Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación

Año 2 Número 10

Agosto 2020

ISSN 2695-6098

MODELACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN (SCHEDULING) DE LA PRODUCCIÓN CON TIEMPOS DE TRANSPORTE, AJUSTE Y CONFIGURACIÓN DE MÁQUINAS EN TALLERES DE MECANIZADO CONVENCIONAL

M. en C. Pedro Andrés Díaz Leyva
Brascuba Cigarrillos S.A.
pedro.diaz@brascuba.cu
Ing. Ind. Mariana Medero Martínez
GEOCUBA Oriente Norte
mmm230394@gmail.com

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Pedro Andrés Díaz Leyva y Mariana Medero Martínez (2020): "Modelación de la programación (scheduling) de la producción con tiempos de transporte, ajuste y configuración de máquinas en talleres de mecanizado convencional", Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS, n. 10 (agosto 2020). En línea:
https://www.eumed.net/rev/rilcoDS/10/programacion-talleres.html

RESUMEN

El desarrollo de los sistemas productivos, unido a las crecientes exigencias del mercado trae aparejado la necesidad de cambios en la industria. La incorporación de las tecnologías de la computación ha devenido en el perfeccionamiento de los procesos de manufactura desde la fase de diseño de los productos hasta el control de los servicios post venta.Hoy día la integración de los sistemas de diseño y manufactura asistidos por computadora constituyen un reto para investigadores y empresas. El desarrollo de tecnologías CAPP (por sus siglas en inglés "Computer-Aided Process Planning"), necesarias para su integración, trae consigo la necesidad de construcción de modelos matemáticos de optimización que permitan secuenciar de forma eficiente actividades o trabajos de diversos sectores de la producción entre los que se puede citar los talleres de mecanizado con máquinas herramienta convencionales. La presente investigación hace un análisis del "Job Shop Scheduling Problem" (Problema del taller mecánico) así como de la evolución de los modelos de programación de la producción en talleres de mecanizado con máquinas herramienta convencionales que contribuyen a su solución. Al mismo tiempo analiza las

principales carencias detectadas en estos y se propone un modelo para la programación de la producción que incluye tiempos de transporte, ajuste y configuración de máquinas.
Palabras Claves: Secuenciación, ajuste, máquina, configuración.

ABSTRACT

The development of the productive systems, together with the increasing demands of the market brings with it the need for changes in the industry. The incorporation of computer technologies has resulted in the improvement of manufacturing processes from the design phase of products to the control of post-sale services. Today the integration of computer-aided design and manufacturing systems constitute a challenge for researchers and companies. The development of CAPP (Computer-Aided Process Planning) technologies, necessary for their integration, brings with it the need to build mathematical optimization models that allow efficient sequencing of activities or work in various sectors of the production among which we can mention machining workshops with conventional machine tools. The present investigation analyzes the “Job Shop Scheduling Problem” as well as the evolution of production scheduling models in machining workshops with conventional machine tools that contribute to their solution. At the same time, it analyzes the main deficiencies detected in these and proposes a model for production scheduling that includes transport times, adjustment and machine configuration.
Key Word¨: Job Shop Scheduling Problem

INTRODUCCIÓN

En la actualidad resulta trascendental para las organizaciones lograr una adecuada planificación de los procesos que conforman su sistema producción/servicio. Una planificación que en términos generales va enfocada al uso racional de los recursos materiales y a la optimización de los tiempos de operaciones, como elementos convergente e indispensable en la filosofía “Just in time” (JIT) (Delso, 2013). El éxito de esta planificación, entre otros aspectos, se sustenta en la optimización de secuencias de producción, la programación de tareas, así como la programación de las diferentes operaciones, los cuales son también conocidos en la literatura especializada como problemas de scheduling. (Leung, 2004). Los mismos son considerados por la literatura especializada como una tarea extremadamente difícil la cual requiere de una importante necesidad de cálculo. A su vez, la gran relevancia práctica lo convierte en un área activa de investigación ya que su incorporación a los sistemas empresariales en funcionamiento incrementa exponencialmente su complejidad, dando a luz un conjunto de restricciones que limitan la interpretación del sistema real y que pueden ser claves para su optimización.

Metodología

Aunque el desarrollo de este tipo de estudios es amplio a nivel internacional, en Cuba, desde los primeros años del siglo XXI un conjunto de investigadores comenzó a abordar sobre este tipo de problemas. Para la selección del modelo a perfeccionar se llevó a cabo un estudio de diferentes modelos matemáticos que salieron como resultado de esas investigaciones donde se pueden mencionar: “Secuenciación de líneas de producción” (Del Risco Alfonso, 2002), la investigación “Neuronal Network Modeling and Simulation of the Scheduling” (Ávila Rondón. L. R, 2007.) y “Optimización de la programación en talleres de maquinado con máquinas herramienta en paralelo y recirculación de piezas” (Herrera Márquez, 2015). Esta última propone una modificación en los modelos anteriores, de forma tal que este contemple el funcionamiento de máquinas en paralelo y la recirculación de piezas, eliminando así restricciones existentes en investigaciones anteriores por lo que se puede concluir que de los modelos analizados es el que abarca la mayoría de restricciones aunque no contemplaba tiempos comunes de pérdidas como los ajustes y las transportaciones convirtiéndose estas limitantes en el objeto de la siguiente investigación, con el propósito de optimizar la programación en talleres de mecanizado convencional, enmarcado en la modelación del Job Shop Scheduling Problem para máquinas herramienta, incluyéndole los tiempos de transporte, ajuste y configuración de máquinas que no se tenían en cuenta en el modelo de Herrera Márquez,2015 y analizando en profundidad la variante del Flexible Job Shop Scheduling Problem junto la pertinencia con el enfoque de tecnología de grupos y su representatividad en el modelo propuesta.

Desarrollo del tema

El Flexible Job Shop Scheduling Problem puede ser formulado formalmente como sigue: se tiene un conjunto $J = \{J_1, \dots, J_n\}$ piezas. Cada pieza J_i consiste en una secuencia de operaciones $O_i = \{O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,n_i}\}$, cada operación $O_{i,k}$ tiene que ser procesada en una determinada máquina $M_{i,k} \in M, M = \{M_1, \dots, M_n\}$. Siendo $p_{i,j,k}$ el tiempo de procesamiento necesario para ejecutar la operación *i*, de la pieza *j*, en la máquina *k*. Si cada operación $O_{i,k}$ puede ser procesada sobre un subconjunto de máquinas $M_{i,k} \subseteq M$ entonces se está en presencia de una flexibilidad parcial (partial flexibility) (Tabla 1), de otra manera si cada operación $O_{i,k}$ puede ser procesada en todas las máquinas disponibles $M_{i,k} = M$, se trata entonces de una flexibilidad total (total flexibility) (Tabla 2).

Tabla 1 Estructura de asignación de operaciones del Flexible Job Shop Scheduling Problem con flexibilidad parcial.

$p_{i,k,j}$		M_1	M_2	M_j	M_{j+1}	…	M_{m-1}	M_m
J_1	$O_{1,1}$	∞	$p_{1,1,2}$	$p_{1,1,j}$	$p_{1,1,j+1}$	…	$p_{1,1,m-1}$ $p_{1,2,m-1}$	$p_{1,1,m}$ $p_{1,2,m}$
	$O_{1,2}$	$p_{1,2,1}$	$p_{1,2,2}$	$p_{1,2,j}$	∞	…	…	…
	…	…	…	…	…	…	∞	$p_{1,h1,m}$
	$O_{1,h1}$	$p_{1,h1,1}$	$p_{1,h1,2}$	$p_{1,h1,j}$	$p_{1,h1,j+1}$	…		
J_i	$O_{i,1}$	$p_{i,1,1}$	∞	$p_{i,1,j}$	$p_{i,1,j+1}$	…	$p_{i,1,m-1}$	$p_{i,1,m}$
	$O_{i,2}$	$p_{1,2,1}$	$P_{i,2,2}$	∞	$p_{i,2,j+1}$	…	$p_{i,2,m-1}$	$p_{i,2,m}$

	…	…	…	…	…	…	…	…
	$O_{i,h1}$	∞	$p_{i,hi,2}$	$p_{i,hi,j}$	$p_{i,hi,j+1}$	…	$p_{i,hi,m-1}$	$p_{i,hi,m}$
J_n	$O_{n,1}$	$p_{n,1,1}$	$p_{n,1,2}$	$p_{n,1,j}$	$p_{n,1,j+1}$	…	∞	$p_{n,1,m}$
	$O_{n,2}$	$p_{n,2,1}$	$p_{n,2,2}$	$p_{n,2,j}$	$p_{n,2,j+1}$	…	$p_{n,2,m-1}$	∞
	…	… $p_{n,hn,1}$	… $p_{n,hn,2}$	…	…	…	…	…
	$O_{1,hn}$			∞	$p_{n,hn,j+1}$	…	$p_{n,hn,m-1}$	$p_{n,hn,m}$

Tabla 2 Estructura de asignación de operaciones del Flexible Job Shop Scheduling Problem con flexibilidad total.

$p_{i,k,j}$		M_1	M_2	M_j	M_{j+1}	…	M_{m-1}	M_m
J_1	$O_{1,1}$	$p_{1,1,1}$	$p_{1,1,2}$	$p_{1,1,j}$	$p_{1,1,j+1}$	…	$p_{1,1,m-1}$ $p_{1,2,m-1}$	$p_{1,1,m}$ $p_{1,2,m}$
	$O_{1,2}$	$p_{1,2,1}$	$p_{1,2,2}$	$p_{1,2,j}$	$p_{1,2,j+1}$	…	…	…
	…	…	…	…	…	…	$p_{1,h1,m-1}$	$p_{1,h1,m}$
	$O_{1,h1}$	$p_{1,h1,1}$	$p_{1,h1,2}$	$p_{1,h1,j}$	$p_{1,h1,j+1}$	…		
J_i	$O_{i,1}$	$p_{i,1,1}$	$P_{i,1,2}$	$p_{i,1,j}$	$p_{i,1,j+1}$	…	$p_{i,1,m-1}$	$p_{i,1,m}$
	$O_{i,2}$	$p_{1,2,1}$	$P_{i,2,2}$	$p_{i,2,j}$	$p_{i,2,j+1}$	…	$p_{i,2,m-1}$	$p_{i,2,m}$
	…	…	…	…	…	…	…	…
	$O_{i,h1}$	$p_{i,hi,1}$	$p_{i,hi,2}$	$p_{i,hi,j}$	$p_{i,hi,j+1}$	…	$p_{i,hi,m-1}$	$p_{i,hi,m}$
J_n	$O_{n,1}$	$p_{n,1,1}$	$p_{n,1,2}$	$p_{n,1,j}$	$p_{n,1,j+1}$	…	$p_{n,1,m-1}$	$p_{n,1,m}$
	$O_{n,2}$	$p_{n,2,1}$	$p_{n,2,2}$	$p_{n,2,j}$	$p_{n,2,j+1}$	…	$p_{n,2,m-1}$	$p_{n,2,m}$
	…	… $p_{n,hn,1}$	… $p_{n,hn,2}$	…	…	…	…	…
	$O_{1,hn}$			$p_{n,hn,j}$	$p_{n,hn,j+1}$	…	$p_{n,hn,m-1}$	$p_{n,hn,m}$

Dependiendo de la naturaleza y del comportamiento tanto de las operaciones como de las máquinas el *FJSSP* presenta una serie de variantes, las cuales se analizan a continuación:

Máquinas en paralelo idénticas (P_m): Hay m máquinas idénticas en paralelo. Una operación de una pieza *j puede* ser procesada en cualquiera de las m máquinas existentes. Siguiendo la nomenclatura establecida por Graham y asumiendo que el objetivo perseguido es la minimización del camino máximo ($C_{máx}$), entonces esta variante puede ser descrita como $FJ_s, P_m // C_{máx}$. Muchos investigadores nombran esta variante de problema como Máquinas en Paralelo Multipropósitos (Parallel Multi-Purpose Machines: PMPM) o sencillamente como Máquinas en Paralelo (Parallel Machines: PM).

Máquinas en paralelo uniformes (Q_m): Hay m máquinas en paralelo que pueden ser similares en algunos aspectos, pero que difieren unas de otras a la hora de procesar las piezas, como puede ser el caso de las velocidades v_i de procesamiento. Esto significa que la pieza J_i puede tardarse un tiempo p_1 en la máquinas m_1; p_2 en m_2,…, p_n en m_n , siendo p_1, p_2 …, p_n distintos. La definición del problema según la nomenclatura de Graham: $FJ_s, Q_m//C_{máx}$

Máquinas en paralelo diferentes o no relacionadas (R_m): en este ambiente hay m máquinas diferentes en paralelo. La máquina *i* puede procesar la pieza *j* a una velocidad v_{ij}. Es una generalización del anterior. La definición de esta variante según la nomenclatura que se ha vendido usando sería: $FJ_s, R_m//C_{máx}$

En la presente investigación el modelo de optimización propuesto permite resolver instancias de tipo Flexible Flow Shop (*FFSS*) y Flexible Job Shop (*FJSS*), con ambos tipos de flexibilidad (parcial y total), en ambientes con máquinas en paralelo idénticas (P_m), máquinas en paralelo uniformes (Q_m) y máquinas en paralelo diferentes o no relacionadas (R_m), dependiendo en cada caso de la naturaleza de los datos de entrada. Además, incluye la posibilidad de contemplar los tiempos transporte, ajuste y configuración de las máquinas.

Hasta aquí el problema ha sido correctamente tratado por las investigaciones realizadas por (Márquez 2012) y (Herrera 2015) apoyándose en algoritmos genéticos para su resolución. Sin embargo la decisión de la asignación de máquinas a cada pieza no solo lleva implicado un costo de tiempo en función del procesamiento de una operación de una pieza en una máquina determinada; sino que también influyen los tiempos de: ajuste inicial para la máquina $M_{i,k}$ para la realización de la operación $O_{i,k}$ de una pieza J_n; reajuste de la máquina $M_{i,k}$ de acuerdo a la operación anteriormente procesada en esta máquina (ya sea de la misma pieza o de piezas diferentes); tiempo necesario para transportar la pieza J_n de una máquina $M_{i-1,k+n}$ a la máquina $M_{i,k}$ donde será procesada la operación $O_{i,k}$. Estos costos de tiempo influyen de forma significativa en el tiempo en que terminan las piezas C_j y por lo tanto en el $C_{máx}$.

Para el caso de las máquinas reconfigurables se propone la agrupación de las piezas en familias de piezas $g_i = \{1, 2, 3 \ldots n\}$ con $g_i \geq 1$ que pueden necesitar un mismo tipo de reajuste lo que disminuye los tiempos de ajustes y, consecuentemente el makespan; y se procesa la información como si fueran una misma pieza donde el tiempo de procesamiento es la suma de los tiempos individuales de las piezas que componen el grupo. Para el caso específico de talleres de mecanizado convencional las familias de piezas tendrían dimensión uno (grupos de piezas formadas de una sola pieza).

De acuerdo a la funcionalidad de la máquina, cada máquina es capaz de procesar un subconjunto *i* de operaciones O_i^k (que pueden ser o no de una misma pieza) dentro del conjunto total de operaciones a ser procesadas $O_T = \sum_{j=1}^{j} \sum_{i=1}^{n} O_{i,j}$ por lo que, para cada máquina hay un costo de tiempo relacionado con la decisión de procesar una operación antes que otra o procesarla de primera (Tabla 3), en consecuencia se determinan los siguientes términos.

r, ℓ : Definición de las operaciones a realizarse en un misma máquina k donde ℓ es la operación que precede a r en el orden de procesamiento para $O_i^k = \{1, 2, 3 \dots i\}$ $r \in O_i^k$ pudiendo ser $O_1^k, O_2^k, \dots O_i^k$ y $\ell \in g_i$ pudiendo ser $O_1^k, O_2^k, \dots O_i^k$ con $r \neq \ell$.

$S_{0,k,i}$: Ajuste inicial de la máquina *k* dependiendo de la operación O_i^k .

$S_{k,\ell \to r}$: Ajuste de la máquina *k* al pasar de la operación ℓ a la r.

Según la nomenclatura triparamétrica, en el campo γ el C_j de cada pieza está determinada por el tiempo de comienzo S_j y el tiempo de proceso P_j (ver figura 3) en la presente investigación se redefine el tiempo de comienzo de la pieza J_n como $\mathcal{B}_j$, o lo que es lo mismo, el tiempo de inicio de la última operación de la pieza *j*, $\mathcal{B}_{i,j}$, y el costo de procesar la operación O_i de la pieza J_n en la máquina *k*: $P_{i,j,k}$. Hasta ahora este costo se ha visto solo en función del tiempo de procesamiento necesario para ejecutar la operación *i*, de la pieza *j*, en la máquina *k*: $p_{i,j,k}$ Sin embargo puede ser reformulado como sigue:

$$P_{i,j,k} = \left(\delta_{k,i} * S_{0,k,i} + \delta_{k,\ell \to r} * \delta_k^s * S_{k,\ell \to r}\right) + p_{i,j,k} + \delta_k^t * t^j_{k(i-1) \to ki} \qquad (8)$$

Tabla 3 Estructura de relación de los ajustes de máquinas.

		M₁			
				...	
	O_1^1	//////	$S_{1,1\to 2}$	…	$S_{1,1\to i}$
	O_2^1	$S_{1,2\to 1}$	//////	…	$S_{1,2\to i}$
	...	…	…	…	…
	O_i^1	$S_{1,i\to 1}$	$S_{1,i\to 2}$	…	//////
Tabla 3 Estructura de relación de los ajustes de máquinas.					
		M₂			
$S_{0,2,i}$	$S_{2,\ell\to r}$	O_1^2	O_2^2	...	O_i^2
	O_1^2	//////	$S_{2,1\to 2}$	…	$S_{2,1\to i}$
	O_2^2	$S_{2,2\to 1}$	//////	…	$S_{2,2\to i}$
	...	…	…	…	…
	O_i^2	$S_{2,i\to 1}$	$S_{2,i\to 2}$	…	//////
		....			
		Mₖ₋₁			
				...	
	O_1^{k-1}	//////	$S_{k-1,1\to 2}$	…	$S_{k-1,1\to i}$
	O_2^{k-1}	$S_{k-1,2\to 1}$	//////	…	$S_{k-1,2\to i}$
	...	…	…	…	…

	O_i^{k-1}	$S_{k-1,i\to1}$	$S_{k-1,i\to2}$	…	///////
			Mk		
				…	
	O_1^k	///////	$S_{k,1\to2}$	…	$S_{k,1\to i}$
	O_2^k	$S_{k,2\to1}$	///////	…	$S_{k,2\to i}$
	…	…	…	…	…
	O_i^k	$S_{k,i\to1}$	$S_{k,i\to2}$	…	///////

Donde:

$S_{0,k,i}$: Ajuste inicial de la máquina *k* dependiendo de la operación O_i^k .

$S_{k,\ell\to r}$: Ajuste de la máquina *k* al pasar de la operación ℓ a la r.

$\delta_{k,i}$: variable auxiliar entera asociada al ajuste inicial de la máquina *k* dependiendo del grupo de piezas *i.*

$\delta_{i,j,k}^{s}$: variable auxiliar entera para determinar influencia del tiempo de reajuste en el costo de producir la operación *i* de la pieza *j* en la máquina *k.*

$\delta_{k,\ell\to r}$: variable auxiliar entera asociada al reajuste de la máquina *k* dependiendo del grupo de piezas *i.*

$p_{i,j,k}$: tiempo de procesamiento necesario para ejecutar la operación *i*, de la pieza *j*, en la máquina *k.*

$t_{k(i-1)\to ki}^{j}$: tiempo necesario para el transporte de la pieza *j* desde la máquina donde se realiza la operación precedente hacia la máquina a realizar la operación *i.*

$\delta_{i,j,k}^{t}$: variable auxiliar entera para determinar influencia del tiempo de transporte en el costo de producir la operación *i* de la pieza *j* en la máquina *k.*

El tiempo de transporte está determinado por las distancias entre las máquinas a procesar operaciones consecutivas $d_{k(i-1)\to ki}$ (Tabla 4) y la velocidad en la que se realice el transporte la cual es considerada como una velocidad constante y conocida $Vctte$ resultado del promedio de las velocidades en las que se realizan los transportes en el taller objeto de estudio. El tiempo de transporte se formula entonces como sigue:

$$t_{k(i-1)\to ki}^{j} = \frac{d_{k(i-1)\to ki}}{Vctte} \qquad (9)$$

Tabla 4 Relaciones de distancia entre las máquinas.

	M₁	***M₂***	***M₂***	***M₄***	**…**	***Mk***
M₁	*0*	$d_{1\to2}$	$d_{1\to3}$	$d_{1\to4}$	…	$d_{1\to k}$
M₂	$d_{1\to2}$	*0*	$d_{2\to3}$	$d_{2\to4}$	…	$d_{2\to k}$
M₂	$d_{1\to3}$	$d_{2\to3}$	*0*	$d_{3\to4}$	…	$d_{3\to k}$

M_4	$d_{1\to 4}$	$d_{2\to 4}$	$d_{3\to 4}$	0	...	$d_{4\to k}$
...	...	...	...	...	...	...
M_k	$d_{1\to k}$	$d_{2\to k}$	$d_{3\to k}$	$d_{4\to k}$	...	0

Además, se plantean las siguientes restricciones

$S_{0,k,i} \geq 0$ (10)

$S_{k,\ell\to r} \geq 0$ (11)

$\delta_{k,i}\begin{cases} = 1 \text{ Si la operación } i \text{ es la primera a ser procesada en la máquina } k \\ = 0 \text{ Si la máquina } k \text{ ya ha procesado otras operaciones} \end{cases}$ (12)

$\delta_{k,\ell\to r}\begin{cases} = 1 \text{ Si la operación } r \text{ no es la primera en la máquina } k \\ = 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$ (13)

$\delta_{k,i} + \delta_{k,\ell\to r} = 1$ (14)

$d_{k(i-1)\to ki} \geq 0$ (15)

$\mathcal{B}_{i,j} \geq (\delta_{k,i} * S_{0,k,i} + \delta_{k,\ell\to r} * S_{k,\ell\to r})$: Las máquinas solo pueden comenzar a procesar las operaciones después del ajuste correspondiente. (16)

$\delta^{s}_{i,j,k}\begin{cases} = 1 \text{ Si } S_{k,\ell\to r} \geq t^{j}_{k(i-1)\to ki} \; y \; el \; ajuste \; influye \; en \; el \; P_{i,j,k} \\ = 0 \text{ en caso contrario y el ajuste no influye en el } P_{i,j,k} \end{cases}$ (17)

$\delta^{t}_{i,j,k}\begin{cases} = 1 \text{ Si } t^{j}_{k(i-1)\to ki} > S_{k,\ell\to r} \; y \; el \; transporte \; influye \; en \; el \; P_{i,j,k} \\ = 0 \text{ en caso contrario } \; y \; el \; transporte \; no \; influye \; en \; el \; P_{i,j,k} \end{cases}$ (18)

$\delta^{s}_{i,j,k} + \delta^{t}_{i,j,k} = 1$ (19)

Uno de los criterios más recientes fue propuesto por Márquez Delgado (2012) en su tesis doctoral donde plantea como elemento a optimizar, para este tipo de problemas, el consumo de energía de las máquinas herramienta durante la ejecución de un plan de trabajo. De esta forma, desde la elaboración de este se conoce para cualquier momento de tiempo el consumo promedio de energía del taller dependiendo de la utilización de las máquinas.

La presente investigación incluye dentro del modelo un total de nueve objetivos, de los cuales, ocho han sido referidos por otros autores y uno es propuesta de la investigación. A continuación, se formulan los distintos criterios de optimización.

Criterios basados en los instantes de finalización.

- **Finalización de las piezas (makespan)**

Se trata del tiempo de finalización de la última tarea. Esta versión del problema es conocida en la literatura como $J||C_{max}$ y es sin dudas, la versión más tratada, por lo que existen numerosas referencias a propuestas que resuelven el problema con diferentes métodos, apoyados la mayoría en el camino crítico.

$C_{max} = max_{j\in\{1\ldots n\}} C_j$ (7)

- **Flujo total (flow time)**

El flujo total es la suma de los tiempos de finalización de todas las piezas. Cuando se considera esta función objetivo, el problema *JSS* se denota como $J||\sum C_i$. Aunque se trata de una versión muy parecida al clásico problema $J||C_{max}$, en realidad es más difícil de resolver. Probablemente esto sea debido a que, en general, una instancia del problema $J||\sum C_i$ tiene menos soluciones óptimas que la correspondiente instancia del problema $J||C_{max}$, por lo que para una metaheurística resulta más difícil de encontrar una de estas soluciones.

$$F_{max} = \sum j_{j \in \{1 \ldots n\}} F_j \qquad (20)$$

- **Ocio de las máquinas (<u>idle time</u>)**

El ocio total es la suma de los tiempos de inactividad, debido al ocio, de las máquinas que intervienen en la ejecución del plan de trabajo. Minimizar este objetivo equivale a un máximo aprovechamiento de las máquinas.

$$Idle = \sum_{j=1}^{m} I_j \qquad (21)$$

I_j: tiempo total de ocio de la máquina *j.*

m: número de máquinas.

Criterios basados en la fecha de entrega.

- **Retraso (<u>lateness</u>)**

Minimizar este objetivo es apropiado cuando existe una recompensa por entregar una pieza antes de tiempo. Una demora positiva indica la tardanza en la finalización de la pieza, mientras que, la conclusión de la pieza anticipadamente a su fecha de compromiso d_j se indica por una demora negativa o adelanto, cuyo valor absoluto es la cantidad de tiempo anticipada.

$$L_j = C_j - d_j \qquad (22)$$

- **Tardanza (<u>tardiness</u>)**

La minimización de este objetivo se hace importante cuando existe una penalización en caso de demora por terminar una pieza fuera de plazo. Mide la peor violación de los tiempos de entrega.

$$T_j = \max\{= C_j - d_j, 0\} \qquad (23)$$

Indica el retraso en la ejecución de la pieza J_j

- **Número de piezas adelantadas (<u>early jobs</u>)**

El número de piezas adelantados se desea maximizar con el propósito de cumplir con los compromisos pactados. Se hace útil, además, cuando se premia por la entrega de las piezas a tiempo.

$$NE_j = \sum_{j=1}^{n} F_j \qquad (24)$$

F_j: pieza *j* adelantada

n: número de piezas

- **Número de piezas retrasadas (<u>tardy jobs</u>)**

Se corresponde con la regla de decisión *EDD* (*Earliest Due Date*) al ordenar las piezas en función de la fecha de entrega o vencimiento d_j. Las piezas se procesan en orden creciente a esta fecha.

$$NU_j = \sum_{j=1}^{n} G_j \qquad (25)$$

G_j: pieza *j* retrasada

n: número de piezas

Criterio basado en el consumo de energía de las máquinas (Márquez Delgado, 2012).

La energía utilizada por un plan de trabajo (schedule) es la suma total de los valores de energía consumido por cada máquina durante el tiempo de proceso, es decir, desde el inicio de la primera operación hasta la finalización de la última, que coincide con el valor del camino máximo o makespan (C_{max}), por lo cual no se realizan mediciones fuera de este último valor.

$$E_c = \sum_{j=1}^{k} \sum_{j=1}^{m} \left(Pot_j * \frac{C_{max}}{k}\right)_j \qquad (26)$$

k: número total de mediciones del consumo de energía. ($k \geq 1$)

m: número total de máquinas

Pot_j: potencia nominal de la máquina *j*

E_c: energía consumida por el plan de trabajo

Criterio basado en el mínimo recorrido de las piezas.

En un taller las máquinas se encuentran en una posición fija, y las piezas son los que son trasladados de una máquina k a otra $k+n$+nara el procesamiento de sus operaciones. La distancia entre las máquinas $(M_k; M_{k+n}) \subseteq M$ es fija, conocida y recíproca. Debido a que las distancias entre dos máquinas es la misma ya sea de una a otra o viceversa, esta se denota como $d_{\mathfrak{f}}$, $d_{\mathfrak{f}} = \{d_{1...}d_{\mathfrak{f}}\}$ (Tabla 4) el número de distancias $\mathfrak{f} \neq M$ con $\mathfrak{f} \in \mathbb{N}$. De igual modo se determina como 0 la distancia de ella a ella misma, esta notación se tiene en cuenta debido a que las piezas pueden quedarse en la misma máquina para procesar la próxima operación de su secuencia, por lo que se puede plantear que:

$$d_{\mathfrak{f}} \geq 0 \qquad (27)$$

Debido a la recirculación de piezas cada pieza puede recorrer dichas distancias un número $\mathbb{K}$ de veces, ya sea desde $M_k \rightarrow M_{k+n}$o desde $M_{k+n} \rightarrow M_k$. La función objetivo para la minimización de los recorridos sería:

$$\min \sum_{\mathfrak{f}=0}^{\mathfrak{f}} (\mathbb{K}_{j,\mathfrak{f}} * d_{\mathfrak{f}}) \qquad (28)$$

donde:

$d_{\mathfrak{f}}$: Distancia en metro entre dos máquinas de un mismo taller

$\mathfrak{f}$: número de distancias diferentes

$$\mathfrak{f} = \sum_{i=0}^{k} (k-1) \qquad (29)$$

$\mathbb{K}_{j,\mathfrak{f}}$: número de veces que la pieza *j* recorre la distancia $d_{\mathfrak{f}}$

Relaciones entre los diferentes criterios de optimización.

Entre los diferentes criterios de optimización anteriores existen relaciones por las cuales unos son equivalentes a otros, es decir, que las secuencias óptimas son las mismas si se plantea un objetivo o se plantea otro equivalente. Estas equivalencias permiten reformular un problema pudiendo cambiar un objetivo por otro más sencillo o cuya formulación matemática tenga mejores propiedades a la hora de resolverlo.

Algunos ejemplos son los siguientes:

- Si los instantes de posible inicio (release date) son igual a 0 para todas las piezas, son equivalentes C_{max} y F_{max}.
- Si todas las piezas tienen una misma fecha de entrega son equivalentes C_{max} y L_{max}.
- Una programación (schedule) que es óptima según el criterio L_{max} también lo es para T_{max}, sin embargo, lo contrario no tiene por qué ser cierto. En cualquier caso, nos permite resolver el problema con el criterio L_{max}, cuya formulación y resolución son más sencillas que las del otro criterio.

Restricciones del modelo de optimización.

El modelo aquí propuesto obedece a una serie de restricciones que facilitan la modelación del problema al asumir ciertas condiciones que lo simplifican o que solidifican la representación de la realidad. Dichas restricciones son:

1. Es conocida e invariable la secuencia de operaciones de cada pieza (ruta tecnológica).
2. Cada pieza constituye una unidad, por lo que el tamaño de los lotes a producir es igual a uno (1).
3. La velocidad de desplazamiento de una pieza *j* de una máquina M_k hacia una máquina M_{k+n} es constante (*Vctte*).
4. Todas las máquinas se encuentran listas para procesar las piezas en $t = \mathcal{B}_{i,j}$ de la primera pieza a ser procesada.
5. Son conocidos y fijos todos los datos que intervienen en el proceso: número de piezas; número de máquinas; tiempos de procesamiento, lo que excluye los tiempos de procesamiento con duraciones imprecisas (fuzzy scheduling); tiempos de ajuste; distancia entre máquinas y velocidades de desplazamiento de transporte.
6. No se permite la interrupción de las piezas en las máquinas, es decir, una vez que se inicia una operación en una máquina esta debe ser completada antes de que dicha máquina pueda procesar otra operación.
7. Existe recirculación de las piezas en el sistema, es decir, una pieza puede visitar una máquina en más de una ocasión.
8. Todas las piezas tienen la misma prioridad dentro del sistema.
9. Se consideran los dos tipos de flexibilidad de las máquinas (parcial and total flexibility), dependiendo de la naturaleza de los datos.

CONCLUSIONES

1. A partir de la revisión y el análisis de la literatura consultada especializada en el tema objeto de estudio, es posible arribar a las siguientes conclusiones:
2. La existencia de una amplia gama de clasificación de los problemas de scheduling posibilita su identificación con diversos sectores de la producción y los servicios, entre los que se puede

citar los procesos de manufactura en los talleres de mecanizado con máquinas herramienta convencionales.

3. El desarrollo de modelos para la optimización de problemas de scheduling presenta carencias en lo relacionado al análisis de la existencia de máquinas herramienta reconfigurables, la inclusión de los tiempos de configuración y ajustes de dichas máquinas, así como los tiempos de transporte de las piezas entre las máquinas.
4. La utilización de los modelos matemáticos para representar la realidad de los sistemas de producción en ocasiones hace que estos de alejen de la misma, provocando el uso de datos e información poco fiables para la toma de decisiones, lo que puede traducirse en una planificación ineficiente de dichos sistemas productivos.

Referencias

Ávila Rondón. L. R, I. H. (2007.). Web of Science. Neuronal Network Modeling and Simulation of the Scheduling.

Brucker. P, J. y. (1994). In A Branch and bound algorithm for the job-shop scheduling problem (pp. pp. 107-127). Discrete Applied Mathematics.

Delso.R. (2013). «Optimización de las líneas de ensamblaje de las pedaleras B-58 y B-9 en Sofedit España S.A. mediante técnicas de Lean Manufacturing.,». Valladolid.

J, S. F. (2010). Solución al problema de secuenciación en máquinas paralelas utilizando Aprendizaje Reforzado. Villa Clara.

Leung.J. (2004.). Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Perfomance Analysis, Chapman & Hall/CCR Computer and Information Sciences Series .

R, D. R. (2002). Secuenciación de líneas de producción. Holguín.

R.C, H. M. (2015). Optimización de la programación en talleres de maquinado con máquinas herramienta en paralelo y recirculación de piezas. Holguín.

Y, M. J. (2012). A Generic Multi-Agent Reinforcement Learning Approach for Scheduling Problems.