

# Solución de un problema Job Shop con un agente inteligente<sup>1</sup>

Solução de um problema Job Shop com um agente inteligente

Job Shop problem solution with an intelligent agent

Omar Danilo Castrillón<sup>2</sup>, Jaime Alberto Giraldo<sup>3</sup> y  
William Ariel Sarache<sup>4</sup>

*Recepción: 29-mar-2009/Modificación: 20-jun-2009/Aceptación: 21-jun-2009*

*Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo*

---

## Resumen

En el presente trabajo se define una nueva y efectiva metodología, basada en agentes inteligentes, para la secuenciación de la producción en ambientes Job Shop; especialmente, para pequeñas y medianas empresas del sector metal-mecánico, donde estas técnicas no han sido muy empleadas; debido a la alta resistencia al cambio.

Este trabajo se desarrolla en dos fases. En la primera, se definen las diferentes técnicas utilizadas. En la segunda, se ejecutan las pruebas estadísticas con el fin de determinar el porcentaje de aproximación de estas soluciones a la

---

<sup>1</sup> Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación financiado por la vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, con el código 20101005012, titulado “Los sistemas expertos y los agentes inteligentes, en la reducción de los plazos de fabricación en ambientes Job Shop”.

<sup>2</sup> Doctor en Bioingeniería, odcastrillong@unal.edu.co, profesor asociado, Departamento de Ingeniería industrial, Universidad Nacional de Colombia, Manizales–Colombia.

<sup>3</sup> Doctor en Ingeniería, jaiagiraldog@unal.edu.co, profesor asociado, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Manizales–Colombia.

<sup>4</sup> Doctor en Ciencias técnicas, wasarachec@unal.edu.co, profesor asociado, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Manizales–Colombia.

solución óptima o subóptima. El resultado de este trabajo muestra que las técnicas basadas en agentes inteligentes, no siempre producen un resultado óptimo; pero en unos pocos segundos, estas técnicas pueden encontrar una solución subóptima con una aproximación del 97,81 % y 90,43 % a la solución óptima o subóptima, en las variables tiempo total de proceso y tiempo total muerto, respectivamente. Esto contrasta con la poca efectividad encontrada en las técnicas tradicionales.

**Palabras claves:** tiempo de proceso, tiempo muerto, agentes inteligentes, secuenciación de la producción, Job Shop, algoritmos evolutivos, optimización multiobjetivo.

## Resumo

Neste trabalho uma metodologia nova e eficaz é definida, baseada em agentes inteligentes, para a "sequência" da produção em ambientes Job Shop; especialmente, para companhias pequenas e médias do setor metalmeccânico, onde estas técnicas não foram usadas muito; devido à resistência elevada à mudança.

Este trabalho é desenvolvido em duas fases. Na primeira fase, as diferentes técnicas usadas são definidas. Na segunda fase, as provas estatísticas são executadas com a finalidade de determinar a porcentagem da aproximação destas soluções à solução ótima ou sub ótima.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que as técnicas baseadas em agentes inteligentes, não sempre produzem um resultado ótimo; porém em poucos segundos, estas técnicas podem achar uma solução ótima com aproximação de 97.81% e 90.43% à solução ótima ou sub ótima, sob as variáveis tempo total do processo e tempo total morto, respetivamente. Em contraste com a pouca efectividade achada nas tecnicas tradicionais.

**Palavras chaves:** tempo de processo, tempo morto, agentes inteligentes, sequência da produção, job shop, algoritmos evolução, optimização multiobjetivo.

## Abstract

In this paper, is defines a new and effective methodology based on intelligent agents for production sequencing Job Shop Environments; especially for small and medium enterprises in the metal mechanics sector, where these techniques have not been employed , due to the high resistance to change.

This work is developed in two phases. In the first one, the different techniques used are defined. In the second step, statistical tests are executed in order to determine the approximation percentage solutions' to the optimal or sub optimal solution.

This work's results show that the intelligent agents techniques don't produce an optimal result every single time; but in few seconds, these techniques, can

find sub optimal solutions with an approximation of 97.81% and 90.43%, to the optimal or sub optimal solution, in the variables total time process and total idle time, respectively. This contrasts with the little effectiveness of traditional techniques.

**Key words:** makespan time, Idle time, intelligent agents, production sequencing, Job Shop, evolutionary algorithms, multiobjective optimization.

---

## 1 Introducción

Desde la aparición de las industrias manufactureras y su continuo crecimiento, se ha incursionado en el estudio y mejoramiento de la programación de la producción. En general, algunos autores [1] establecen básicamente tres tipos de sistemas de producción:

- a) Configuración por proyectos.
- b) Configuración continúa.
- c) Configuración por lotes, la cual comprende las configuraciones flow shop y Job Shop; donde esta última se divide en configuración en batch y configuración a la medida o de talleres; siendo esta configuración (talleres) el objeto de análisis de este artículo.

En la anterior clase de sistemas (configuración a la medida o talleres) la diversidad de variables que se deben tener en cuenta en este campo elevan el problema a la categoría NP-Hard [2]; los cuales son problemas que no tienen una única solución o su solución es muy complicada. En estos problemas de secuenciación bajo ambientes Job Shop con  $N$  trabajos y  $M$  máquinas, el número total de posibles soluciones es  $(N!)^M$ , si se tienen en cuenta todas las posibles alternativas, incluso las soluciones no realizables, por limitaciones físicas [3]. Por ende, actualmente se desarrollan diferentes técnicas de investigación en todo el mundo, dado que este problema ha capturado la atención de muchas instituciones pioneras en nuevos enfoques para encontrar mejores soluciones.

Para solucionar este tipo de problemas, de optimización combinatoria, básicamente se emplean tres clases de técnicas:

- a) **Reglas de prioridad** [1].
- b) **Algoritmos analíticos**. Si bien, teóricamente pueden garantizar la obtención de soluciones óptimas, en su gran mayoría, estas técnicas son estáticas y presentan problemas cuando el número de pedidos  $N$  y máquinas  $M$ , aumenta considerablemente. Pudiéndose afirmar que no existe técnica de solución exacta por su alta complejidad matemática, especialmente cuando el problema se sale de las pocas distribuciones conocidas [1].
- c) **Algoritmos evolutivos**. Estos algoritmos no siempre garantizan una solución óptima, pero por medio de conceptos derivados de la inteligencia artificial, evolución biológica y mecanismos estadísticos, logran soluciones satisfactorias en tan sólo unos pocos segundos, dado que son algoritmos especialmente adaptados para la optimización [4].

En la categoría de algoritmos evolutivos se podrían citar los agentes inteligentes, los cuales pueden ser definidos como un sistema (hardware o software) situado en un determinado entorno, capaz de actuar de forma autónoma y razonada para llevar a cabo unos objetivos predeterminados [5, 6]. Como lo expresan algunos autores, pueden constituir el próximo avance en el desarrollo de los sistemas y ser considerados como la nueva revolución en el software [7]. De una manera más concisa, pueden ser definidos como programas de ordenador capaces de efectuar una tarea o actividad sin la manipulación directa de un humano. Así, los agentes inteligentes han cambiado sustancialmente la forma de interacción hombre-máquina [8]. El diseño de la estructura de un agente debe ser conforme a tres principios básicos: modularidad, generalización, escalabilidad [9] y seis propiedades fundamentales: autonomía, inteligencia, reactivo proactivo, sociabilidad, cooperación y movilidad [5].

En este sentido, cobran gran importancia los sistemas multiagentes, los cuales son una tecnología que permite el funcionamiento de varias de las anteriores técnicas simultáneamente, considerándose así cada agente como una entidad con objetivos específicos [10], como se estudia en López [11], donde se descompone el proceso de decisión de un experto humano en distintas fases; en cada una de las cuales se aplican coordinadamente diferentes formas de inteligencia emulada, siendo el principal beneficio obtenido por esta herramienta, el de lograr una visión global del problema [10], dependiendo

del alcance de los diferentes agentes utilizados en este proceso, los cuales se activan automáticamente.

Aunque actualmente se han desarrollado una gran variedad de aplicaciones para el manejo de los agentes inteligentes como: Shamash [12], AMCC agent-based manufacturing control and coordination [13], Lega [14], Callisto [15], MES, ERP [16], sistemas multiagentes basados en colonia de hormigas y búsqueda tabú [17, 18, 19, 20], algoritmos híbridos [21], enfoque evolutivo multiagentes (los cuales parten de una solución inicial para ser mejorada) [22], planeación y control de la producción [23], manufactura distribuida [24], control de manufactura [25], programación de manufactura dinámica [26], manufactura distribuida y flexible [27, 28], optimización de logística y producción [29], Secuenciación de Problemas Job Shop (JSSP) [30, 31, 32]; su aplicación en los sistemas de producción bajo ambientes Job Shop no ha sido muy difundida.

Adicionalmente, al campo de la producción, los anteriores métodos también han sido extendidos a otras ramas como la educación [33], donde por medio del diseño de software, ha sido posible aprender a interactuar con temas específicos como filosofía, mejora continua, retroalimentación, etcétera [34]. Resaltándose que los nuevos métodos de enseñanza basados en agentes, se han convertido en una herramienta clave en áreas como: enseñanza [35], robótica [36], cadenas de proveedores [37], planeación y protocolos de negociación [38], optimización del flujo de tráfico [39], problemas financieros [40], predicción de eventos [41], selección óptima de pedidos [42], y en general toda clase de problemas NP completos [43, 44, 45, 46].

Es importante resaltar que sin la asistencia de un computador y sus herramientas no es posible hablar de agentes inteligentes, lo cual contrasta con la gran resistencia al cambio especialmente en la pequeña y mediana industria, donde su cultura informática es muy baja y las empresas consideran que no es necesario modificar su forma de programar la producción [47]. Siendo así, el objetivo fundamental de este trabajo es mostrar la efectividad de las técnicas basadas en inteligencia artificial (agentes inteligentes) en la secuenciación de la producción, bajo ambientes Job Shop, en pequeñas y medianas empresas (PYMES) metalmecánicas. Campo en el cual, estas técnicas no han sido muy empleadas.

Igualmente, es importante resaltar que por medio de las técnicas basadas en inteligencia artificial (agentes inteligentes) [48, 49] se ha encontrado una efectividad cercana al 98 %, medida en la variable tiempo total de proceso, lo cual contrasta con la poca efectividad [1] encontrada en las técnicas tradicionales de programación de la producción. Todas las anteriores razones justifican el empleo de estas técnicas en el desarrollo de esta investigación.

Así mismo, se espera que este artículo motive el uso de las técnicas de inteligencia artificial en las pequeñas y medianas empresas; especialmente en países poco desarrollados, donde los sistemas de producción presentan un gran número de operaciones manuales, impidiéndoles alcanzar altos niveles competitivos con estándares mundiales [50].

Finalmente, se resalta que la extensa revisión literaria desarrollada en esta sección muestra que, si bien, la inteligencia artificial ha sido ampliamente usada en los campos de la producción, su aplicación por medio de agentes inteligentes en la solución de problemas de secuenciación de la producción, en ambientes Job Shop, no ha sido muy empleada (23,5 % de las referencias). Esto último confirma la novedad de la metodología propuesta en la siguiente sección.

## 2 Metodología

Si bien en la solución de problemas de programación de la producción en ambientes Job Shop, se han propuesto diferentes metodologías relacionadas con la inteligencia artificial, en esta sección se propone una nueva metodología basada en agentes inteligentes, con el fin de mejorar la solución de esta clase de problemas.

**Paso 1:** tomando como referencia algunos escritos [51], el problema Job Shop  $N \times M$ , puede ser representado por medio de una estructura: máquina, tiempo de proceso, como la ilustrada en la tabla 1. Cada columna representa los tiempos de proceso de un pedido  $N$ , en los diferentes centros de trabajo (CT). Cuando un pedido no requiere procesamiento de una máquina, en la respectiva casilla del CT, se coloca un valor igual a infinito, en cualquier otro caso su valor es  $P_{m,n}$ . El orden en que cada uno de los diferentes pedidos es atendido por cada uno de los diferentes centros de trabajo, es descrito en el paso 3.

**Tabla 1:** representación de un problema JSS  $N \times M$

Centro T	Tiempo de procesos de los pedidos							
	1	2	3	4	5	6	...	N
1	$Tp_{11}$	$Tp_{12}$	$Tp_{13}$	...	...	...	...	$Tp_{1N}$
2	$Tp_{21}$	$Tp_{22}$	<b>Inf</b>	...	...	...	...	$Tp_{2N}$
3	<b>Inf</b>	$Tp_{32}$	$Tp_{33}$	...	...	...	...	<b>Inf</b>
...	...	<b>Inf</b>	...	...	$P_{m,n}$	...	...	
$M^*C$	$Tp_{MC1}$	$Tp_{MC2}$	$Tp_{MC3}$	...	...	...	...	$Tp_{MCN}$

**Paso 2:** la secuenciación de los procesos es codificada dentro de una matriz de  $(M^*C)^*N$  casillas, donde el valor de cada columna de la matriz  $V_{m,n}$ , corresponde al orden en que un centro de trabajo  $C$  debe atender un pedido  $N$ , es decir, la ruta de un pedido. Así mismo, la variable  $M$  denota las máquinas del centro de trabajo que pueden atender este pedido, ver tabla 2.

**Tabla 2:** rutas de los pedidos

Centro T	Pedidos							
	1	2	3	4	5	6	...	N
$C_1M_1$	2	1	...	...	...	...	...	$M^*C$
$C_1M_2$	2	1	...	...	...	...	...	$M^*C$
...								
$C_2M_2$	1	$M$	...	...	$V_{m,n}$	...	...	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$C_cM_m$	$M$	5	...	...	...	...	...	1

Por ejemplo, en la tabla 2, el pedido 1 debe ser atendido por alguna de las máquinas de los diferentes centros de trabajo en el siguiente orden  $C_2, C_1 \dots C_c$ . En este caso se supone que en cada centro de trabajo pueden existir hasta  $M$  diferentes máquinas, con diferentes tiempos de proceso, que pueden atender el pedido.

**Paso 3:** se diseña un agente inteligente el cual, basado en el principio de autonomía, codifique varias soluciones válidas (mínimo 10) representadas por medio de genes, donde cada gen contiene el orden en que un pedido será atendido por cada una de las diferentes máquinas, ver tabla 3. Con base en las funciones descritas en el paso 4, el agente deberá evaluar la efectividad de

la solución encontrada y tomar las acciones genéticas necesarias (combinación genética 99 % y/o mutación genética 1 %) para optimizar o suboptimizar la solución del problema deseado.

**Tabla 3:** posible solución del problema. Representación de un gen

1	2	3	4	5	6	...	$N$
$2^*$		...	...	...	...	...	$M^*C$
	1	...	...	...	...	...	
	$M$	...	...	...	...	...	3
$1^*$		...	...		...	...	
...	...	...	...	...	...	...	...
$M$		...	...	...	...	...	1

\* Máquinas CT

**Paso 4:** para cada una de las soluciones encontradas en el paso anterior, se debe definir un diagrama de Gantt, el cual establezca el orden de los procesos en el tiempo, en cada una de las diferentes máquinas. Establecido el diagrama de Gantt, se procede a evaluar cada una de las diferentes soluciones, con el fin de calcular los tiempos totales de proceso (Makespan) y los tiempos totales de ocio (Idle), bajo las funciones de cálculo (Fitness):

$$\text{Fitness}_{\text{makespan}} = \min(\max_{1 \leq i \leq N}(\max_{1 \leq j \leq M}(P_{ij}))) \text{ y} \tag{1}$$

$$\text{Fitness}_{\text{idle}} = \min \sum_{j=1}^m f_j. \tag{2}$$

El objetivo fundamental es minimizar las dos funciones Fitness. La ecuación (1) representa el objetivo primario y (2) el objetivo secundario. Donde  $N$  representa el número de trabajos,  $M$  representa el número de máquinas,  $P_{ij}$  es el tiempo de procesamiento del trabajo  $i$  en la máquina  $j$ , y  $f_j$  es el tiempo de ocio de la máquina  $j$ .

**Nota:** si bien, en la programación multiobjetivo existen varios métodos, como las funciones agregadas (método ponderaciones), inicialmente, en esta investigación sólo se considera una función primaria y otra secundaria. Sin embargo, en las próximas investigaciones también se debe asociar una función de costo, lo cual hará necesario tratar todas las funciones como agregadas.



**Paso 5:** con el fin de analizar la aproximación de las soluciones respecto a la solución óptima o subóptima, se calcula, mediante un algoritmo recursivo de backtraking y poda, las posibles formas de secuenciar los  $N$  pedidos en cada uno de los diferentes centros de trabajo (en los problemas donde computacionalmente es posible). Para cada una de estas soluciones se establece, mediante un diagrama de Gantt, su respectivo tiempo total de proceso y tiempo total muerto. El anterior proceso permitirá obtener un promedio de las mejores soluciones que servirán de referencia en este análisis.

**Nota:** cuando computacionalmente es factible, se establece la solución óptima por medio un algoritmo recursivo, el cual prueba todas las posibilidades (aunque su ejecución tarde días) en los casos en los cuales computacionalmente no es factible, el algoritmo recursivo sólo podrá calcular un subóptimo, mediante un proceso de backtraking y poda, el cual sólo analizará una parte de las ramas del árbol de posibilidades. Es de resaltar que este paso sólo se realiza una vez con el fin de establecer la efectividad de la metodología; en la práctica, una vez demostrada esta efectividad, este paso no es necesario.

**Paso 6:** con base en el promedio de las mejores soluciones obtenidas en el paso 4, se establece el porcentaje de aproximación de cada una de las posibles soluciones encontradas, respecto a la estimación de la mejor solución posible. Lo anterior permite establecer la efectividad de la metodología propuesta.

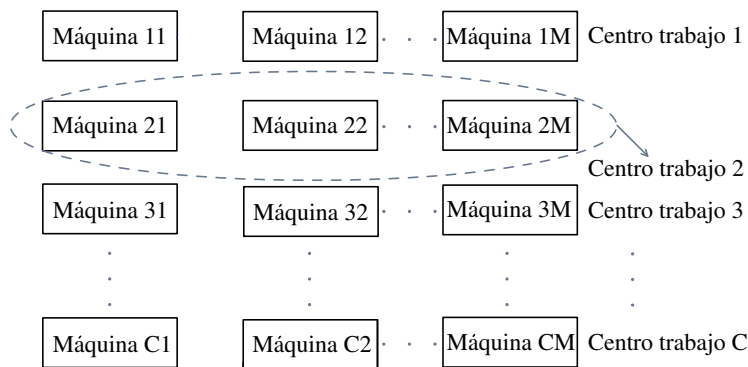
**Paso 7:** con el propósito de garantizar la consistencia de la metodología es necesario repetir la misma, durante un determinado número de veces (tratamientos). En cada uno de los tratamientos, los 10 mejores resultados, respecto a las funciones Fitness son tomados como referencia. Con el fin de determinar si los resultados corresponden estadísticamente a tratamientos iguales o diferentes, un análisis de varianza bajo el modelo

$$y_i = \mu + T_i + \varepsilon_i$$

es realizado, donde  $y_i$  representa las variables de respuesta,  $T_i$  los efectos causados por el tratamiento  $i^{th}$ , y  $\varepsilon_i$  es el  $i^{th}$  error experimental. En este punto es importante verificar que la información recolectada cumpla con las condiciones necesarias de independencia y normalidad, que permitan aplicar los test requeridos.

### 3 Experimentación

En la experimentación de esta metodología se toma como referencia una empresa del sector metalmeccánico, en su producto fundamental denominado “Barras”. Aunque en el problema original, el producto debe pasar por cinco centros de trabajo sin importar el orden; la experimentación se realizó con base en un problema de carácter general, con  $C$  centros de trabajos y con  $M$  diferentes máquinas en cada centro, que pueden atender el producto en proceso, figura 1.



**Figura 1:** problema objeto de análisis

Sin embargo, considerando el altísimo número de posibilidades computacionales para calcular una solución óptima o subóptima, los resultados serán analizados bajo un problema con 16 Pedidos (ver tabla 5) con  $9,9771 * 10^{71}$  posibilidades, un problema no factible de calcular computacionalmente; con la siguiente distribución de máquinas por centros de trabajo, ver tabla 4.

**Tabla 4:** máquinas por centros de trabajo

Centro de trabajo	Nº de máquinas
1	2
2	3
3	2
4	1
5	1

Igualmente, la tabla 5 ilustra los tiempos de procesos de los 16 pedidos en cada una de las diferentes máquinas.

**Tabla 5:** tiempos de proceso de los diferentes pedidos en cada una de las máquinas

Centros		Pedidos															
CT	Máquinas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
1	2	3	3	5	4	5	5	7	3	9	3	3	5	4	3	3	4
1		3	7	3	4	5	7	4	7	8	4	4	3	3	4	5	6
2	3	5	8	4	5	5	6	3	3	7	3	3	4	4	4	6	5
2		3	6	4	3	5	5	5	8	3	8	4	6	5	3	6	7
2		8	5	3	6	5	4	6	7	4	6	5	5	3	4	5	6
3	2	3	7	5	4	5	3	7	6	5	4	4	4	6	5	4	6
3		5	8	4	7	5	7	8	4	6	4	6	3	3	6	5	5
4	1	3	6	5	4	5	6	3	3	4	7	4	4	4	5	6	7
5	1	8	5	3	5	5	3	4	5	4	8	5	3	3	4	5	6

## 4 Resultados

**Paso 1-6:** aunque las mejores soluciones encontradas son buenas (ver tabla 6), las mismas distan ligeramente en la variable tiempo total muerto (Idle), de la solución óptima (ver figura 2).

**Tabla 6:** análisis de varianza de las diferentes réplicas, en los diferentes tratamientos

T Makespan	Repeticiones										Sum	Fuente varia	GL	SC	CM	Fcal	F tabla	
JSSP 3 × 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Sum C Total		8,30				
Trata 1	77	78	78	78	78	78	78	77	78	78	778	Tratamiento	2,00	0,20	0,10	0,33	3,35	
Trata 2	77	78	78	77	78	78	78	78	76	776	Error Exper	27,00	8,10	0,30				
Trata 3	78	78	78	78	77	78	78	77	78	777	Total	29,00	8,30	0,40				
El modelo no es significativo																		

T Idle	Repeticiones										Sum	Fuente varia	GL	SC	CM	Fcal	F tabla	
JSSP 3 × 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Sum C Total		1258,97				
Trata 1	300	312	311	297	307	308	308	311	292	311	3057	Tratam	2,00	76,07	38,03	0,87	3,35	
Trata 2	318	312	311	306	303	297	304	311	318	296	3076	Error Exper	27,00	1182,90	43,81			
Trata 3	319	303	307	310	305	308	314	313	311	306	3096	Total	29,00	1258,97	81,84			
El modelo no es significativo																		

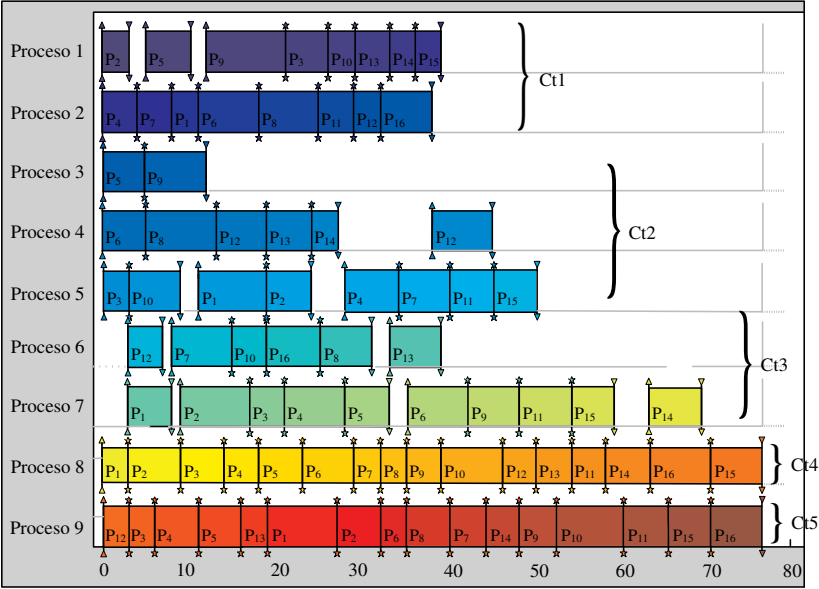


Figura 2: solución óptima. Makespan = 76. Tiempo Idle = 277

**Nota:** dado que en los centros de trabajo CT4 y CT5 no existen tiempos muertos, se puede afirmar que con respecto a la variable Tiempo total de proceso (Makespan) la solución encontrada es la mejor.

**Paso 7-8:** dado que el programa no siempre genera la solución óptima, es necesario establecer la efectividad de las soluciones encontradas, respecto a la mejor solución. Para lo anterior se ilustran las mejores soluciones encontradas, al ejecutar el algoritmo propuesto, durante tres tratamientos de 10 réplicas consecutivas, las cuales son representativas.

Los análisis de varianza ilustrados en esta sección (tabla 6), muestran que el valor de las dos distribuciones  $F$ , calculadas en  $(0,05; 2; 27)$ , es menor que el valor de las mismas distribuciones  $F$  reales; en consecuencia se puede afirmar que los resultados obtenidos son estadísticamente iguales, con una confiabilidad de 99,5%. La estabilidad de las soluciones encontradas, permite establecer una aproximación promedio de las soluciones encontradas, respecto a la mejor solución. Esta aproximación promedio fue del 97,81% y 90,43%, medida en las variables tiempo total de proceso y tiempo total muerto.

Lo anterior comprueba la efectividad de los agentes inteligentes y la consistencia de sus soluciones, en los procesos de secuenciación de la producción, estableciendo así un referente; el cual, como se expresó al inicio de este artículo, permite motivar el uso de las técnicas de inteligencia artificial en las empresas; especialmente en países poco desarrollados, donde los sistemas de producción presentan un gran número de operaciones manuales, impidiéndoles alcanzar altos niveles competitivos con estándares mundiales.

## 5 Conclusiones

Como se deduce del análisis de varianza, las diferentes soluciones encontradas por medio de estas técnicas de inteligencia artificial, muestran que, respecto a la variable tiempo total de proceso (*Makespan*) y tiempo total muerto (*Idle*), no existen diferencias significativas entre los resultados encontrados, en las diferentes réplicas del algoritmo, basado en un agente inteligente. Así, en promedio esta nueva técnica ilustrada permite encontrar soluciones, con una aproximación, respecto a la solución óptima, del 97,81 % y 90,43 % respectivamente, medida en las variables objeto de estudio; lo cual, como se ilustró en la introducción de este artículo, contrasta con la poca efectividad [1] encontrada en las técnicas tradicionales de programación de la producción. Aspecto que permite mejorar considerablemente el desempeño de un sistema de producción.

Así mismo, como lo muestra la amplia revisión literaria realizada, no existe una técnica, tan efectiva, de secuenciación de la producción en ambientes Job Shop, la cual esté basada en agentes inteligentes y sea aplicada en las pequeñas y medianas empresas del sector metalmeccánico, especialmente en países en vía de desarrollo.

Finalmente es importante resaltar que una vez se ha alcanzado el valor óptimo respecto a la variable tiempo total de proceso (objetivo primario); el tiempo total muerto sólo puede ser reducido, por un mayor empleo de los centros de trabajo con diferentes máquinas, que puedan realizar la misma operación sobre un pedido. Por lo cual, es necesario asociarle una función de costo al uso de cada máquina, con el fin de optimizar las dos variables objeto de estudio, respecto a esta función. El análisis de estas funciones, por medio de programación multiobjetivo, será objeto de futuras líneas de investigación.

## Referencias

- [1] José A. Domínguez, Antonio Álvarez Gil, Miguel Ángel Domínguez Machuca y Santiago García González. *Dirección de operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, ISBN 978-84-481-1848-8. Mac Graw Hill, Madrid, 1995. Referenciado en 77, 78, 80, 87
- [2] M. R. Garey, D. S. Johnson and R. Sethi. *The complexity of flowshop and job-shop scheduling*. Mathematics of operations research, ISSN 0364-765X, **1**(2), 117-129 (1976). Referenciado en 77
- [3] Jin hui Yang, Liang Sun, Heow Pueh Lee, Yun Qian and Yan-chun Liang. *Clonal selection based memetic algorithm for job-shop scheduling problems*. Journal of bionic engineering, ISSN 1672-6529, **5**(2), 111-119 (2008). Referenciado en 77
- [4] M. Elena Pérez y Francisco Herrera. *Algoritmos genéticos multimodales: un estudio sobre la parametrización del método clearing aplicado al problema "Job Shop"*. <http://sci2s.ugr.es/publications/ficheros/0679.pdf>, julio 2009. Referenciado en 78
- [5] Ángel A. Castillo. *Agentes inteligentes*. <http://www.sia.eui.upm.es/grupos/IntroAI.pdf>, julio 2009. Referenciado en 78
- [6] Pablo L. Navarra y José A. Martínez. *Agentes inteligentes en la búsqueda y recuperación de información*, ISBN 84-9707-571-4. Editorial planeta, Barcelona, 2004. Referenciado en 78
- [7] V. Julián y V. Botti. *Agentes inteligentes: el siguiente paso en la inteligencia artificial*. Novatica, ISSN 0211-2124, **1**(145), 95-99 (2000). Referenciado en 78
- [8] Li-Ning Xing, Ying-Wu Chen and Ke-Wei Yang. *Multi-objective flexible Job Shop schedule: design and evaluation by simulation modeling*. Applied soft computing, ISSN 1568-4946, **9**(1), 362-376 (2009). Referenciado en 78
- [9] Shi-jin Wang, Li-feng Xi and Bing-hai Zhou. *FBS-enhanced agent-based dynamic scheduling in FMS*. Engineering applications of artificial intelligence, ISSN 0952-1976, **21**(4), 644-657 (2008). Referenciado en 78
- [10] Alain Cardon, Thierry Galinho and Jean-Philippe Vacher. *Genetic algorithms using multi-objectives in a multi-agent*. Robotics and autonomous systems, ISSN 0921-8890, **33**, 179-190 (2000). Referenciado en 78
- [11] Omar López-Ortega and Israel Villar-Medina. *A multi-agent system to construct production orders by employing an expert system and a neural network*. Expert Systems with Applications: An International Journal, ISSN 0957-4174, **36**(2), 2937-2946 (2009). Referenciado en 78

- [12] María Dolores R.–Moreno, Daniel Borrigo, Amedeo Cesta and Angelo Oddi. *Integrating planning and scheduling in workflow domains*. Expert Systems with Applications: An International Journal, ISSN 0957–4174, **33**(2), 389–406 (2007). Referenciado en 79
- [13] Ruey–Shun Chen and Mengru Tu. *Development of an agent–based system for manufacturing control and coordination with ontology and RFID technology*. Expert Systems with Applications: An International Journal, ISSN 0957–4174, **36**(4), 7581–7593 (2009). Referenciado en 79
- [14] Nhu Binh Ho, Joc Cing Tay and Lai Edmund M.–K. *An effective architecture for learning and evolving flexible job–shop schedules*. European journal of operational research, ISSN 0377–2217, **179**(2), 316–333 (2007). Referenciado en 79
- [15] Arvind Sathi, Thomas Morton and Steven Roth. *Callisto: an intelligent project management system*. AI magazine, ISSN 0738–4602, **7**(5), 34–52 (1986). Referenciado en 79
- [16] Amy Trappey, Tung–Hung Lu and Li–DienFu. *Development of an intelligent agent system for collaborative mold production with RFID technology*. Robotics and computer–integrated manufacturing, ISSN 0736–5845, **25**(1), 42–56 (2009). Referenciado en 79
- [17] Kuo–Ling Huang and Ching–Jong Liao. *Ant colony optimization combined with taboo search for the Job Shop scheduling problem*. Computers & operations research, ISSN 0305–0548, **35**(4), 1030–1046 (2008). Referenciado en 79
- [18] Andrea Rossi and Elena Boschi. *A hybrid heuristic to solve the parallel machines job–shop scheduling problem*. Advances in Engineering Software, ISSN 0965–9978, **40**(2), 118–127 (2009). Referenciado en 79
- [19] Óscar Buitrago–Suescún, Rodrigo Britto–Agudelo y Gonzalo Mejía–Delgadillo. *Análisis comparativo de colonia de hormigas vs. un enfoque combinado cuello de botella móvil/búsqueda tabú en la minimización de la tardanza ponderada total en sistemas de manufactura tipo taller*. [http://caribdis.unab.edu.co/pls/portal/docs/PAGE/REVISTACOLOMBIANA\\_COMPUTO/RCC\\_ESPANOL/NUMEROSANTERIORES/JUNIO2007/R81\\_AR\\_T2\\_C.PDF](http://caribdis.unab.edu.co/pls/portal/docs/PAGE/REVISTACOLOMBIANA_COMPUTO/RCC_ESPANOL/NUMEROSANTERIORES/JUNIO2007/R81_AR_T2_C.PDF), julio 2009. Referenciado en 79
- [20] W. Xiang and H. P. Lee. *Ant colony intelligence in multi–agent dynamic manufacturing scheduling*. Engineering applications of artificial intelligence, ISSN 0952–1976, **21**(1), 73–85 (2008). Referenciado en 79

- [21] Hong Zhou, Cheung Waiman and Leung Lawrence. *Minimizing weighted tardiness of job-shop scheduling using a hybrid genetic algorithm*. European journal of operational research, ISSN 0377-2217, **194**(3), 637-649 (2009). Referenciado en 79
- [22] N. Liu, M. A. Abdelrahman and S. Ramaswamy. *Robust and adaptable Job Shop scheduling using multiple agents*, ISBN 0-7803-8808-9. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory, 2005. SSST '05, 45-49 (2005). Referenciado en 79
- [23] H. K. Tönshoff, O. Herzog and I. J. Timm. *Integrated process planning and production control based on the application of intelligent agents*. <http://en.scientificcommons.org/42323286>, january 2009. Referenciado en 79
- [24] Weiming Shen. *Distributed manufacturing scheduling using intelligent agents*. IEEE Intelligent Systems, ISSN 1541-1672, **17**(1), 88-94 (2002). Referenciado en 79
- [25] M. K. Lim and D. Z. Zhang. *An integrated agent-based approach for responsive control of manufacturing resources*. Computers & Industrial Engineering, ISSN 0360-8352, **46**(2), 221-232 (2004). Referenciado en 79
- [26] Weiming Shen and Douglas H. Norrie. *An Agent-Based approach for dynamic manufacturing scheduling*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.40.2734>, january 2009. Referenciado en 79
- [27] Ludovica Adacher, Alessandro Agnetis and Carlo Meloni. *Autonomous agents architectures and algorithms in flexible manufacturing systems*. IIE Transactions, ISSN 0740-817X, **32**(10), 941-951 (2000). Referenciado en 79
- [28] Weiming Shen, Lihui Wang and QiHao. *Agent-Based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey*. IEEE transactions on systems, man and cybernetics. Part C, Applications and reviews, ISSN 1094-6977, **36**(4), 563-577 (2006). Referenciado en 79
- [29] Anthony Karageorgos, Nikolay Mehandjiev, Alexander Hämmerle and Georg Weichhart. *Agent-based optimization of logistics and production planning*. [http://users.teilar.gr/~karageorgos/publications/IMS\\_2003\\_v\\_6.0\\_Karageorgos\\_et\\_al\\_camera\\_ready.pdf](http://users.teilar.gr/~karageorgos/publications/IMS_2003_v_6.0_Karageorgos_et_al_camera_ready.pdf), julio 2009. Referenciado en 79
- [30] M. Emin Aydin and Terence C. Fogarty. *A simulated annealing algorithm for multi-agent systems: a job-shop scheduling application: applied intelligent heuristics for responsive manufacturing*. Journal of intelligent manufacturing, ISSN 0956-5515, **15**(6), 805-814 (2004). Referenciado en 79



- [31] Emmy M. Ayden and Terence C. Fagorty. *Teams of autonomous agents for job-shop scheduling problems: an experimental study: intelligent manufacturing systems: vision for the future*. Journal of intelligent manufacturing, ISSN 0956-5515, **15**(4), 455-462 (2004). Referenciado en 79
- [32] Zhanjie Wang and Yanbo Liu. *A Multi-Agent agile scheduling system for job-shop problem*, ISBN 0-7695-2528-8. Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, Jinan, 679-683 (2006). Referenciado en 79
- [33] Gonzalo Villarreal. *Agentes inteligentes en educación*. Edutec-E, Revista electrónica de tecnología educativa, ISSN 1135-9250, **16**, 1-5 (2003). Referenciado en 79
- [34] John Wang, Ruiliang Yan, Kimberly Hollister and Dan Zhu. *A historic review of management science research in China*. Omega, ISSN 0305-0483, **36**(6), 919-932 (2008). Referenciado en 79
- [35] C. Romero, P. González, S. Ventura, M. J. del Jesús and F. Herrera. *Evolutionary algorithms for subgroup discovery in e-learning: a practical application using moodle data*. Expert systems with applications, ISSN 0957-4174, **36**(2), 1632-1644 (2009). Referenciado en 79
- [36] Maria J. Lamarca. *Robots y agentes*. [http://www.hipertexto.info/documentos/robot\\_agent.htm](http://www.hipertexto.info/documentos/robot_agent.htm), julio 2009. Referenciado en 79
- [37] J. Sauer and H. J. Appelpath. *Scheduling the supply chain by teams of agent*. <http://www2.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/HICSS.2003.1174200>, ISBN 0-7695-1874-5, julio 2009. Referenciado en 79
- [38] Isabel C. Zattar, Joao C. E. Ferreira, Joao G. Rodríguez and Carlos Humberto B. De Sousa. *Integration between process planning and scheduling using feature-based time-extended negotiation protocols in a multiagent system*. International journal of services operations and informatics, ISSN 1741-5403, **3**(1), 71-89 (2008). Referenciado en 79
- [39] Jeremy Blum and Azim Eskandarian. *Enhancing intelligent agent collaboration for flow optimization of railroad traffic*. Transportation research part a: policy and practice, ISSN 0965-8564, **36**(10), 919-930 (2002). Referenciado en 79
- [40] Yu Lean, Wang Shouyang and Lai Kin Keung. *An intelligent-agent-based fuzzy group decision making model for financial multicriteria decision support: the case of credit scoring*. European journal of operational research, ISSN 0377-2217, **195**(3), 942-959 (2009). Referenciado en 79

- [41] Lessmann Stefan, Sung Ming-Chien and Johnson Johnnie E. V. *Identifying winners of competitive events: a SVM-based classification model for horserace prediction*. European journal of operational research, ISSN 0377-2217, **196**(2), 569-577 (2009). Referenciado en 79
- [42] Hyung Rim Choi, Hyun Soo Kim, Byung Joo Park, et al. *An agent for selecting optimal order set in EC marketplace*. Decision Support Systems, ISSN 0167-9236, **36**(4), 371-383 (2004). Referenciado en 79
- [43] J. Sun, Y. Zhang, Nee A. Y. C. *Agent-based product design and planning for distributed concurrent engineering*. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000., ISBN 0-7803-5886-4, **4**, 3101-3106 (2000). Referenciado en 79
- [44] Jens Henoeh and Heinz Ulrich. *Agent-based management systems in logistics*. [http://www.ifor.math.ethz.ch/publications/2000\\_agentbasedmanagementsystems.pdf](http://www.ifor.math.ethz.ch/publications/2000_agentbasedmanagementsystems.pdf), julio 2009. Referenciado en 79
- [45] Byung-in Kim, Robert J. Graves, Sunderesh S. Heragu and Art St. Onge. *Intelligent agent modeling of an industrial warehousing Problem*. IIE transactions, ISSN 1573-9724, **34**(7), 601-612 (2002). Referenciado en 79
- [46] Yuhong Yan, Torsten Kuphal and Jürgen Bode. *Application of multiagent systems in project management*. International journal of production economics, ISSN 0925-5273, **68**(2), 185-197 (2000). Referenciado en 79
- [47] Sev V. Nagalingam and Grier C.I. Lin. *CIM-still the solution for manufacturing industry*. Robotics and computer-integrated manufacturing, ISSN 0736-5845, **24**(3), 332-344 (2008). Referenciado en 79
- [48] Omar D. Castrillón, Jaime A. Giraldo y William A. Sarache. *Secuenciación en ambientes job-shop por medio de sistemas expertos y agentes inteligentes*, ISBN 978-1-934272-64-0. Octava conferencia iberoamericana en sistemas, cibernética e informática, Orlando, 39-42 (2009). Referenciado en 80
- [49] Omar D. Castrillón, William A. Sarache y Jaime A. Giraldo. *Análisis de un problema job-shop por medio de un sistema experto y un agente inteligente*. Congreso de Ingeniería de la Organización, Barcelona, 2009. Referenciado en 80
- [50] J. R. Latta, E. G. Sarabia, D. Fernández, J. Arce y J. P. Oria. *Aplicación de inteligencia artificial en sistemas automatizados de producción*. Inteligencia artificial: Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, ISSN 1988-3064, **4**(10), 100-110 (2000). Referenciado en 80
- [51] Koonce D. A. and Tsai S. C. *Using data mining to find patterns in genetic algorithm solutions to a job-shop schedule*. Computer & Industrial Engineering, ISSN 0360-8352, **38**(3), 361-374 (2000). Referenciado en 80