

# Desarrollo de una Herramienta para la Minimización de Tardanza Total en Ambientes JOB SHOP Apoyada en Búsqueda Tabú

Elkin Rodríguez Velásquez, Andrés Felipe Sánchez y Jorge Mario Chaverra Peña

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Medellín. Escuela de Ingeniería de la Organización  
(erodrigu ; afsanche ; jmchaver) @unalmed.edu.co

Recibido para revisión May-2006, aceptado Jun-2006, versión final recibida Jun-2006

**Resumen:** En este trabajo se presenta un algoritmo de búsqueda tabú para resolver el problema de programación de plantas tipo job shop, con el objetivo de minimizar la tardanza total. Se utilizó un vecindario basado en la ruta crítica de cada uno de los trabajos. Se probó con 5 problemas clásicos de la literatura sobre job shop. Parece haber una dependencia del resultado con respecto a la solución inicial a pesar de esto los resultados son satisfactorios dado a la reducción significativa de la tardanza total en los problemas evaluados.

**Palabras Clave:** Job Shop, Búsqueda Tabú, Tardanza Total, Ruta Crítica.

## 1 INTRODUCCIÓN

La secuencia de operaciones propias de un proceso y todo lo que respecta a su programación se ha convertido hoy en día en una actividad de suma importancia para aquellos que se ven de uno u otro modo involucrados con esta tarea, aunque la realidad es, que en muchas de las empresas de nuestro país, una verdadera programación de producción es realizada por personas que desconocen la teoría y métodos eficientes de programación, llevando a cabo esta tarea, por lo tanto, de una manera ineficiente con frecuencia.

Los problemas de programación de producción son numerosos y cambiantes según el proceso, por lo que se hace necesario acomodar los modelos existentes a las especificaciones de cada proceso en particular. Existen numerosas técnicas útiles para solucionar problemas difíciles de programación de tareas como lo son la Búsqueda Tabú, el Enfriamiento Simulado y los Algoritmos Genéticos, siendo el primero la técnica utilizada en el presente trabajo, en el cual se pretende entregar buenas soluciones a problemas de programación en ambientes Job Shop, teniendo como función objetivo la minimización de la tardanza total.

A continuación se presentará, en la sección 2 un estado del arte, donde se mencionan algunos de los trabajos que han sobresalido en el tema a lo largo de la historia. En la sección 3 se presenta una definición del problema, allí se especifica en que consiste el ambiente Job Shop y la función objetivo Tardanza Total. En la sección 4 se describe el enfoque propuesto; luego se pre-

sentan las pruebas hechas y un análisis a los resultados en la sección 5 y por último se presentan algunas conclusiones en la sección 6.

## 2 ESTADO DEL ARTE

La Búsqueda Tabú y los ambientes Job Shop han sido tema de investigación durante muchos años, y aún en la actualidad siguen publicándose artículos referentes a la solución de problemas de programación en este tipo de ambientes con técnicas como la Búsqueda Tabú. En lo que a Búsqueda tabú se refiere, deben de mencionarse inicialmente los trabajos de Fred Glover, Tabu Search I y II (1989). Respecto a la aplicación de esta técnica a la programación de producción, en el ámbito internacional pueden mencionarse, entre otros, trabajos como los de Nowicki y Smutnicki (1996) y Pezzella y Merelli (2000), ambos para ambientes Job Shop, utilizando distintos vecindarios basados en la ruta crítica. En el entorno nacional los trabajos de Rivera (2005) para programación de proyectos con recursos limitados y Osorio (2005) para ambientes Job Shop; ambos utilizando como función objetivo la minimización del tiempo total determinación de un conjunto de trabajos, usualmente llamado Makespan. Respecto a la función objetivo llamada Tardanza Total, en ambientes Job Shop no son muchos los trabajos que existen en la literatura, sobresalen el de He, Yang y Tiger (1996) que abordan el problema mediante el enfriamiento simulado y el de Amaral y Rigao (2000), cuyo vecindario se ha usado en este trabajo y se presenta en detalle en la sección 4.

### 3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El ambiente Job Shop está definido como una cantidad de  $M$  máquinas y  $N$  trabajos, cada trabajo tiene una fecha prevista o de compromiso para terminarlo y está compuesto por  $M$  operaciones, cada operación es realizada por una sola máquina. Cada máquina procesa una operación al tiempo. Las operaciones de un trabajo se realizan en diferentes máquinas en una secuencia que se debe respetar. Las máquinas no tienen fallas y siempre están disponibles durante el periodo de programación.

Para un trabajo  $i$ , su tardanza  $T_i$  se define como el valor máximo entre cero y la diferencia entre su fecha de terminación ( $C_i$ ) y aquella en la cual estaba previsto entregarlo ( $d_i$ ). La función objetivo que se desea minimizar es la tardanza total, es decir, la sumatoria de las tardanzas de todos los trabajos. Para un conjunto de  $N$  trabajos, la función objetivo llamada Tardanza Total se puede expresar de la siguiente forma:

$$T = \sum \max(0, (C_i - d_i)) \quad \forall i = 1, N$$

El problema consiste entonces en hallar la asignación de las máquinas a las operaciones de cada trabajo de manera que se respeten las restricciones de precedencia de las operaciones de cada trabajo, sin traslapes, haciendo una operación sobre cada máquina a la vez y de manera que se minimice la tardanza total.

Para visualizar mejor el problema se presentan las Tablas 1 y 2. En donde se muestran cuatro trabajos, con sus respectivas rutas (secuencia de máquinas donde se realizan las operaciones), tiempos de procesamiento de cada una de las operaciones asignadas a cada una de las máquinas, y las fechas de compromiso de cada uno de los trabajos:

Tabla 1: Fechas de compromiso de cada trabajo

Trabajos	Fecha de compromiso $d_i$
1	d1
2	d2
3	d3
4	d4

Tabla 2: Los tiempos de procesamiento y las rutas de cada uno de los trabajos

Trabajos	Tiempos de Procesamiento			Rutas		
	1	2	3	1	2	3
1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	m1	m2	m3
2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	m1	m2	m3
3	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	m3	m2	m1
4	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	m2	m3	m1

Donde  $d_i$  es la fecha prevista o de compromiso de

cada trabajo,  $m$  es la máquina donde se realiza la operación y  $P_{ij}$  es el tiempo de la operación  $j$  del trabajo  $i$ .

Con lo anterior tenemos información suficiente para poder plantear un grafo en donde se mostrarán los arcos disyuntivos y conjuntivos que se presentan en estos problemas.

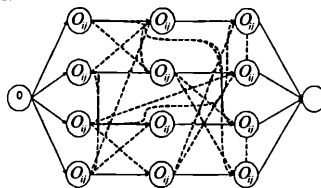


Figura 1: Representación en grafo del problema de Job Shop

donde,  $O_{ij}$  es la operación  $j$  del trabajo  $i$ , las flechas con los arcos conjuntivos y las líneas punteadas son los arcos disyuntivos.

Es entonces posible determinar y calcular la ruta crítica, que para efectos del problema, se hallará para cada uno de los trabajos, pues a partir de esta es posible determinar  $C_i$ , la fecha de terminación de cada trabajo  $i$ . El método de trabajo y de solución se describe en el siguiente punto.

### 4 SOLUCIÓN PROPUESTA

propuesta para mejorar la solución al problema descrito anteriormente utiliza como técnica la Búsqueda Tabú, un procedimiento heurístico para solucionar problemas de optimización combinatoria, desarrollado por Fred Glover (1989).

El procedimiento genera una solución inicial y determina la ruta crítica de cada uno de los trabajos (el camino o caminos más largos desde el inicio del programa hasta el tiempo de terminación de la última operación del trabajo), luego halla aquellos que tienen tardanza mayor que cero y realiza todos los cambios permitidos entre las operaciones pertenecientes a dicha ruta, a continuación evalúa el desempeño de cada una de las soluciones nuevas generadas, obteniendo así un vecindario del cual se elige una nueva solución como semilla, para después de determinado número de iteraciones encontrar, si es posible, una secuencia de operaciones que minimice la tardanza total. El algoritmo consta de una fase de intensificación que básicamente consiste en re-enfocar la búsqueda alrededor de esa mejor solución o de un conjunto de ellas.

Es importante resaltar, como se mencionó antes, que este es un problema combinatorio y que la búsqueda tabú realiza los cambios sobre esa solución inicial que se presenta, teniendo como característica importante la de

crear una lista tabú (movimientos tabú) que almacena los movimientos no permitidos en la presente iteración. La razón de ésta lista es la de excluir los movimientos que nos pueden regresar a algún punto de una iteración anterior (evitando así que el programa entre en ciclos).

#### Seudo código

La estructura básica del algoritmo de búsqueda tabú es la descrita a continuación:

**Paso 1:**  $Lu = 1$ .  $K = 1$ . Seleccione un programa inicial  $S_1$  y haga  $S_0 = S_1$  y  $LT$ .

**Paso 2:** a) Calcular la ruta crítica de cada trabajo. Si valor de  $S_0 > S_1$  entonces guardar arreglo  $(\pi V(\pi) V', T)$ ,  $Lu = Lu + 1$ . b) Si ningún trabajo es tardío o  $K = N$  pare.

**Paso 3:** a) Si  $Q > J$  asigne  $Q = 1$ . b) Si El trabajo  $Q$  es tardío valla al paso 4, si no haga  $Q = Q + 1$  y vuelva al paso 3a).

**Paso 4:** a) Evalúe todas las posibles inversiones sobre la ruta crítica del trabajo  $Q$  y escoja la de menor Tardanza. b) Guarde la inversión y haga  $K = K + 1$ ,  $Q = Q + 1$  y valla al paso 2a).

Intensificación (si  $K = N$  y  $Lu > 1$ ).

**Paso 5:** a) Pasar todas las mejores de la historia al arreglo dos  $(\pi V(\pi) V', T)$  de tamaño  $lu - 1$ . Haga  $Lu = 1$  y  $K = 1$ . b) Seleccione del arreglo dos  $(\pi V(\pi) V', T)$ , un posible cambio de  $V(\pi) V'$ . Reficelo en  $\pi$  y actualicé la  $LT$  con  $T$ . Vaya al paso 2a).

**Solución inicial** La solución inicial utilizada para comenzar con ella la búsqueda tabú, es una competencia entre dos reglas de despacho tradicionales EDD (Fecha mínima de entrega) y  $t$  (Tiempo en el cual la operación puede ser programada), estas, son calculadas para las operaciones que se encuentren disponibles, de estos valores se selecciona el máximo para cada una de las operaciones, y entre estos máximos se elije el menor, el cual indica la operación que será programada.

$$d_j' = \max \left\{ \frac{d_j}{(i - (i/2))}, t \right\}$$

La solución que da como resultado, comienza asignando las operaciones que tienen fecha de compromiso más próxima, dejando las otras para ser programadas en el menor tiempo de máquina disponible. Esta combinación presenta una solución inicial con una ruta crítica más amplia con respecto a posibles cambios en los arcos disyuntivos del grafo.

## 5 RESULTADOS

El método de búsqueda tabú presentado se implementó con éxito en lenguaje Visual Basic. Se tomaron como marco experimental problemas clásicos de la literatura, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Problemas clásicos de Jop Shop

Problema		
La01	10*5	S. Lawrence
La02	10*5	S. Lawrence
ft06	6*6	Fisher y Thompson
ft10	10*10	Fisher y Thompson
ft20	20*5	Fisher y Thompson

Dado que para dichos problemas se conoce el makespan de la solución óptima, se utilizó esta en cada problema de tardanza, como fecha prevista común a todos los trabajos (A), para probar el algoritmo. Para el conocido FT06, se establecieron también los tiempos de terminación de cada trabajo, en una solución óptima al problema de minimizar el makespan, como fechas previstas (B) para el problema de minimizar la Tardanza Total.

Los parámetros para cada problema son el número de iteraciones del la búsqueda tabú (100), el tamaño de la lista tabú (6).

Se realizó una prueba con el problema FT06, con el fin de probar las bondades de la intensificación, el problema fue corrido primero sin utilizar la estrategia de intensificación y luego con ella. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las corridas sin la estrategia de intensificación y en la Tabla 5 se presentan los resultados correspondientes usando dicha estrategia.

Tabla 4: Resultados sin usar la estrategia de intensificación

Problema	Fechas de compromiso	Tardanza
FT06	A	16
FT06	B	5

Tabla 5: Resultados usando la estrategia de intensificación

Problema	Fechas de compromiso	Tardanza
FT06	A	2
FT06	B	0

Al comparar los resultados de las Tablas 4 y 5 muestran claramente las bondades de la estrategia de intensificación en cuanto al valor de la Tardanza Total.

Decidimos entonces utilizar para las demás corridas la estrategia de la intensificación.

Tabla 6: Resultados Con Intensificación

Prob.	Fechas de compromiso	Tardanza Inicial	Tardanza Final	Mejora %
La01	A	692	378	54
La02	A	744	350	47
Ft06	A	55	2	4
Ft10	A	1799	561	31
Ft20	A	924	746	80

## 6 CONCLUSIONES

El enfoque presentado puede ser adaptado para programar las operaciones en otros ambientes de producción donde el cumplimiento de las fechas de compromiso con los clientes es un criterio fundamental de calidad y competitividad.

Si bien los tiempos utilizando la estrategia de intensificación aumentan notablemente, estos aún son razonables para programar la producción en un ambiente real.

Como trabajo futuro se planea investigar varias reglas de despacho que permitan generar una mejor solución inicial como semilla para la búsqueda tabú.

También se trabaja en la búsqueda de estructuras de almacenamiento más eficientes para los vecindarios.

No tenemos como comparar nuestros resultados con otros estudios ya que la bibliografía sobre la mini-

mización de tardanza total en ambientes Job Shop es todavía poca.

## REFERENCIAS

- Amaral, V. y Rigao, C. (2000), 'Tabu search for minimizing total tardiness in a job shop', *International journal of production economics* pp. 131–140.
- He, Z., Yang, T. y Tiger, A. (1996), 'An exchange heuristic imbedded with simulated annealing for due-dates job-shop scheduling', *European Journal of Operational Research* **91**, 99–117.
- Nowicki, E. y Smutnicki, C. (1996), 'A fast taboo search algorithm for the job shop problem', *Management Science* **91**(1), 160–175.
- Osorio, K. (2005), 'Estudio de la programación industrial de tareas en ambientes job shop', Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia.
- Pezzella, F. y Merelli, E. (2000), 'A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem', *European Journal of Operational Research* **120**, 297–310.
- Rivera, J. (2005), 'Desarrollo de una herramienta apoyada en búsqueda tabú para la programación de producción', Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia.



LLEGAMOS A TODO EL MUNDO!