

Un Sistema de Programación del Transporte Forestal Principal Objetivando la Minimización de Costos

*Julio Eduardo Arce*¹ *Celso Carnieri*²
*Jefferson Bueno Mendes*³

¹Departamento de Silvicultura y Manejo
Universidad Federal del Paraná (UFPR)
Rua Bom Jesus, 650 – CEP 80.035-010, Curitiba-PR, BRASIL
Tel 0055 41 232-9084; Fax 0055 41 253-2332
jarce@floresta.ufpr.br

²Departamento de Matemática, UFPR
Centro Politécnico – CEP 81.531-990, Curitiba-PR, BRASIL
Tel 0055 41 361-3403; Fax 0055 41 253-2332;
carnieri@mat.ufpr.br

³Silviconsult Ltda
R. Alm. Tamandaré, 1995 – CEP 80.040-010, Curitiba-PR, BRASIL
Tel 0055 41 252-7665; Fax 0055 41 252-6795;
silviconsult@cwbcnex.com.br

Abstract

A Transportation Scheduling System (TSS) of forest multi-products was developed. The TSS is composed of two modules. The first module has as finality the global minimization of the transportation costs corresponding to the loaded trips, and uses the Transportation Method. The second module has as finality the entire trip scheduling for each contracted truck of the fleet. The Trucks Designation Algorithm (TDA) uses Dynamic Programming. As benefits, 1) the TMA minimizes the total transportation costs, and 2) the TDA, reducing the idleness of each truck, offer an important negotiation tool to force a decreasing process in the transportation prices.

Keywords: Transportation Method, Dynamic Programming, Optimization

1 Introducción

El valor de los productos forestales se incrementa con las diferentes actividades que se suceden en el proceso productivo de los bosques: producción de plantines, plantación, raleos, podas, cosecha y transporte. El manejo forestal considera las actividades desarrolladas durante la vida de los rodales descuidando por lo general las operaciones de cosecha y transporte, a pesar de que los costos acumulados durante la vida del rodal con frecuencia son menores que el costo de transporte considerado individualmente. Este último puede alcanzar, en rodales exóticos implantados en el Sur y Sudeste del Brasil entre 33% y 66% del costo total del producto forestal puesto en fábrica, para distancias variando entre 45 y 240 km. (SEIXAS, 1992).

La complejidad de los problemas forestales es responsable por la utilización cada vez más común y frecuente de herramientas matemáticas como auxilio en el proceso de toma de decisiones. Ejemplos de ello son los modelos de planeamiento de largo plazo basados en la Programación Linear y sus variaciones (BARROS & WEINTRAUB, 1982; LOUCKS, 1964; WARE & CLUTTER, 1971; NEWNHAM, 1975; CARNIERI et al., 1991; VOLPI, 1997).

Mientras el manejo forestal considera numerosas actividades y decisiones que deben ser tomadas a lo largo de muchos años e incluso décadas, el transporte forestal es decidido e implementado en algunos pocos días, y con frecuencia en cuestión de horas. Sin embargo, el transporte forestal consume prácticamente el 50 % del costo de adquisición del producto en las industrias, de modo que puede ser afirmado con sentido común que el beneficio de algunas pocas horas o kilómetros en el transporte forestal es comparable a la reducción de algunos años en el turno de corte de los rodales.

El transporte de productos forestales no ha sido estudiado aún de forma amplia y completa, pero los trabajos pioneros de JONES et al. (1986), WEINTRAUB et al. (1990, 1996), SEIXAS (1992), SEIXAS & WIDMER (1993), SCHILKRUT & WURMANN (1993) y RÖNNQVIST & RYAN (1997) merecen gran destaque.

El presente trabajo describe el desarrollo de un Sistema de Programación del Transporte de multiproductos forestales teniendo por objetivo la minimización de costos.

2 Materiales y Métodos

Los datos necesarios para la caracterización del sistema constituyen las entidades del mismo: productos forestales, puntos de producción, clientes y camiones. De los productos forestales deben ser conocidas sus dimensiones y eventuales restricciones para el transporte por algunas clases de camiones. De los puntos de producción los horarios de inicio y término de las actividades diarias, la producción diaria y el stock disponible de cada tipo de producto, la capacidad horaria de carga de los cargadores y las condi-

ciones de acceso y sus eventuales restricciones para algunas clases de camiones. De los clientes los horarios de inicio y término de las actividades diarias, la demanda diaria y el stock de cada tipo de producto y la capacidad horaria de descarga de los cargadores. De cada camión de la flota debe ser conocida su capacidad de carga, el tipo de productos forestales que pueden ser transportados, los horarios de inicio y término de las actividades diarias, los caminos por los cuales el camión puede transitar y si el pernocte es fijo (garaje) o puede cambiar con el tiempo. Adicionalmente deben ser rigurosamente tratadas las distancias entre las entidades del sistema consideradas dos a dos y los tiempos necesarios para recorrerlas, considerando al camión vacío y con carga, y sometido a condiciones climáticas normales y anormales, dado que las actividades propias del transporte forestal se desarrollan a cielo abierto y son muy afectadas por las condiciones climáticas.

Los datos utilizados para el desarrollo del sistema provienen de una importante empresa forestal del Estado del Paraná, Brasil. Sin embargo, la flexibilidad del mismo permite su aplicación a diversas situaciones diferentes de las utilizadas para su concepción e implementación.

Los costos de transporte utilizados como criterio base para la minimización son los costos efectivamente pagados por las empresas forestales a los propietarios de la flota de camiones, la cual es contratada en su totalidad. En el caso de que la empresa posea su propia flota de camiones los costos utilizados deben ser los costos unitarios por tonelada y kilómetro para cada tipo de camión considerado.

Para el desarrollo del Sistema de Programación del Transporte son consideradas dos herramientas clásicas de la Investigación de Operaciones: la Programación Linear (PL) y la Programación Dinámica (PD) o de etapas múltiples. Específicamente son utilizados el Modelo de Transporte (MT), que constituye un caso simplificado del algoritmo Simplex, y un algoritmo basado en la PD con el objetivo de minimizar la suma de los tiempos de viaje vacío y de espera en filas de los camiones.

3 Resultados y Discusión

El Sistema de Programación del Transporte de multiproductos forestales (SPT) se compone de dos módulos principales, caracterizado cada uno por un algoritmo específico: 1) el Algoritmo del Modelo de Transporte (AMT) y 2) el algoritmo de Designación de los Camiones (ADC). La Figura 1 esquematiza el diagrama de flujo del Sistema de Programación del Transporte. Debe ser destacado que en la práctica cada camión transporta solamente un tipo de producto en cada viaje.

Referencias:

p = tipo de producto forestal;

l = número del camión;

N_p = número total de productos forestales;

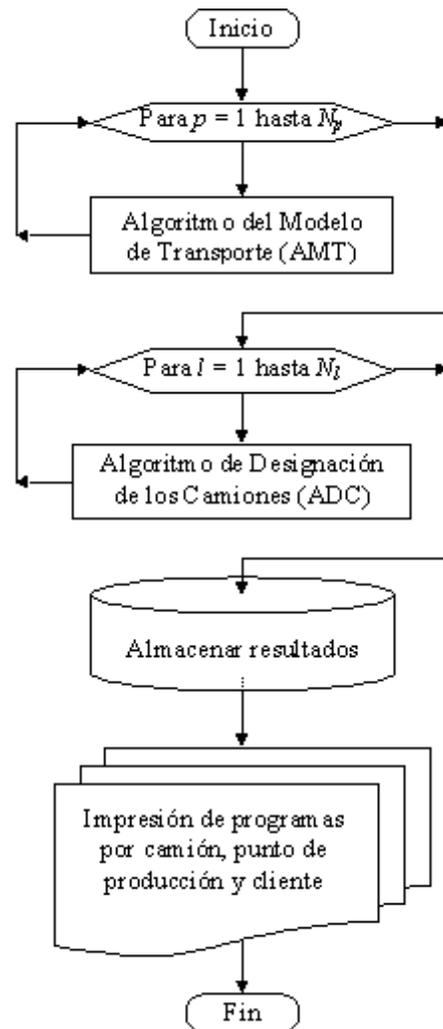


Figura 1 - Diagrama de flujo del Sistema de Programación del Transporte

N_l = número total de camiones.

3.1 Algoritmo del Modelo de Transporte (AMT).

Para cada tipo producto forestal p es optimizado inicialmente el volumen total de madera que debe ser transportado desde cada punto de producción i hasta cada cliente j . Para esta optimización es utilizado el Modelo de Transporte (MT).

Sean x_{ij} la cantidad de producto forestal transportada desde el punto de pro-

ducción i hasta el cliente j y c_{ij} el costo unitario correspondiente. Entonces, el modelo general de PL que representa al MT es el siguiente:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, \forall j$$

donde a_i y b_j representan, respectivamente, la cantidad total ofertada por los puntos de producción i y demandada por los clientes j .

El primer grupo de restricciones (Ecuación 2) establece que la suma de los envíos desde un punto de producción i no puede superar a su cantidad ofertada total a_i ; análogamente, el segundo grupo de restricciones (Ecuación 3) establece que la suma de los envíos hacia un cliente j no puede ser menor que su cantidad demandada total b_j .

El AMT garantiza la minimización del costo total de transporte, dado que las empresas forestales generalmente pagan, a los propietarios de la flota de camiones, solamente los viajes cargados con madera. Los resultados del AMT son almacenados para su posterior utilización con el ADC.

3.2 Algoritmo de Designación de los Camiones (ADC).

Luego de la minimización de los costos totales de transporte, todos los viajes y las actividades de carga y descarga deben ser programados de manera a minimizar, para cada camión l , la suma de los tiempos de viaje vacío y de espera en filas. Para ello es utilizado el Algoritmo de Designación de los Camiones (ADC) basado en la Programación Dinámica o de etapas múltiples.

En el problema del transporte de multiproductos forestales considerado en el presente trabajo, varias decisiones interdependientes deben ser tomadas de forma secuencial en el tiempo. Cada uno de los viajes de cada camión, por ejemplo, incluye: 1) viaje vacío desde el garaje o desde el último cliente hasta el próximo punto de producción, 2) eventual fila en el punto de producción, 3) carga, 4) viaje cargado hasta el cliente, 5) eventual fila en el cliente y 6) descarga. Todos los viajes de cada camión ocurren uno después del otro a lo largo del día, y es en este punto que la PD puede ser utilizada.

Una gran ventaja de la utilización de la PD en la programación de camiones es que ella permite un control preciso de las filas que los camiones eventualmente deben

aguardar en los puntos de producción y/o en los clientes. Al estimar para cada camión los tiempos de carga, viajes cargados, descarga y viajes vacíos, son conocidos los horarios a los cuales cada camión arriba al punto de producción, carga, parte del punto de producción, arriba al cliente y descarga. Conociendo estos horarios es sencillo verificar la presencia de otros camiones designados con anterioridad en los puntos de producción y en los clientes considerados para el nuevo camión. En el caso de que exista otro camión cargando en el mismo punto de producción y/o descargando en el mismo cliente que están siendo considerados para el nuevo camión, los tiempos de espera en filas correspondientes deben ser calculados y adicionados al tiempo de viaje vacío, que constituye la variable de minimización del ADC. De esta manera, con la inclusión de eventuales tiempos de espera en filas en los cálculos, la opción considerada se torna menos atractiva desde el punto de vista de la minimización y los tiempos de viaje vacío y de espera en filas son considerados simultáneamente.

La ecuación recursiva describe la relación existente entre un estado $j^{(k)}$ de la etapa k , la decisión tomada y el nuevo estado resultante $j^{(k+1)}$ en la etapa $k+1$. En otras palabras, la ecuación recursiva considera el tiempo de viaje vacío acumulado hasta un cliente $j^{(k-1)}$ en la etapa $k-1$, el viaje hasta el próximo cliente $j^{(k)}$, y el menor tiempo vacío acumulado resultante $tmin_{j^{(k)}}$. Las expresiones de la ecuación recursiva son las siguientes, para la primer y las siguientes etapas respectivamente:

$$tmin_{j^{(1)}} = \text{Min} \{tv_{li} + tf_i + tf_j\} \quad (4)$$

$$tmin_{j^{(k)}} = \text{Min} \{tmin_{j^{(k-1)}} + (tv_{j^{(k-1)}i} + tf_i + tf_j)\} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

donde:

tv_{li} = tiempo de viaje vacío desde el garaje del camión l hasta el punto de producción i ;

$tv_{j^{(k-1)}i}$ = tiempo de viaje vacío desde el cliente j de la etapa $k-1$ hasta el punto de producción i de la etapa k ;

$tmin$ = variable que controla la suma acumulada de los tiempos de viaje vacío y de espera en filas;

tf_i = tiempo de espera en fila en el punto de producción i ;

tf_j = tiempo de espera en fila en el cliente j .

La variable $tmin_{j^{(k)}}$ experimenta siempre un incremento de una etapa k a la siguiente etapa $k+1$. Esto es lógico, pues cualquier viaje con carga debe necesariamente ser precedido por un viaje vacío. Puede ser observado en las expresiones (4) y (5) que los tiempos de espera en filas en los puntos de producción (tf_i) y en los clientes (tf_j) son considerados en la minimización. Estos tiempos son obtenidos a partir de las posibles superposiciones que puedan ocurrir, pues para todos los camiones

designados previamente son registrados los intervalos de tiempo en que son cargados y descargados. De esta manera, los tiempos de viaje vacío y de espera en filas son minimizados simultáneamente para cada camión.

3.3 Vínculo entre el AMT y el ADC

El AMT optimiza las cantidades totales que deberán ser transportadas desde cada punto de producción hasta cada cliente. Es evidente que tales cantidades podrán requerir de más de un viaje para su transporte, y es en este punto que entra en acción el ADC. La información óptima del AMT queda almacenada en medio magnético y es utilizada por el ADC, el cual optimiza para cada camión, la jornada de trabajo en lo que se refiere al tiempo efectivo de transporte y al tiempo ocioso en viajes vacíos y/o de espera en filas.

El objetivo del sistema de transporte desarrollado no es optimizar la programación conjunta del transporte de toda la flota actual de camiones, sino por el contrario, obtener el mejor rendimiento de cada uno de ellos individualmente. En este sentido, es muy probable que algunos camiones sean descartados, por no sobrar madera para cargar, como consecuencia del mejor rendimiento diario de los camiones designados previamente. Por lo tanto, a la hora de programar los viajes de los camiones, es necesario establecer el orden de designación de los mismos. En tal sentido, inicialmente fueron contempladas dos opciones: 1) ordenar aleatoriamente y 2) ordenar arbitrariamente según criterios de responsabilidad y eficiencia, propios de cada camión. De esta manera la empresa detenta el poder de decidir el orden en el cual los camiones serán designados.

Resultados de programas de optimización ya implementados en condiciones comparables a las utilizadas para el SPT indican reducciones de costos del orden de 10 a 30%, como una reducción directa de los costos de transporte o como un incremento en la capacidad de transporte con la misma flota de camiones (WEINTRAUB et al., 1990 y 1996; RÖNNQVIST & RYAN, 1997).

En la Tabla 1 se presenta parte de un programa de transporte óptimo generado por el SPT para un reducido escenario. Solamente son presentados los viajes optimizados para los primeros dos camiones, en virtud de que en ellos aparecen todos los elementos que caracterizan al sistema, como ser el buen aprovechamiento de la jornada laboral de los camiones, el cálculo de los tiempos de carga y descarga, el cálculo y tratamiento de los eventuales tiempos de espera en filas y la tolerancia en las cargas, que lleva a realizar viajes transportando un cierto volumen menor que la capacidad de transporte. Todos estos aspectos serán tratados separadamente en los párrafos siguientes.

l	hs_g	i	p	ha_i	tf_i	tc_i	hs_i	Vt	j	$tvc_{i(k)j(k)}$	ha_j	tf_j	td_j	hs_j	$tvv_{j(k)i(k+1)}$	ha_g
1	6:00	1	2	6:25	0:00	0:48	7:13	40	1	2:50	10:03	0:00	0:12	10:15	0:20	-
	-	4	2	10:35	0:00	0:48	11:23	40	3	0:24	11:57	0:00	0:24	12:21	0:16	-
	-	4	2	12:37	0:00	0:48	13:25	40	3	0:24	13:59	0:00	0:24	14:23	0:16	-
	-	4	1	14:39	0:00	0:48	15:27	40	2	2:50	18:17	0:00	0:12	18:29	0:25	-
	-	2	1	18:54	0:00	0:48	19:42	40	2	0:35	20:17	0:00	0:12	20:29	0:25	21:04
2	6:00	3	1	6:25	0:00	0:35	7:00	40	3	2:43	9:43	0:00	0:24	10:07	0:25	-
	-	1	2	10:32	0:00	0:48	11:20	40	1	2:50	14:10	0:00	0:24	14:34	0:20	-
	-	4	1	14:54	0:33	0:48	16:17	40	3	0:24	16:41	0:00	0:24	17:05	0:16	-
	-	4	2	17:21	0:00	0:42	18:03	35	1	1:50	19:53	0:00	0:21	20:14	0:38	20:52

Tabla 1: Programa de Transporte óptimo generado por el ADC

donde:

l = camión;

hs_g = hora de salida del garaje (inicio de la jornada laboral);

i = punto de producción;

p = producto;

ha_i = hora de arribo al punto de producción i ;

tf_i = tiempo de espera en filas en el punto de producción i ;

tc_i = tiempo de carga en el punto de producción i ;

hs_i = hora de salida del punto de producción i ;

Vt = volumen transportado en toneladas;

j = cliente;

$tvc_{i(k)j(k)}$ = tiempo de viaje cargado desde el punto de producción i (etapa k) hasta el cliente j (etapa k);

ha_j = hora de arribo al cliente j ;

tf_j = tiempo de espera en filas en el cliente j ;

td_j = tiempo de descarga en el cliente j ;

hs_j = hora de salida del cliente j ;

$tvv_{j(k)i(k+1)}$ = tiempo de viaje vacío desde el cliente j (etapa k) hasta el punto de producción i (etapa $k + 1$);

ha_g = hora de arribo al garaje (finalización de la jornada laboral);

En la Tabla 1 puede ser apreciado el buen aprovechamiento por parte de los camiones, los cuales actualmente realizan, en promedio, entre 2 y 3 viajes por día, y según el programa de transporte generado por el SPT llegan a realizar, al menos en teoría, entre 4 y 5 viajes. Adicionalmente la proporción del tiempo de la jornada laboral de los camiones en que éstos permanecen vacíos disminuyó sensiblemente con la programación, pasando de valores entre 30 % y 50 % en la práctica a valores entre 10 % y 25 % con el programa -11% para el camión 1 y 14% para el camión 2-.

Si bien en la Tabla 1 fueron presentados los viajes de los dos primeros camiones designados, la situación descrita en el párrafo anterior es válida para prácticamente todos los camiones, con excepción de los últimos. La decisión de cuáles serán los primeros y los últimos camiones a ser designados es responsabilidad de la empresa que aplique el programa.

Los tiempos de carga/descarga no son objeto de optimización por parte del SPT, dado que dependen únicamente, al menos en teoría, de la capacidad de carga del camión y de la velocidad de carga/descarga de las máquinas que realizan tales operaciones. Por ejemplo, el camión 1, con una capacidad de carga de 40 t, requiere 48 minutos para ser cargado en los puntos de producción 1, 2 o 4, cuyas máquinas trabajan a una velocidad de carga de 50 t/h. Ya el camión 2, cuya capacidad de carga es también de 40 t, requiere apenas 35 minutos para ser cargado en el punto de producción 3, debido a que la cargadora trabaja a razón de 70 t/h.

La aparición de un tiempo de espera en filas -tercer viaje del camión 2- se debe al hecho de que, según lo programado, cuando este camión arriba al punto de producción 4, a las 14:54 hs, ya está el camión 1 previamente designado, cargando madera luego de arribar a las 14:39 hs. Dado que la carga de este camión 1 demora 48 minutos en realizarse, el programa prevé que el camión salga del punto de producción 4 a las 15:27 hs (14:39 + 0:48). Por lo tanto, el camión 2 deberá aguardar desde las 14:54 hasta las 15:27 hs, o sea una espera en fila de 33 minutos, para poder comenzar a ser cargado. La aparición de esta fila no indica que la solución sea sub-óptima, dado que la ecuación recursiva del ADC no minimiza solamente los tiempos de espera en filas, sino que minimiza la suma de los tiempos de viajes vacíos y de espera en filas (Ecuaciones 4 y 5).

Puede observarse en el cuarto y último viaje del camión 2 que el volumen transportado programado fue de 35 t, siendo que su capacidad de carga es de 40 t. Esta tolerancia concerniente a una cierta ociosidad en el volumen transportado es extremadamente importante desde el punto de vista de los tiempos que están siendo optimizados, ya que de no existir obligaría tal vez al camión a realizar un viaje que implique un tiempo vacío y/o de espera en filas mayor. Es obvio que esta tolerancia (10-15%) debe

ser fijada por los propietarios de los camiones, y tiene apenas la función de viabilizar viajes muy convenientes para un determinado camión en un determinado momento de la programación, pero quizás con un volumen algo menor que la capacidad de carga del mismo.

4 Conclusiones

La combinación del Modelo de Transporte y de un algoritmo basado en la Programación Dinámica se perfila como una herramienta eficiente para alcanzar la minimización de costos en el Sistema de Programación del Transporte. El control del orden de designación en el algoritmo de Designación de los Camiones (ADC) es un atributo de la empresa forestal que aplique el sistema a su flota de transporte.

La minimización de los costos totales de transporte es garantizada de manera exacta por el algoritmo del Modelo de Transporte, que es una situación particular del algoritmo Simplex.

El transporte forestal, frecuentemente descuidado por los responsables del manejo forestal, debe ser estudiado de una forma seria y sistemática dado que las actividades en él envueltas prácticamente duplican los costos acumulados durante toda la vida de los rodales que componen el bosque. Todas las etapas del proceso productivo forestal deben estar interrelacionadas para poder alcanzar niveles globales de optimización.

4.1 Referencias Bibliográficas

BARROS, O. & WEINTRAUB, A., 1982. Planning for a Vertically Integrated Forest Industry. *Operations Research*, 30(6): 1168-1182.

CARNIERI, C.; GAVINHO, L. G. & MAESTRI, R., 1991. Um Sistema de Planejamento Florestal. In: *II Encontro de Planejamento Florestal. Anais. Curitiba.*

JONES, J. G.; HYDE, J. F. C., III & MEACHAM, M. L., 1986. Four analytical approaches for integrating land management and transportation planning on forest lands. Research Paper INT-361. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 33 p.

LOUCKS, D. P., 1964. The Development of an Optimal Program for Sustained-Yield Management. *Journal of Forestry* 62: 485-490 p.

NEWNHAM, D. H., 1975. Logplan: A model for planning logging operations. Ottawa. Information Report FMR-X, 77. 59 p.

RÖNNQVIST, M. & RYAN, D., 1997. Solving trucks dispatch problems in real time. Division of Optimization / MAI, Linköping Institute of Technology, Sweden. 15 p.

SCHILKRUT, A. C. & WURMANN, D. K., 1993. Desarrollo de modelos matemáticos aplicados al transporte en el sector forestal. Ingeniería de Sistemas 10(2).

SEIXAS, F., 1992. Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). USP. São Carlos - SP, Brasil. 106 p.

____ & WIDMER, J. A., 1993. Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal da madeira utilizando-se de Programação Linear não-inteira. IPEF, Piracicaba (46): 107-118.

VOLPI, N. M., 1997. O impacto de perturbações estocásticas em um modelo de planejamento florestal. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, UFPR. 268 p.

WARE, G. O & CLUTTER, J. L., 1971. A Mathematical Programming System for the Management of Industrial Forests. For. Sci. 17: 428-445 p.

WEINTRAUB, A; EPSTEIN, R.; MORALES, R. & SERON, J., 1990. Un sistema de asignación al transporte de productos forestales. Ingeniería de Sistemas 7(1): 73-81.

____; ____; ____; ____ & TRAVERSO, P., 1996. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. Interfaces 26 (4): 1-12.