterio_Parada = Criterio que determina el término de la permutación del vector lotes para construir una nueva programación. Por ejemplo, la permutación finaliza cuando el Makespan no ha mejorado después de n programaciones o cuando ha finalizado el tiempo de cálculo programado por el operador.

La Figura II presenta el pseudo-código del algoritmo heurístico constructivo basado en técnicas de reglas de despacho. El algoritmo funciona de la siguiente manera: Dado un número de secadores “m” y un número de productos “ct” en espera de ser asignados, se construye inicialmente un vector con los productos existentes agrupándolos

en lotes individuales (Lotes[k]) según el tipo de producto y según la fecha de entrega de cada uno. Luego el vector lotes es ordenado (Función Ordena) según la prioridad de cada uno. Este vector ingresa en un ciclo while hasta que el tiempo determinado por el operador se cumpla o bien hasta que un criterio de parada lo detenga, por ejemplo si el Makespan resultante no mejora después de n iteraciones. Cada producto, ordenado según su prioridad, ingresa al ciclo “For Secador” donde es asignado a cada secador (Función Asigna) considerando la restricción de consumo de vapor máximo (Función Vapor). El producto es programado finalmente en aquel secador donde el Makespan parcial es el menor (Función Contribución). Luego de que la totalidad de los lotes son asignados, se verifica si las fechas de entrega de cada lote son cumplidas y se registra el Makespan global para esa programación. Finalmente se permuta el vector lotes (Función Permuta) e ingresa nuevamente en el ciclo. La nueva programación es reemplazada sí y sólo sí mejora el último Makespan y si no son afectadas negativamente las fechas de entrega de cada lote.

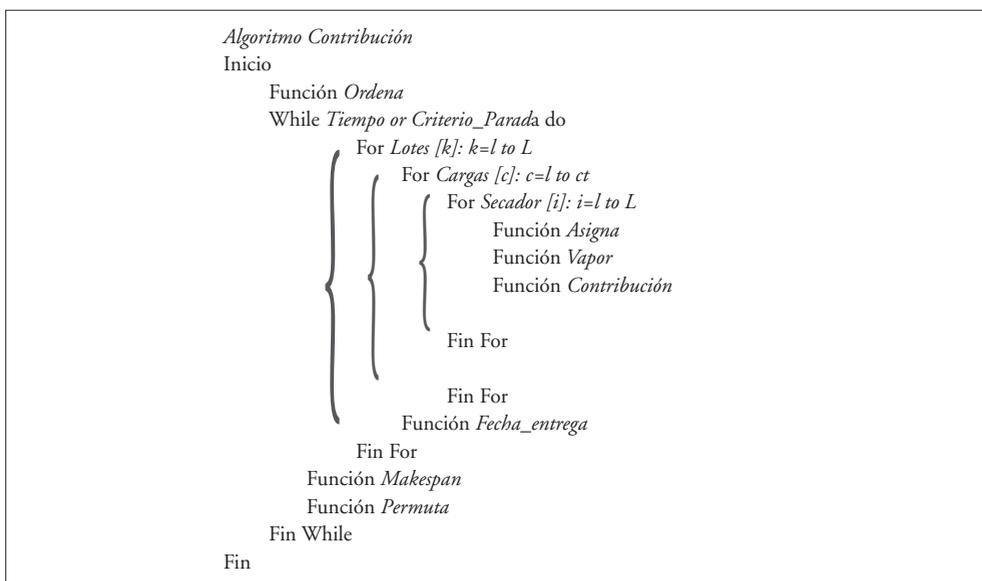


Figura II.

RESULTADOS

Debido a las características propias de un algoritmo heurístico constructivo, no se conoce la cercanía de sus resultados con respecto a la solución óptima existente. Por esta razón se comparan los resultados del algoritmo con las programaciones reales realizadas en el aserradero, conociendo de esta forma el rendimiento del algoritmo y el porcentaje real de mejora con respecto a las programaciones manuales.

Se comparan ocho programaciones reales realizadas por planificadores del área de secado con programaciones calculadas por el algoritmo heurístico constructivo considerando las mismas condiciones iniciales y de proceso.

La Tabla I muestra los Makespan obtenidos por el algoritmo heurístico constructivo y por la programación real para cada programación. Se observa que en cada comparación el algoritmo contribución logra una mejora del Makespan.

La Tabla II muestra las horas de ganancia del tiempo de secado total o Makespan obtenidas por el algoritmo con respecto a las programaciones reales. En promedio se obtiene una mejora del 6,9% de mejora del Makespan utilizando el algoritmo heurístico constructivo para la programación de productos en las cámaras de secado.

La Tabla III muestra las comparaciones de los diferentes índices productivos para cada programación.

Tabla I. Comparación del Makespan de las programaciones reales versus el Makespan obtenido por el algoritmo heurístico constructivo.

Progr.	Fecha inicio proyecto	Secadores desocupados	Nº Productos	Makespan prog. Real (hrs.)	Makespan Algoritmo (hrs.)
1	Lu 02-06-2003 10:00	20	8	75	65
2	Ma 03-06-2003 10:00	21	12	75	69
3	Mi 04-06-2003 10:00	18	10	69	64
4	Ju 05-06-2003 10:00	17	9	60	56
5	Vi 06-06-2003 10:00	19	18	79	75
6	Lu 09-06-2003 10:00	18	12	69	68
7	Ma 10-06-2003 10:00	18	17	89	84
8	Mi 11-06-2003 10:00	21	11	74	68

Tabla II. Ganancia del Makespan del algoritmo heurístico constructivo versus el real.

N° Progr.	Ganancia Makespan (hrs) (MKS REAL-MKS OPSS)	Porcentaje ganancia (%) $100 \cdot \{1 - \text{MKS ALG} / \text{MKS REAL}\}$
1	10	13.3
2	6	8.0
3	5	7.2
4	4	6.7
5	4	5.1
6	1	1.4
7	5	5.6
8	6	8.1
Promedio	5.1	6.9

Tabla III. Comparación de los índices productivos resultantes de las programaciones calculadas por el algoritmo heurístico constructivo versus las programaciones reales.

Progr.	Producción (m³)	Productividad (m³/hr)		Tiempo muerto (hrs.)		Factor de uso (%)	
		Real	Alg.	Real	Alg.	Real	Alg.
1	2791	37.2	42.9	49	42	0.57	0.65
2	3297	44	47.8	69	62	0.56	0.59
3	2864	41.5	44.8	65	49	0.56	0.56
4	2638	44	47.1	51	25	0.59	0.63
5	3772	47.7	50.3	125	88	0.62	0.63
6	3085	44.7	45.4	121	72	0.6	0.58
7	3619	40.7	43.1	83	103	0.63	0.65
8	3312	44.8	48.7	44	44	0.56	0.59
Promedio	3172.3	43.1	46.3	75.9	60.6	0.59	0.61

CONCLUSIONES

1. El rendimiento del algoritmo heurístico constructivo comparado con programaciones reales logra un 6,9% de disminución en el tiempo de secado total o Makespan.

2. Se comparan programaciones dadas por el algoritmo heurístico constructivo y pro-

gramaciones reales bajo iguales condiciones iniciales y de proceso. El algoritmo heurístico constructivo logra un aumento de la productividad de secado en un 7,3%, lo que implica secar 2.044 m³ adicionales de madera, lo cual equivale a secar 20 cargas adicionales al mes bajo las mismas condiciones actuales, sólo por el hecho de programar y secuenciar de mejor forma.

3. El algoritmo heurístico constructivo logra disminuir un 20% los tiempos muertos de la programación y logra aumentar un 3,4% el factor de uso de los secadores.
4. Según el presente estudio, se verifica que la capacidad de la planta está condicionada fuertemente por el consumo de vapor máximo existente, restringiendo la capacidad de los secadores instalados.
5. Se propone para futuras investigaciones de este problema la programación de otras alternativas de búsqueda de solución, tales como los algoritmos heurístico de mejoramiento y de esta forma comparar los rendimientos de los diferentes algoritmos.

REFERENCIAS

- CLOUTIER A., FORTÍN Y., DHATT G. (1992) "A word drying finite element model based on the water potencial concept". *Drying technology* 10(5): 1151-1181.
- FISHER H., THOMPSON G.L. (1963) "Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules". *Industrial Scheduling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 225-251.
- FRENCH S. (1982) "Sequencing and scheduling", John Wiley.
- GRAHAM R.L., LAWLER E.L., LENSTRA J.K. Y RINNOOY K. (1979) "Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling. A survey", *Annals of Discrete Mathematics*, vol. 5: pp. 287-326.
- MUÑOZ J.L. (2006) "El problema de programación y secuenciamiento de tareas en el proceso de secado en un aserradero". Tesis de Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- PANWALKAR S.S., ISKANDER W. (1977) "A Survey of scheduling rules", *Operations Research*, vol. 25: pp. 45-61.
- PINEDO M. (1999) "Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services". Irwin/McGraw Hill.
- PINEDO M. (2001) "Scheduling: Theory, Algorithms and Systems". Prentice may.
- PRADENAS L., GARCÉS J., PARADA V. (2006) "Optimización de los esquemas de corte de rollizos en aserraderos forestales". *Proceedings of the 13th CLAIO (Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa)*, Montevideo, Uruguay.
- RANDHAWA S.U., BRUNNER C., FUNCK J., ZHANG G. (1994) "A Discrete-event object-oriented modeling environment for sawmill simulation". *Simulation*, vol. 62, No 2, 119-130.