

I CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA  
INDUSTRIAL (CINDUS 2019)

**Título**

**Algoritmo para la programación integrada producción -  
mantenimiento. Enfoque de optimización basado en recocido simulado.**

*Title*

*Algorithm for the integrated programming production - maintenance.  
Optimization approach based on simulated annealing*

**Ronald Díaz Cazañas<sup>1</sup>, Estrella De La Paz Martínez<sup>1</sup>, Daynier R. Delgado Sobrino<sup>2</sup>**

1-Universidad Central de Las Villas, Cuba. [ronalddc@uclv.edu.cu](mailto:ronalddc@uclv.edu.cu)

**Resumen:**

El desarrollo de programas integrados de producción y mantenimiento preventivo se ha convertido en un área de investigación muy atractiva debido a los inconvenientes que se evitarían con una gestión integrada entre estas actividades de la empresa. La naturaleza compleja de este tipo de problemas ha provocado que la mayoría de las alternativas de solución se hayan concentrado en la adopción de métodos heurísticos y metaheurísticos, capaces de proveer soluciones aceptables con una eficiencia razonable. En este sentido el presente trabajo muestra el diseño de un algoritmo para la programación integrada producción - mantenimiento en un ambiente productivo de máquinas paralelas, teniendo como objetivo minimizar el tiempo total de fabricación (*makespan*). El algoritmo fue estructurado en dos fases; en la primera se obtiene una solución inicial mediante el diseño de una heurística constructiva inspirada en la conocida regla de despacho *Largest Processing Time* (LPT), con algunas modificaciones para considerar la naturaleza estocástica del problema; en la fase 2 se intenta mejorar la solución inicial mediante un

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

método de recocido simulado. A diferencia de otras propuestas en esta el momento de efectuar el mantenimiento preventivo no se considera un parámetro fijo, sino que constituye una variable de decisión que se trata de optimizar de conjunto con la secuencia de fabricación; por otro lado se considera el hecho de que varios trabajos pueden tener fechas de lanzamiento diferentes. Otros enfoques bajo los cuales puede abordarse el problema de la integración fueron considerados como mecanismo para evaluar la efectividad del algoritmo propuesto.

**Palabras Clave:** Producción; Mantenimiento; Integración; Heurística; Recocido simulado

**Abstract**

The development of integrated programs of production and preventive maintenance has become a very attractive research area due to the inconveniences that would be avoided with an integrated management between these activities of the company. The complex nature of this type of problem has meant that most solution alternatives have focused on the adoption of heuristic and metaheuristic methods, capable of providing acceptable solutions with reasonable efficiency. In this sense the present work shows the design of an algorithm for the integrated production - maintenance programming in a productive environment of parallel machines, aiming to minimize the total manufacturing time (makespan). The algorithm was structured in two phases; in the first, an initial solution is obtained by designing a constructive heuristic inspired by the well-known Largest Processing Time (LPT) dispatch rule, with some modifications to consider the stochastic nature of the problem; in phase 2, an attempt is made to improve the initial solution by means of a simulated annealing method. Unlike other proposals, in this the beginning of preventive maintenance is not considered a fixed parameter, but is a decision variable that is optimized in conjunction with the manufacturing sequence. On the other hand, the fact that several jobs may have different release dates is considered. Other approaches under which the problem of integration can be addressed were considered as a mechanism to evaluate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Production; Maintenance; Integration; Heuristic; Simulated annealing

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

## 1. Introducción

El diseño de programas integrados de producción y mantenimiento preventivo (MP) constituye una de las temáticas fundamentales dentro de la gestión de operaciones en la actualidad. Problemas como incumplimientos de fechas de entrega establecidas para los diferentes productos, baja utilización de los recursos de manufactura, conflictos interpersonales entre operadores y personal de mantenimiento, e incremento del costo a menudo encuentran entre sus principales causas la falta de integración entre los procesos de gestión de la producción y gestión del mantenimiento. Si bien este escenario se presenta frecuentemente en la práctica empresarial la situación en la esfera académica no resulta muy diferente, pues tradicionalmente los métodos desarrollados para la gestión de la producción no incluyen explícitamente los requerimientos de mantenimiento, lo que conduce a la generación de soluciones subóptimas (Ruiz *et al.*, 2007; Hadidi *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2014; Da *et al.*, 2016; Kumar y Kumar Lad, 2016; Zahedi y Salim, 2017; Jing *et al.*, 2017; Boudjelida, 2017; Chansombat *et al.*, 2018).

En varias ocasiones la posibilidad de ocurrencias de averías en el equipamiento no se considera mientras se elaboran los programas de producción, teniendo lugar atrasos inesperados en las entregas. En otros casos el programa de mantenimiento indica ejecutar intervenciones planeadas en momentos de máxima demanda, lo cual generalmente encuentra el rechazo por parte del personal de producción y la intervención es pospuesta; sin embargo, este retraso en la tarea preventiva puede conducir al incremento de fallos en el equipamiento que ocasionan la degradación de los índices de productividad y calidad, por lo que la colaboración eficiente dentro del proceso de toma de decisiones a nivel de piso de taller relacionados con mantenimiento y programación de la producción constituye un elemento importante para conseguir un desempeño exitoso (Gao *et al.*, 2010; Tambe y Kulkarni, 2013; Gustafson *et al.*, 2013).

En una configuración productiva caracterizada por máquinas paralelas minimizar el makespan ( $C_{max}$ ) se convierte en un objetivo de especial interés, puesto que en la práctica los programadores de producción intentan frecuentemente lograr un equilibrio adecuado en la utilización de los recursos (Pinedo, 2012). Dada su analogía con el conocido problema del bin packing, el cual pertenece a la clase de problemas NP-hard (Coffman *et al.*, 1978 y Anily *et al.*, 1992), la existencia de un algoritmo que en tiempo

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

polynomial sea capaz de resolver de manera exacta todas las instancias resulta improbable. Si a esto se une el carácter aleatorio del tiempo de procesamiento de los trabajos debido a las paradas por fallos del equipamiento la complejidad del problema se incrementa, por lo que el diseño de métodos heurísticos capaces de proveer soluciones cercanas a la óptima en un tiempo razonable parece ser la mejor alternativa. En su versión tradicional (determinística) el problema de minimización del makespan en máquinas paralelas idénticas ha encontrado estrategias de solución basadas en algoritmos tales como First fit decreasing (FFD) y Best fit decreasing (BFD), propuestos por Johnson et al. (1974), así como la conocida regla de despacho LPT (Baker, 1974). Años más tarde Coffman et al. (1978) proponen el algoritmo MULTIFIT, el cual posee un ratio de desempeño superior a LPT. La extensión de este problema al considerar limitaciones en la disponibilidad del equipamiento fue abordada por Lee (1991; 1996; 2000). Este autor estudió dicha configuración productiva cuando las máquinas presentaban un único periodo de no disponibilidad durante el horizonte de planificación. Otras contribuciones importantes en el contexto de máquinas paralelas minimizando el makespan corresponden a Xu et al. (2008) y Lee y Wu (2008). Los primeros estudiaron el problema que se genera cuando se considera un horizonte de programación relativamente largo que incluye varias intervenciones preventivas, y el tiempo entre estas intervenciones no es constante, pero sí determinístico. Presentaron un algoritmo de solución donde se combinan las reglas BFD y LPT. Sin embargo, realmente en este estudio el  $C_{max}$  no estaba referido al completamiento del último trabajo, sino al de la última actividad de mantenimiento preventivo. Por su parte Lee y Wu (2008) consideraron un solo periodo de mantenimiento dentro del horizonte de planificación, con instantes de comienzo y terminación conocidos para cada máquina. Desarrollaron dos heurísticas estructuradas en dos fases. En la primera se obtiene una solución inicial a partir de la regla LDR (largest deterioration rate first). En la segunda fase la solución inicial es mejorada mediante un conjunto de pasos basados en el algoritmo MULTIFIT. En los últimos años la mayoría de las estrategias de solución para este tipo de problema han estado basadas en algoritmos de búsqueda local, inteligencia artificial y en el uso de la simulación. En este sentido pueden citarse a autores como Mirabedini y Iranmanesh

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

(2014) quienes aplicaron un algoritmo genético dinámico multiobjetivo y un esquema de optimización basado en enjambre de partículas como métodos de solución alternativos para un modelo donde se buscaba minimizar el makespan, el costo de mantenimiento preventivo, la varianza total del retraso de los trabajos y la varianza total del costo de mantenimiento preventivo. Wang and Liu (2015) estudiaron este problema bajo la consideración de que todos los productos estaban disponibles para iniciar el procesamiento al comienzo del horizonte de planificación. El problema fue representado mediante un modelo matemático no lineal y para la solución diseñaron un algoritmo genético multiobjetivo elitista (NSGA-II). Da et al. (2016) desarrollaron un algoritmo genético de tipo NSGA-II como método de solución para este problema, considerando que tanto el equipamiento como el tiempo de procesamiento de los trabajos se deterioran (alargan) en el tiempo. Se consideró además un ciclo de mantenimiento flexible y una política de mantenimiento preventivo basada en el tiempo.

Sin embargo, a pesar del auge alcanzado en la utilización de los métodos procedentes del campo de la Inteligencia Artificial, las heurísticas constructivas tales como la exitosa regla de despacho LPT continúan siendo una alternativa tentadora cuando se trata de implementar métodos relativamente sencillos capaces de generar buenas soluciones con rapidez; incluso estas han demostrado su utilidad como parte del desarrollo de métodos híbridos en los que en ocasiones se combina una heurística sencilla que provee de una solución inicial a un determinado algoritmo de búsqueda local encargado de mejorarla.

En este sentido el presente trabajo tiene como objetivo general desarrollar un método relativamente sencillo para la generación de un programa integrado de producción y mantenimiento preventivo en una configuración productiva de máquinas paralelas idénticas, dirigido a minimizar el makespan ( $C_{máx}$ ), de manera que se logre solventar algunas de las carencias de otros métodos encontrados en la literatura para enfrentar este tipo de problema.

Específicamente el método que se propone consiste en un algoritmo híbrido de dos fases. En la primera fase una heurística constructiva genera una solución inicial, la cual se tratará de mejorar en una segunda fase mediante un enfoque de recocido simulado. A

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

diferencia de otras propuestas encontradas en la literatura en este trabajo se considera que los diferentes productos pueden tener distintas fechas de lanzamiento y que el tiempo entre intervenciones de MP no es fijo, sino que constituye una variable de decisión dentro del algoritmo. Para la validación de nuestra propuesta se definieron cuatro enfoques alternativos mediante los cuales puede abordarse el problema de la integración producción – mantenimiento en este contexto. Tanto el algoritmo propuesto como los restantes cuatro métodos alternativos utilizados como mecanismo para la validación fueron implementados en el software Matlab R2015a.

## 2. Metodología

### 2.1 Breve descripción del problema

El sistema productivo consta de un conjunto de  $m$  máquinas, dispuestas en paralelo, capaces de procesar indistintamente  $n$  tipos de productos. Cada producto recibe todo el procesamiento en una y solo una de las máquinas disponibles, las cuáles por demás se asumen idénticas en el sentido de que el tiempo de procesamiento de cada trabajo (producto) es igual en todas las máquinas. El tiempo de procesamiento de los trabajos se asume constante y conocido, y una vez iniciado el procesamiento de un trabajo este no será interrumpido, a menos que ocurran perturbaciones inevitables en el proceso tales como fallo del equipo, ausencia del fluido eléctrico, etc., en cuyo caso, luego de restablecidas las condiciones de operación se continuará el procesamiento del producto. Se asume que el tiempo entre fallos del equipamiento puede describirse mediante una distribución de densidad probabilística Weibull.

El algoritmo que se propone se dirige entonces a establecer una asignación de trabajos a las diferentes máquinas, indicando además el momento más conveniente de efectuar las intervenciones de mantenimiento preventivo sobre estas, para minimizar el tiempo total de fabricación (makespan). Se considera una política de MP del tipo *as good as new*, o sea, luego de ejecutar la intervención preventiva sobre el equipo se restablecen totalmente las condiciones operativas del mismo.

### 2.2 Definición de variables y parámetros

$n$ : Número de trabajos (productos o lotes de productos) a ser programados.

$m$ : Número de máquinas.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



$J$ : Conjunto de trabajos (productos o lotes de productos) a ser programados.

$M$ : Conjunto de máquinas.

$r_j$ : Instante de tiempo en que el trabajo  $j$  se encuentra disponible para iniciar su procesamiento.

$p_j$ : Tiempo de procesamiento del trabajo  $j$ .

$j_l, j_t$ : Subíndices utilizados para denotar el  $l$ -ésimo o el  $t$ -ésimo trabajo dentro de un arreglo de trabajos ordenados de acuerdo con un criterio definido.

$I_k$ : Número de trabajos asignados a la máquina  $k$ .

$T t_k$ : Tiempo de terminación de la máquina  $k$ .

$a_{0k}$ : Edad efectiva de la máquina  $k$  al inicio del periodo de programación.

$a_{k(lk^-)}$ : Edad efectiva de la máquina  $k$  antes de iniciar el procesamiento del trabajo  $l_{(k-ésimo)}$ .

$a_{k(lk)}$ : Edad efectiva de la máquina  $k$  luego de terminar el procesamiento del trabajo  $l_{(k-ésimo)}$ .

$TCE_{lk}$ : Tiempo de completamiento esperado del trabajo  $l$  en la máquina  $k$ .

$TE_{lkPM1}$ : Tiempo de elaboración del trabajo  $l$  en la máquina  $k$  si la actividad de mantenimiento preventivo se realiza en esa máquina antes de procesar el trabajo  $l_{(k-ésimo)}$ .

$TE_{lkPM0}$ : Tiempo de elaboración del trabajo  $l$  en la máquina  $k$  si no se realiza mantenimiento preventivo en esa máquina antes de iniciar su procesamiento.

$t_{pk}$ : Tiempo medio de duración de la intervención de mantenimiento preventivo en la máquina  $k$ .

$t_{rk}$ : Tiempo medio de duración de la intervención de mantenimiento correctivo en la máquina  $k$ .

$\beta_k$ : Parámetro de forma de la distribución Weibull que describe la variable tiempo entre fallos asociada a la máquina  $k$ .

$\eta_k$ : Parámetro de escala de la distribución Weibull que describe la variable tiempo entre fallos asociada a la máquina  $k$ .

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

$PM_{lk}$ : Variable binaria que indica si la intervenci3n de mantenimiento preventivo se realizar3 en la m3quina  $k$  antes de iniciar el procesamiento del trabajo  $l$ .

$A(k), B(k)$ : Arreglos que representan los subconjuntos de trabajos asignados a la m3quina  $k$ , as3 como las intervenciones de mantenimiento preventivo que deben realizarse antes de iniciar el procesamiento de cada trabajo.

$\#(\alpha)$ : Cardinalidad del subconjunto  $\alpha$ .

$w_{lt}$ : Peso espec3fico del  $l$ -3simo trabajo respecto al  $t$ -3simo trabajo

$\omega$ : Constante positiva definida experimentalmente para decidir si es conveniente programar primero un trabajo de menor  $r$  y menor  $p$  que otro de mayor  $p$  y mayor  $r$ .

$C_{m3x}$ : Valor del makespan asociado a la asignaci3n de trabajos e intervenciones de mantenimiento establecida como soluci3n.

### 2.3 Pasos del algoritmo

#### 2.3.1 Fase 1. Generaci3n de la soluci3n inicial mediante el dise1o de una heur3stica constructiva (HC)

1. Inicializar  $Tt_k = I_k = 0 \forall k \in M$ ;  $l = 0$ ;  $A(1) = A(2) = \dots = A(m) = \emptyset$ ;  $r_j \forall j = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $a_{0k} \forall k = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $\omega$ .

2. Formar el conjunto  $J$  de trabajos ordenados de manera no creciente seg3n  $p_j$

3. Hacer:  $t = 1$ ;  $S = \emptyset$ ;  $P = \emptyset$ ;  $l = l + 1$

Si  $r_{j_l} \leq \max(\min(r_{j_l}), \min(Tt_k)) \forall j_l = \{l, l + 1, \dots, n\}, \forall k \in M$  asignar el trabajo  $j_l$  a la m3quina  $k \mid TCE_{lk} = \min\{TCE_{lk}\} \forall k \in M$ . En caso de empate seleccionar la m3quina  $k \mid a_{k(lk^-)} = \min\{a_{k(lk^-)}\} \forall k \mid TCE_{lk} = \min\{TCE_{lk}\}$ . Si persiste el empate seleccionar la m3quina  $k$  arbitrariamente.

$$I_k = I_k + 1$$

$$TCE_{lk} = \left\{ \begin{array}{ll} \max(Tt_k; r_l) + TE_{lkPM1} & \text{si } PM_{lk} = 1 \\ \max(Tt_k; r_l) + TE_{lkPM0} & \text{en otro caso} \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$PM_{lk} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{si} \quad \left( t_{pk} + t_{rk} \left[ \left( \frac{p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \right) < \left( t_{rk} \left[ \left( \frac{a_{k(lk^-)} + p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} - \left( \frac{a_{k(lk^-)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \right) \\ 0 \quad \text{en otro caso} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$TE_{lkPM1} = p_l + t_{pk} + t_{rk} \left[ \left( \frac{p_l}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (3)$$

Informaci3n de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

$$T E_{lkPM0} = p_l + t_{rk} \left[ \left( \frac{a_{k(lk^-) + p_l}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} - \left( \frac{a_{k(lk^-)}}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (4)$$

$$a_{k(lk^-)} = \begin{cases} 0 & \text{si } PM_{lk} = 1 \\ a_{k(lk^- - 1)} + p_{lk^- - 1} & \text{si } PM_{lk} = 0 \text{ y } I_k > 1 \\ a_{0k} & \text{si } I_k = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Hacer  $T t_k = T C E_{lk}$  y  $A(k) = A(k) \cup \{j_l\}$

Si  $\sum_{k=1}^m I_k < n$  repetir el paso 3 si no obtener  $C_{m \acute{a}x} = \max \{T t_k\} \forall k \in M$

Si  $r_{j_l} > \max(\min(r_j), \min(T t_k)) \forall j = \{l, l+1, \dots, n\}, \forall k \in M$  ir al paso 4

4. Generar el subconjunto P de trabajos ordenados de manera no decreciente segun  $r_j$ ,

$$P \subset J \setminus \{j_l; A(k) \forall k \in M\} \mid r_l > r_t \forall j_t \in P$$

4.1 Calcular el peso relativo del trabajo  $j_l$  respecto al trabajo  $j_t$  ( $w_{lt}$ ) mediante la ecuación 6

$$w_{lt} = \frac{\frac{p_l}{\bar{p}}}{r_{j_l} - \max(\min(r_{j_t}), \min(T t_k))} \quad \forall k \in M, j_t \in P \quad (6)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{j \in P} p_j}{\#(P)} \quad (7)$$

Si  $w_{lt} < \omega$  ir al paso 4.2 si no ir al paso 4.3.

4.2 Calcular el tiempo de completamiento esperado del trabajo  $j_t$  en cada máquina k mediante la ecuación (1).

Identificar la máquina k  $\mid T C E_{tk} = \min \{T C E_{tk}\}$ . En caso de empate seleccionar arbitrariamente

Hacer  $T t_k = T C E_{tk}; I_k = I_k + 1; S = S \cup \{j_t\}$

4.3 Hacer  $t = t + 1$ . Si  $t \leq \#(P)$  y  $r_{j_l} > \min(T t_k) \forall k \in M$  repetir el paso 4.1, si no ir al paso 5.

5. Si  $S \neq \emptyset$  asignar los trabajos del subconjunto S aplicando la regla combinada  $r_j$ -LPT y actualizar los arreglos A(k). Actualizar los valores de  $T t_k$  en cada máquina k  $\mid \exists j_t \in A(k)$ .

Hacer  $A(k) = A(k) \cup \{j_t\} \mid j_t \in A(k), T t_k = T C E_{tk} \forall k \mid j_t \in A(k)$  y actualizar los valores  $I_k \forall k \in M$

Si  $S = \emptyset$  ir al paso 6.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

6. Asignar el trabajo  $l$  a la máquina  $k$   $|TCE_{lk} = \min \{TCE_{lk}\} \forall k = \{1, 2, \dots, m\}$ . En caso de empate seleccionar la máquina  $k$   $|a_{k(lk^-)} = \min \{a_{k(lk^-)}\} \forall k | TCE_{lk} = \min \{TCE_{lk}\}$ . Si persiste el empate seleccionar la máquina  $k$  arbitrariamente. Ajustar  $A(k) = A(k) \cup \{j_l\}$  y  $Tt_k = TCE_{lk}$ .
- Si  $\sum_{k=1}^m I_k < n$  ir al paso 3, si no obtener  $C_{máx} = \max \{Tt_k\} \forall k \in M$

Establecer para cada máquina  $k$  la solución inicial dada por los arreglos  $A(k)$  y  $PM_{lk}$ , siendo el makespan igual a  $C_{máx}$

#### Definición de la regla combinada r - LPT

1. Ajustar  $t_0 = \max(\min(r_j), \min(Tt_k)) \forall j \in S, k \in M, JA = \emptyset, MA = \emptyset$
2. Formar el subconjunto de trabajos  $JA \subset S | r_j \leq t_0 \forall j \in S$ .
3. Formar el subconjunto de máquinas  $MA \subset M | Tt_k \leq t_0 \forall k \in M$
4. Si  $\#(JA) \leq \#(MA)$  asignar en el instante  $t_0$  cada trabajo de  $JA$  a alguna máquina  $k$  de  $MA$ , si no asignar los trabajos de  $JA$  a las máquinas de  $MA$  según la regla LPT.  
Actualizar  $A(k) \forall k \in MA$  y  $Tt_k = TCE_{jk} | j \in A(k) \forall k \in MA$

5. Ajustar  $S = S \setminus \{j \in JA | j \in A(k) \forall k \in MA\}$ . Si  $S \neq \emptyset$  repetir el paso 1 si no terminar.

#### 2.3.2 Fase 2. Mejoramiento de la solución inicial utilizando un enfoque de recocido simulado

El enfoque o algoritmo de recocido simulado que se propone está compuesto por 3 funciones propias de este método: una función que define la estrategia para generar una solución vecina a partir de un solución actual, la cual será denominada *neighbord function*; una función de recocido, denominada *schedules generation*, la cual toma como entrada una solución determinada y la modificará mediante una cantidad de cambios proporcional al parámetro de temperatura y, por último, la función objetivo (*fitness function*).

La solución tomada como punto de partida para iniciar el proceso de búsqueda (solución inicial) se obtiene a partir de la heurística constructiva (HC) definida en el epígrafe

2.3.1. Seguidamente se presenta el diseño de las tres funciones que integran nuestro algoritmo de recocido simulado.

##### 2.3.2.1 Function generadora de soluciones vecinas (*neighbord function*)

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

Considérese la matriz `sch_neighb` que guarda la solución inicial (asignación de trabajos e intervenciones de PM a cada máquina). De este modo cada fila de `sch_neighb` representa el vector que define la solución inicial obtenida para la máquina que corresponde con el número de la fila. Para cada máquina se assume que la posición final del vector que representa su solución es ocupada por un trabajo. La estrategia adoptada para generar una solución vecina a partir de la actual consiste en seleccionar aleatoriamente un par de máquinas  $m_1$  y  $m_2$  del conjunto  $M$ , que corresponden con dos filas de `sch_neighb`. El algoritmo se diseñó de manera que la máquina  $k$  que presente el mayor tiempo de terminación esperado ( $Tt_k$ ) en la solución actual tenga mayor probabilidad de ser seleccionada como  $m_1$ , mientras que la máquina  $i$  que presente el menor tiempo de terminación esperado ( $Tt_i$ ) en la solución actual tendrá mayor probabilidad de ser seleccionada como  $m_2$ . Dos celdas, una en la fila de  $m_1$  y otra en la fila de  $m_2$ , son seleccionadas también aleatoriamente. Si el elemento seleccionado en la fila de  $m_1$  es una actividad de PM esta se transfiere, con una probabilidad de 0,5, hacia la posición (celda) de la fila de  $m_2$  previamente seleccionada, siempre y cuando el elemento de la celda de  $m_2$  sea un trabajo. Si el elemento seleccionado en la fila de  $m_1$  es un trabajo este se transfiere a la primera posición vacía que se encuentre en la fila de  $m_2$  y se inserta en la celda precedente una actividad de PM con una probabilidad de 0,5. Posteriormente se actualizan las posiciones de los elementos en ambas filas para no dejar celdas intermedias vacías, así como eliminar alguna actividad de PM en caso necesario para evitar actividades de PM en posiciones adyacentes dentro de la matriz de solución.

El pseudocódigo que define la función `neighbor`, implementado en MATLAB R2105a, se muestra a continuación:

1. Definir `sch_neighb`: matriz que contiene la solución inicial obtenida mediante la heurística constructiva (HC) definida en el subepígrafe 2.3.1.

$Tt$ : vector que contiene el tiempo de terminación del conjunto de máquinas

$t_1 = \text{randi}(n)$

$x = \text{round}(\text{rand})$

2. if  $x == 1$

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



```
m1 = mk | T tk = m áx(T tk) ∀ k ∈ M
else
    m1 = randi(m);
end
3. x = round(rand);
if x == 1
    m2 = mi | T ti = m ín(T ti) ∀ i ∈ M
else
    m2 = randi(m);
end
if m2 = m1 repetir el paso 3 else ir al paso 4
4. Hacer j = randi(n)
5. if sch_neighb(m1, t1) == PM
    if sch_neighb(m2, j) ≠ PM y j == 1
        Hacer d = round(rand)
        if d == 1 insertar la actividad de PM en la celda (m2, j) de sch_neighb y
            actualizar la posición de los restantes elementos de la fila m2 desplazando
            cada uno una celda a la derecha.
        end
    end
    if sch_neighb(m2, j) ≠ PM y j > 1 y sch_neighb(m2, j-1) ≠ PM
        Hacer d = round(rand)
        if d == 1 insertar la actividad de PM en la celda (m2, j) de sch_neighb y
            actualizar la posición de los restantes elementos de la fila m2 desplazando
            cada uno una celda a la derecha.
        end
    end
end
if sch_neighb(m2, j) ≠ PM y j > 1 y sch_neighb(m2, j+1) ≠ PM y j < n
    Hacer d = round(rand)
```

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

```
if d == 1 insertar la actividad de PM en la celda (m2, j) de sch_neighb y
    desplazar una celda a la derecha los restantes valores de la fila m2.
end
end
5.1 Eliminar la actividad de PM de la celda sch_neighb (m1, t1) y actualizar las
posiciones de los elementos de la fila m1 desplazando una posición (celda) a la
izquierda los elementos ubicados en las celdas (m1, u)  $\forall u > t_1$ .
else
    Hacer d = round (rand).
    if d == 1 insertar la actividad de PM luego del último trabajo de la fila m2 y en la
    siguiente posición el trabajo ubicado en la celda sch_neighb (m1, t1)
    else
        insertar el trabajo ubicado en la celda sch_neighb (m1, t1) como último trabajo
        de la fila m2
    end
end
5.2 Actualizar las posiciones de la fila m1 cuidando que no queden 2 actividades
de PM en posiciones adyacentes. De ocurrir esto eliminar una de estas.
end
```

#### 2.3.2.2 Function de recocido (schedules generation)

Esta función toma como entrada la solución obtenida por neighborhood function, expresada en la matriz sch\_neighb, y efectúa cambios sucesivos sobre dicha solución (determinados conforme a la estrategia definida en neighborhood function) en una cantidad definida por el parámetro temperatura. La solución obtenida constituye, igualmente, una solución vecina, pero con una estructura diferente a la provista por neighborhood function. El pseudocódigo que define a esta función se muestra a continuación:

```
Hacer sch_neighb = optimValues.x;
for i = 1:floor(optimValues.temperature)+1
    [mach orders] = size(sch_neighb);
    sch_neighb = neighbor(schvecina, mach, orders);
end
```

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

### 2.3.2.3 Función objetivo (fitness function)

La función objetivo (fitness function) considera las premisas sobre las cuáles se diseñó la heurística constructiva presentada en el epígrafe 3.2.1, fundamentalmente en lo que refiere a la adopción de una política de mantenimiento preventivo de tipo as good as new (la intervención de PM restablece a cero la edad efectiva de la máquina), y la variable tiempo entre fallos se ajusta a la distribución Weibull. Utiliza las mismas variables y parámetros que el algoritmo inicial. El pseudocódigo correspondiente se muestra a continuación:

```
Inicializar  $I = TE_{lk} = \text{zeros}(1, m)$ ,  $a_{k(lk^-)} = a_{k(lk)} = TCE_{lk} = \text{zeros}(m, n)$ 
```

```
for  $k = 1:m$ 
```

```
  for  $l = 1:n$ 
```

```
    if  $l == 1$  y  $\text{sch\_neighb}(k, l) \neq \text{PM}$ 
```

```
       $I_k = I_k + 1$ ,
```

```
       $a_{k(lk^-)} = a_{0k}$ 
```

```
       $a_{k(lk)} = a_{k(lk^-)} + p_l$ 
```

```
       $TE_{lk} = TE_{lkPM0}$ 
```

```
    end
```

```
    if  $l > 1$  y  $\text{sch\_neighb}(k, l) \neq \text{PM}$  y  $\text{sch\_neighb}(m_2, j-1) == \text{PM}$ 
```

```
       $I_k = I_k + 1$ 
```

```
       $a_{k(lk^-)} = 0$ 
```

```
       $a_{k(lk)} = a_{k(lk^-)} + p_l$ 
```

```
       $TE_{lk} = TE_{lkPM1}$ 
```

```
    end
```

```
    if  $l > 1$  y  $\text{sch\_neighb}(k, l) \neq \text{PM}$  y  $\text{sch\_neighb}(m_2, j-1) \neq \text{PM}$ 
```

```
       $I_k = I_k + 1$ 
```

```
       $a_{k(lk^-)} = a_{k(lk-1)}$ 
```

```
       $a_{k(lk)} = a_{k(lk^-)} + p_l$ 
```

```
       $TE_{lk} = TE_{lkPM0}$ 
```

```
    end
```

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



$$TCE_{lk} = \max(Tt_k; r_l) + TE_{lk}$$

$$Tt_k = TCE_{lk}$$

end

end

$$C_{\max} = \max(Tt_k)$$

La fase 1 del algoritmo (heurística constructiva definida mediante los pasos del 1 al 6) se dirige a buscar una solución inicial tomando como base el enfoque general de la regla LPT, pero con una ligera modificación que se implementa en el paso 3 donde se considera que el trabajo de mayor tiempo de procesamiento que se encuentre disponible en un momento dado será asignado a aquella máquina que logre para este un menor tiempo de completamiento esperado, en lugar de asignarlo directamente a la primera máquina disponible. La ecuación 2 resume el enfoque de una heurística *greedy* a partir de la cual se toma la decisión de efectuar o no una intervención de PM antes de iniciar el procesamiento del trabajo considerado. Si más de una máquina reporta el mismo valor mínimo de tiempo de completamiento esperado para el trabajo analizado este será asignado a aquella de menor edad inicial efectiva antes de su procesamiento, con lo que se espera reducir la cantidad total de intervenciones de PM en la solución final y con esto el costo total de la solución. En caso de que el trabajo de mayor duración no presente la menor fecha de lanzamiento se evalúa, mediante el paso 4, si es conveniente asignar primero otros trabajos que se encuentren disponibles o que presenten menor fecha de lanzamiento. Esta decisión se toma a partir del resultado de la ecuación 6. Los trabajos que cumplan la condición establecida mediante la ecuación 6 serán asignados en el paso 5, mediante un sencillo método que se ha denominado en este trabajo regla combinada  $r - LPT$ . Si ya fueron asignados todos aquellos trabajos que mediante la ecuación 6 se consideró conveniente programarlos antes que el  $l$ -ésimo trabajo de mayor duración, o si se determinó que era conveniente retrasar el inicio del procesamiento de estos para dar prioridad al  $l$ -ésimo trabajo más largo entonces se procede a programar ese trabajo de mayor duración tal como lo indica el paso 6, utilizando las ecuaciones y el enfoque que se plantea en el paso 3.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

En una segunda fase del algoritmo se trata de mejorar la solución inicial mediante un enfoque de recocido simulado, definiéndose las 3 funciones características del mismo en los subepígrafes del 2.3.2.1 al 2.3.2.3 y codificadas utilizando MATLAB R2015a.

### 3. Resultados y discusión

3.1 Principales características del sistema de producción. Obtención de la información relativa a las variables y parámetros de producción y de mantenimiento.

Nuestro algoritmo fue aplicado en un taller de la industria del plástico, integrado por 7 máquinas de inyección dispuestas en paralelo, la cuales son capaces de procesar cada uno de los productos que se fabrican en el taller, siendo la productividad lograda para cada tipo de producto la misma, independientemente de la máquina en la que el producto sea fabricado. El periodo de tiempo definido para la aplicación del algoritmo correspondió a un horizonte de 3 meses, durante el cual fueron programados 32 productos. Una característica importante del sistema de producción es que no todos los productos se encontraban disponibles para iniciar su procesamiento al inicio del periodo de programación, debido fundamentalmente a problemas con el suministro de la materia prima. Se presentan las mismas premisas definidas en el subepígrafe 2.1. Bajo estas consideraciones, y de acuerdo con Dehnan Saidy y Taghavi-Fard (2008) y Ma et al (2010), nuestro sistema puede clasificarse del tipo  $P7 | \Phi, r_s, r_i | C_{max}$ . El tiempo de fabricación de los lotes de productos y la fecha de lanzamiento estimada para cada a partir del inicio del periodo de programación se muestran en la Tabla 1.

Para cada una de las máquinas se tomaron datos de las variables tiempo entre fallos (TBF) y tiempo de inactividad debido a fallo (TTR) expresados en horas (más de 30 datos por cada máquina). Para ambas variables las pruebas de bondad de ajuste realizadas (Kolmogorov – Smirnov (KS), Anderson – Darling (AD) y Chi cuadrado) reafirmaron la hipótesis de que los datos ajustaban a la distribución Weibull con un 5% de significación. En los Anexos 1 y 2 se muestran los datos de tiempo de operación y de tiempo de inactividad del equipamiento. En los Anexos 3 y 4 se presentan los resultados de las pruebas de bondad de ajuste respecto a la distribución Weibull para ambas variables, observándose que para cada combinación de máquina y variable se cumplen al menos 2 de las 3 pruebas realizadas, lo que demuestra un ajuste adecuado.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



Tabla 1. Tiempo de producción y fecha de lanzamiento de los trabajos a programar.

Productos	Tiempo de elaboración (h/u)	Tamaño del lote (u)	Tiempo de producción (h)	Fecha de lanzamiento (h)
1. Cubeta 4 lts	0,0193	14600	281,78	0
2. Cubeta 10 lts	0,0196	15760	308,90	24
3. Cubeta 19 lts	0,0210	10650	223,65	0
4. Tapa de teclado VE78	0,0073	1120	8,18	240
5. Asa inferior de la olla	0,0064	31586	202,15	0
6. Decoración del mango	0,0071	14300	101,53	0
7. Galón cónico	0,0155	13865	214,91	120
8. Cubierta de placa 2P	0,0017	113000	192,10	0
9. Pom o 1 lt	0,0135	21610	291,74	0
10. Recipiente de 4 lts	0,0137	18350	251,40	72
11. Recipiente medidor	0,0153	23740	363,22	0
12. Base del tomacorriente	0,0014	139250	194,95	0
13. Hélice 12' Repuesto	0,0195	22950	447,53	48
14. Botón de ajuste	0,0058	10400	60,32	72
15. Botón oscilador	0,0029	15980	46,34	240
16. Caja 2x4 vivienda	0,0072	102740	739,73	480
17. Asa superior de la olla	0,0064	31293	200,28	0
18. Caja 4x4 vivienda	0,0072	43857	315,77	0
19. Tapa lateral	0,0055	33084	181,96	48
20. Hélice VE 79	0,0229	19056	436,38	72
21. Columna base VE 79	0,0207	30694	635,37	288
22. Tuerca protectora	0,0043	17315	74,45	0
23. Base VE 79	0,0156	7000	109,20	288
24. Tapa base VE 78	0,0173	8550	147,92	120
25. Base VE78	0,0231	309	7,14	0
26. Hélice 16	0,0229	1115	25,53	0
27. Gaveta para vegetales	0,0229	2540	58,17	360
28. Panel frontal	0,0172	2200	37,84	0
29. Marco congelador	0,0229	2715	62,17	0
30. Panel superior	0,0533	1540	82,08	120
31. Anillo protector VE 79	0,0110	15630	171,93	168
32. Placa soporte 2 puestos	0,0069	37950	261,86	168

La Tabla 2 contiene la información, para cada máquina, referida a los parámetros de forma y escala de la distribución Weibull para las variables tiempo entre fallos (TBF) y tiempo de inactividad debido a fallos (TTR), el tiempo medio dedicado a mantenimiento preventivo ( $\bar{t}_p$ ), el tiempo medio de la reparación luego de la ocurrencia del fallo ( $\bar{t}_r$ ), la edad efectiva de cada máquina al inicio del periodo de programación ( $E_0$ ), el tiempo entre intervenciones preventivas ( $t_i$ ) según la política mantenimiento preventivo

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

adoptada en la empresa y el tiempo óptimo entre intervenciones preventivas ( $t_i^*$ ), expresados en horas. El tiempo medio de reparación para cada máquina fue obtenido a partir de la ecuación 7:

$$\bar{t}_r = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (7)$$

Donde:

$\bar{t}_r$ : Tiempo medio de mantenimiento correctivo

$\eta$ : Parámetro de escala de la distribución Weibull correspondiente a la variable TTR

$\beta$ : Parámetro de forma de la distribución Weibull correspondiente a la variable TTR

$\Gamma$ : Función de distribución Gamma.

Tabla 2. Parámetros de mantenimiento del equipamiento productivo

No.	Máquinas	$\beta_{TBF}$	$\eta_{TBF}$ (h)	$\bar{t}_p$ (h)	$\beta_{TTR}$	$\eta_{TTR}$ (h)	$\bar{t}_r$ (h)	$\bar{t}_i$ (h)	$t_i^*$ (h)	$E_0$ (h)
1	TTI-130-1	2,06	585,97	33,45	1,42	127,62	116,06	400	311,41	332
2	TTI-130-2	2,20	911,78	33,45	1,41	135,72	123,56	400	463,43	292
3	TTI-300	1,87	397,64	33,45	1,29	61,43	56,82	400	322,69	168
4	IJ-300	2,03	1318,53	35,54	1,42	73,99	67,29	550	948,86	480
5	EM-300	5,67	2002,27	27,29	1,53	22,42	20,19	385	1608,94	288
6	EM-480	1,63	952,41	27,29	1,29	36,64	33,89	385	1107,18	316
7	JM-650	2,59	1454,74	27,29	1,36	97,57	89,35	425	515,45	412

Los valores del tiempo entre intervenciones preventivas  $\bar{t}_i$  para cada máquina fueron obtenidos a partir del plan de mantenimiento preventivo establecido en la empresa. El tiempo óptimo entre intervenciones preventivas ( $t_i^*$ ) fue calculado siguiendo el criterio de maximizar la disponibilidad del equipamiento, considerando que la variable tiempo entre fallos en todos los casos muestra un ajuste adecuado a la distribución Weibull. En este sentido se utilizó la expresión 8 planteada por Cassady y Kutanoglu (2003) y Pan et al (2010).

$$t_i^* = \eta * \left( \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_r * (\beta - 1)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

### 3.2 Resultados obtenidos

En un primer momento se muestra la solución obtenida mediante la heurística constructiva (HC) que constituye la fase I de nuestro método híbrido, posteriormente se

muestran los resultados alcanzados mediante la aplicación del método híbrido (nuestra propuesta), resultado de aplicar un algoritmo de recocido simulado para mejorar la solución provista por HC.

**3.2.1 Solución obtenida mediante la heurística constructiva (HC) de la fase 1.**

En la matriz siguiente (matriz Schedule) se muestra la solución proporcionada por HC, implementada en Matlab R2015a. Las filas corresponden a cada máquina, en el orden en que aparecen en la Tabla 2. Los valores se corresponden con el id de cada trabajo, en el orden en que aparecen en la tabla 1. El valor 100 indica una actividad de PM en la máquina correspondiente a la fila. Por ejemplo, de acuerdo con esta solución el programa integrado para la máquina 1 (máquina TTI - 130 - 1) iniciaría con una intervención de PM, luego se elaborarían los productos 17 y 22 y, seguidamente, el 32, el 8 y el 23, ejecutándose una intervención de PM antes de iniciar cada uno de estos 3 últimos productos. En este caso el valor del parámetro  $\omega$  utilizado en el paso 4 de HC se ajustó a 0,005.

La matriz TTj, compuesta por 3 filas y 32 columnas, muestra el id de cada trabajo en la fila 1, en el orden en que fueron asignados a las máquinas, y en las filas 2 y 3 los instantes de inicio y de completamiento (terminación) esperados respectivamente para cada trabajo. Según puede apreciarse el valor de la función objetivo (Cmax) es de 1222,3 h., determinado por la máquina 5 tras concluir la elaboración del producto 16.

Schedule =

Columns 1 through 9

100	17	22	100	32	100	8	100	23
3	12	100	2	100	19	100	30	0
5	6	100	10	100	7	14	0	0
1	29	20	31	15	0	0	0	0
11	16	0	0	0	0	0	0	0
9	28	25	21	4	0	0	0	0
18	26	100	13	24	27	0	0	0

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



TTj = 1.0e+03 \*

Columns 1 through 8

0.0110	0.0180	0.0090	0.0010	0.0030	0.0050	0.0170	0.0120
0	0	0	0	0	0	0.0335	0.2488
0.3633	0.3272	0.3024	0.2952	0.2488	0.2405	0.2464	0.4799

Columns 9 through 16

0.0060	0.0220	0.0290	0.0280	0.0260	0.0250	0.0160	0.0210
0.2405	0.2464	0.2952	0.3024	0.3272	0.3419	0.4800	0.4800
0.3705	0.3504	0.3612	0.3419	0.3541	0.3494	1.2223	1.1525

Columns 17 through 24

0.0130	0.0200	0.0020	0.0320	0.0100	0.0070	0.0080	0.0190
0.4800	0.4800	0.4800	0.4800	0.4800	0.7890	0.7974	0.8338
0.9590	0.9519	0.8338	0.7974	0.7890	1.0553	1.0346	1.0527

Columns 25 through 32

0.0310	0.0240	0.0230	0.0300	0.0140	0.0270	0.0150	0.0040
0.9519	0.9590	1.0346	1.0527	1.0553	1.1260	1.1420	1.1525
1.1420	1.1260	1.1809	1.1689	1.1506	1.1927	1.1937	1.1613

### 3.2.2 Resultados obtenidos mediante la aplicación del método híbrido (HCSA)

En este caso se tomará la solución provista por HC como solución de partida para nuestro algoritmo híbrido (HCSA), quedando el refinamiento de dicha solución a cargo de las funciones neighborhood function, schedules generation y fitness function. La parametrización del algoritmo de recocido simulado que se incluye en la fase 2 de nuestro método híbrido se definió de la manera siguiente: temperatura inicial igual a 1000, un valor relativamente alto que en las primeras iteraciones permite aceptar soluciones peores que la inicial con alta probabilidad, ampliando con ello el espacio de búsqueda; definición del entorno de búsqueda mediante las funciones neighborhood function y schedules generation, esta última establece la nueva solución vecina a partir de un número de pasos proporcionales al valor de temperatura; condición de equilibrio definida ajustando a 100 el reannealing interval; y esquema de enfriamiento exponencial, con  $\alpha = 0,95$ , para lograr un descenso de la temperatura más rápido a altas temperaturas y más lento cuando la temperatura es menor; criterio de parada correspondiente a 5000 iteraciones. El resultado obtenido luego de 5000 iteraciones se muestra a continuación. En la figura 1 se muestra la evolución del algoritmo en base al

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

resultado de la función objetivo cada 250 iteraciones, en la que puede verse el mejor y el último valor de  $C_{max}$  durante toda la corrida.

100	18	100	21	25	0	0	0
5	100	8	13	29	24	0	0
10	100	32	9	4	26	0	0
31	1	17	6	23	0	0	0
100	19	16	0	0	0	0	0
12	3	27	22	20	15	100	30
7	2	11	28	14	0	0	0

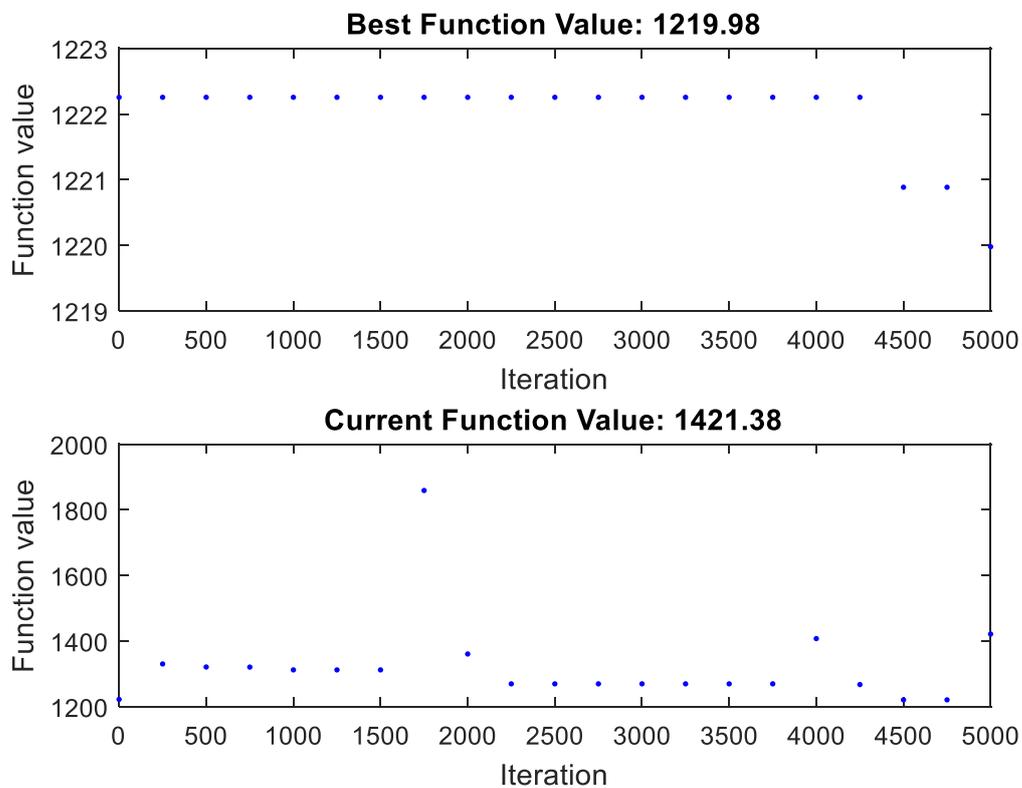


Figura 1. Evolución del algoritmo HCSA en una corrida de 5000 iteraciones

En este caso el valor del makespan ( $C_{max}$ ) logró reducirse a 1219,98 h, algo mejor que el valor obtenido mediante HC, sin embargo se muestra una reducción considerable en el número de intervenciones de PM necesarias.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



La matriz  $TT_j$  correspondiente a la solución anterior se muestra a continuación. Tal como ocurrió en la solución generada por HC el valor de  $C_{max}$  quedó determinado por la máquina 5 al concluir el producto 16:

$$TT_j = 1.0e+03 *$$

Columns 1 through 8

0.0180	0.0210	0.0250	0.0050	0.0080	0.0130	0.0290	0.0240
0.0335	0.4151	1.1876	0	0.2576	0.4537	0.9539	1.0289
0.3817	1.1876	1.1980	0.2242	0.4537	0.9539	1.0289	1.2131

Columns 9 through 16

0.0100	0.0320	0.0090	0.0040	0.0260	0.0310	0.0010	0.0170
0.0720	0.4083	0.6962	1.0674	1.0785	0.1680	0.3474	0.6465
0.3748	0.6962	1.0674	1.0785	1.1134	0.3474	0.6465	0.8629

Columns 17 through 24

0.0060	0.0230	0.0190	0.0160	0.0120	0.0030	0.0270	0.0220
0.8629	0.9738	0.0480	0.4800	0	0.2016	0.4352	0.4963
0.9738	1.0941	0.2300	1.2200	0.2016	0.4352	0.4963	0.5747

Columns 25 through 32

0.0200	0.0150	0.0300	0.0070	0.0020	0.0110	0.0280	0.0140
0.5747	1.0385	1.1155	0.1200	0.3416	0.6689	1.0703	1.1133
1.0385	1.0882	1.1982	0.3416	0.6689	1.0703	1.1133	1.1823

### 3.2.3 Validación de la efectividad del algoritmo HC SA propuesto.

Considerando que el diseño de la heurística constructiva (HC) que conforma a la fase 1 de nuestro método híbrido HC SA se basa en la exitosa regla de despacho LPT, incluyendo algunas modificaciones definidas en el epígrafe 3.2, creemos que una manera apropiada de demostrar la efectividad de nuestra propuesta puede ser analizar la efectividad de tales modificaciones propuestas en el diseño, además de analizar la conveniencia de generar programas integrados de producción y de mantenimiento preventivo en lugar de generar programas óptimos de manera independiente en cada área. En este sentido se plantean 4 métodos alternativos para abordar el problema de programación integrada, los cuales constituyen diferentes alternativas para la comparación de la efectividad de nuestra propuesta. Estos métodos son:

1. Modelo de programación de la producción sin mantenimiento preventivo.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

2. Modelo interrelacionado de programación de la producción y mantenimiento preventivo.
3. Modelo integrado de producción y mantenimiento preventivo basado en la regla combinada r-LPT.
4. Modelo integrado de producción y mantenimiento preventivo basado en la regla LPT.

Los resultados obtenidos en cada caso se presentan a continuación.

#### 3.2.3.1 Modelo de programación de la producción sin mantenimiento preventivo.

En este modelo los trabajos se programan siguiendo la regla FIFO, o sea, programar primero el que primero esté disponible (el de menor reléase date) y si existen trabajos con igual reléase date se aplica sobre estos la regla LPT, iniciando el próximo trabajo en la primera máquina disponible y no en la que se logre un tiempo de completamiento esperado (TCE) menor. En este modelo no se consideran intervenciones de PM sino que se adopta una estrategia de mantenimiento correctivo en la que la tasa de fallos del equipamiento crece continuamente.

En la matriz Schedule\_method1 se muestra la solución proporcionada por este modelo. La matriz TTj1 muestra en la fila 1 el id de cada trabajo, en la fila 2 y 3 los instantes de inicio y completamiento esperados respectivamente.

Schedule\_method1 =

Columns 1 through 13

11	16	0	0	0	0	0
18	10	12	22	26	0	0
9	32	31	29	0	0	0
1	21	27	0	0	0	0
3	2	7	24	30	14	25
5	20	8	23	15	4	0
17	13	19	6	28	0	0

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



TTj1 = 1.0e+03 \*

Columns 1 through 8

0.0110	0.0180	0.0090	0.0010	0.0030	0.0050	0.0170	0.0130
0	0	0	0	0	0	0	0.2064
0.4923	0.3563	0.3549	0.2952	0.2237	0.2091	0.2064	0.6837

Columns 9 through 16

0.0200	0.0020	0.0210	0.0320	0.0100	0.0160	0.0070	0.0120
0.2091	0.2237	0.2952	0.3549	0.3563	0.4923	0.5327	0.6655
0.6669	0.5327	0.9842	0.7154	0.6655	1.8014	0.7479	0.9220

Columns 17 through 24

0.0080	0.0190	0.0310	0.0240	0.0230	0.0060	0.0300	0.0220
0.6669	0.6837	0.7154	0.7479	0.8709	0.8857	0.8964	0.9220
0.8709	0.8857	0.9724	0.8964	0.9874	1.0006	0.9790	1.0240

Columns 25 through 32

0.0290	0.0140	0.0270	0.0150	0.0280	0.0260	0.0040	0.0250
0.9724	0.9790	0.9842	0.9874	1.0006	1.0240	1.0370	1.0397
1.0692	1.0397	1.0489	1.0370	1.0438	1.0595	1.0457	1.0469

El valor de la función objetivo ( $C_{max}$ ) para esta solución es 1801,4 h.

**3.2.3.2 Modelo interrelacionado de producción y mantenimiento preventivo.**

Esta alternativa para enfrentar el problema de la integración producción – mantenimiento consiste en el diseño de dos modelos de optimización independientes, uno para la programación de la producción y otro para la programación del mantenimiento. En este modelo interrelacionado los instantes de inicio de PMs obtenidos de acuerdo a un programa óptimo de mantenimiento preventivo se insertan como restricciones al modelo de programación de la producción obtenido previamente, tal como en el método alternativo anterior. Los instantes de inicio de las intervenciones de PM ( $t_i^*$ ) para cada máquina se muestran en la Tabla 2. La matriz Schedule\_method2 muestra la solución de acuerdo a este modelo alternativo. Al igual que en el caso anterior la matriz TTj2 muestra el tiempo de inicio y de completamiento esperado de cada trabajo.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



Schedule\_method2 =

Columns 1 through 13

100	11	100	16	0	0	0	0
100	18	100	10	12	100	22	26
100	9	100	32	100	31	29	0
1	100	21	27	0	0	0	0
3	2	7	24	30	14	25	0
5	20	100	8	23	15	4	0
100	17	100	13	100	19	6	28

TTj2 = 1.0e+03 \*

Columns 1 through 8

0.0110	0.0180	0.0090	0.0010	0.0030	0.0050	0.0170	0.0130
0.0335	0.0335	0.0335	0	0	0	0.0273	0.2554
0.4400	0.3612	0.3570	0.2952	0.2237	0.2091	0.2281	0.7071

Columns 9 through 16

0.0200	0.0020	0.0210	0.0320	0.0100	0.0160	0.0070	0.0120
0.2091	0.2237	0.3308	0.3905	0.3947	0.4800	0.5327	0.6533
0.6669	0.5327	0.9814	0.6784	0.6533	1.4407	0.7479	0.8667

Columns 17 through 24

0.0080	0.0190	0.0310	0.0240	0.0230	0.0060	0.0300	0.0220
0.6942	0.7344	0.7118	0.7479	0.8888	0.9168	0.8964	0.9001
0.8888	0.9168	0.8956	0.8964	1.0007	1.0192	0.9790	0.9751

Columns 25 through 32

0.0290	0.0140	0.0270	0.0150	0.0280	0.0260	0.0040	0.0250
0.8956	0.9790	0.9814	1.0007	1.0192	0.9751	1.0484	1.0397
0.9670	1.0397	1.0426	1.0484	1.0575	1.0011	1.0569	1.0469

Para este segundo método alternativo se obtuvo  $C_{max} = 1440,7$  h.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

**3.2.3.3 Modelo integrado de producción y mantenimiento preventivo basado en la regla combinada r-LPT**

Este tercer método alternativo consiste en un modelo integrado donde el próximo trabajo a asignar será el que se encuentre disponible para iniciar su procesamiento en ese momento, y si hay más de uno se seleccionará el de mayor tiempo de procesamiento. Tal como en LPT, el trabajo a iniciar lo hará en la primera máquina disponible y no en la que logre un TCE menor para él. Mediante esta alternativa es posible analizar la factibilidad de la regla que se resume en la expresión 6 de HC, la cual constituye una de las diferencias de nuestra propuesta respecto a la regla de despacho LPT. La matriz `Schedule_method3` muestra la solución de acuerdo a este modelo alternativo. La matriz `TTj3` muestra los tiempos de inicio y de completamiento esperado de cada trabajo.

`Schedule_method3 =`

Columns 1 through 13

100	11	100	7	100	24	100	22	26
18	100	10	100	12	30	28	0	0
9	100	32	100	19	29	4	25	0
1	100	21	14	0	0	0	0	0
3	2	16	0	0	0	0	0	0
5	20	8	23	27	0	0	0	0
17	13	31	6	15	0	0	0	0

`TTj = 1.0e+03 *`

Columns 1 through 8

0.0110	0.0180	0.0090	0.0010	0.0030	0.0050	0.0170	0.0130
0.0335	0	0	0	0	0	0	0.2064
0.4400	0.3563	0.3549	0.2952	0.2237	0.2091	0.2064	0.6837

Columns 9 through 16

0.0200	0.0020	0.0210	0.0320	0.0100	0.0070	0.0160	0.0120
0.2091	0.2237	0.3308	0.3884	0.3898	0.4735	0.5327	0.6819
0.6669	0.5327	0.9814	0.6763	0.6484	0.7031	1.2772	0.8810

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



Columns 17 through 24

0.0080	0.0190	0.0310	0.0240	0.0230	0.0060	0.0300	0.0220
0.6669	0.7097	0.6837	0.7365	0.8709	0.8744	0.8810	0.9247
0.8709	0.9048	0.8744	0.8912	0.9874	0.9892	0.9935	1.0008

Columns 25 through 32

0.0290	0.0140	0.0270	0.0150	0.0280	0.0260	0.0040	0.0250
0.9048	0.9814	0.9874	0.9892	0.9935	1.0008	1.0019	1.0149
1.0019	1.0485	1.0497	1.0421	1.0464	1.0475	1.0149	1.0262

El valor de la función objetivo para este caso fue 1277,2 h

**3.2.3.4 Modelo integrado de producción y mantenimiento preventivo basado en la regla LPT**

Este método alternativo es similar a la heurística HC propuesta, con la diferencia de que no se evaluará el tiempo de completamiento esperado del trabajo considerado en cada máquina para luego seleccionar la máquina en la que esta variable resulte menor, sino que se programará el trabajo en la máquina que primero esté disponible. A diferencia del caso anterior (método alternativo 3) en este modelo se evaluará la conveniencia de retrasar el comienzo de un trabajo si este no puede concluir antes del reléase time del trabajo de mayor duración, tal como lo indica la expresión 6 de la heurística HC. Este modelo alternativo permite analizar el efecto de iniciar el siguiente trabajo en la máquina que proporcione el menor TCE para él y no en la primera máquina disponible. La estructura de la solución correspondiente a este cuarto método alternativo se resumen en las matrices Schedule\_method4 y TTj4.

Schedule\_method4 =

Columns 1 through 13

100	3	100	20	100	1	0	0	0
5	27	30	100	18	29	0	0	0
17	100	13	100	9	0	0	0	0
12	24	31	2	19	0	0	0	0
8	32	15	16	0	0	0	0	0
6	14	7	23	11	28	26	4	25
22	10	100	21	0	0	0	0	0

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



TTj = 1.0e+03 \*

Columns 1 through 8

0.0030	0.0050	0.0170	0.0120	0.0080	0.0060	0.0220	0.0100
0.0335	0	0	0	0	0	0	0.0763
0.2731	0.2242	0.2382	0.2036	0.1921	0.1048	0.0763	0.3378

Columns 9 through 16

0.0140	0.0070	0.0320	0.0240	0.0270	0.0130	0.0200	0.0210
0.1048	0.1672	0.1921	0.2036	0.3600	0.2716	0.3065	0.3651
0.1672	0.3913	0.4540	0.3601	0.4271	0.7900	0.8061	1.0110

Columns 17 through 24

0.0310	0.0230	0.0300	0.0150	0.0160	0.0110	0.0180	0.0020
0.3601	0.3913	0.4271	0.4540	0.5004	0.5060	0.5572	0.5441
0.5441	0.5060	0.5238	0.5004	1.2444	0.8906	0.8850	0.8808

Columns 25 through 32

0.0090	0.0010	0.0190	0.0290	0.0280	0.0260	0.0040	0.0250
0.8235	0.8396	0.8808	0.8850	0.8906	0.9310	0.9583	0.9670
1.1470	1.1470	1.0827	0.9674	0.9310	0.9583	0.9670	0.9746

Para este último método se obtuvo  $C_{max} = 1244,4$  h

#### 4. Análisis de los resultados

En la Tabla 3 se muestran los valores del makespan ( $C_{max}$ ) obtenidos mediante la aplicación de la heurística constructiva que integra la fase 1 de nuestra propuesta, los del algoritmo híbrido HC SA, así como los valores correspondientes a los 4 métodos alternativos definidos en la sección anterior. Puede observarse que el peor resultado se obtiene mediante la adopción de un escenario caracterizado por una total falta de integración producción mantenimiento (método alternativo 1 correspondiente a una política de mantenimiento correctivo). Como era de esperar, los métodos alternativos 3 y 4, correspondientes ambos a la generación de programas integrados de producción y mantenimiento preventivo, superan al método alternativo 2, a partir del cual se modela un escenario en el que se obtienen programas óptimos de producción y de mantenimiento preventivo pero de manera independiente, para luego insertar las

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

intervenciones de PM como restricciones dentro del programa de producción previamente definido, o sea, lo que se conoce como un modelo interrelacionado producción – mantenimiento.

Tabla 3. Valores de  $C_{max}$  correspondientes a cada uno de los métodos de programación integrada producción – mantenimiento preventive analizados en este trabajo.

Método	$C_{max}$ (h)
HC	1222,30
HCSA	1219,98
Método alternativo 1	1801,40
Método alternativo 2	1440,70
Método alternativo 3	1277,20
Método alternativo 4	1244,40

Finalmente, el resultado obtenido por nuestra propuesta demostró la efectividad de la integración frente a la alternativa de conseguir óptimos locales, así como la validez de las modificaciones propuestas sobre la regla de despacho LPT para enfrentar el carácter estocástico de nuestro problema. Aunque la fase 2 del algoritmo propuesto no logró una reducción significativa del  $C_{max}$  respecto al valor obtenido mediante la heurística constructiva que conforma la fase 1 del algoritmo el número de intervenciones preventivas se redujo en 4 lo cual se traduce en una disminución del costo total.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se abordó uno de los problemas más significativos que tienen lugar a nivel de piso de taller, relacionado con la necesidad de establecer programas integrados de producción y mantenimiento preventivo que contribuyan a reducir los inconvenientes provocados por la falta de integración que tradicionalmente ha caracterizado la gestión de ambas áreas. Para dar respuesta a esta problemática, en talleres con configuración productiva de máquinas paralelas idénticas, se desarrolló un método híbrido integrado, en una primera fase, por una heurística constructiva, la cual en su diseño hace uso del enfoque general que caracteriza la regla de despacho LPT, practicando algunas modificaciones que permiten tomar en consideración la naturaleza

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

estocástica del problema. En la segunda fase del método se busca mejorar la solución inicial mediante la adopción de un algoritmo de búsqueda local, en este caso recocido simulado.

Las investigaciones futuras se dirigen a la posibilidad de adoptar un enfoque multicriterio en el diseño de nuestra propuesta en el cual, además de minimizar el makespan, se consideren aspectos vinculados con el ahorro de la energía y la reducción de riesgos ambientales. Además de estas cuestiones resulta de interés abordar este estudio en otras configuraciones productivas tales como el job shop flexible.

#### Referencias bibliográficas

1. Anily, S., Bramel, J., Simchi-Levi, D. (1992). Worst-case analysis of heuristics for the Bin Packing Problem with general cost structures. *Operations Research*, Vol. 42, No. 2 (Mar. - Apr., 1994), pp. 287-298.
2. Baker K. R. *Introduction to Sequencing and Scheduling*. New York, John Wiley and Sons, 1974.
3. Boudjelida, A. (2017). On the robustness of joint production and maintenance scheduling in presence of uncertainties. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 1-16.
4. Chansombat, S., Pongcharoen, P., Hicks, Ch. (2018). A mixed-integer linear programming model for integrated production and preventive maintenance scheduling in the capital goods industry, *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2018.1459923
5. Coffman, E. G., Garey, M. R., Johnson, D. S. (1978). An application of Bin-Packing to multiprocessor scheduling. *SIAM J. COMPUT.* Vol. 7. No. 1 Pp. 1 – 17.
6. Da, W., Feng, H., Pan, E. (2016). Integrated preventive maintenance and production scheduling optimization on uniform parallel machines with deterioration effect. En *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). International Conference on*. IEEE, 2016. Pp. 951-955.
7. Gao X, Barabady J, Markeset T (2010) Criticality analysis of a production facility using cost importance measures. *Int J Syst Assur Eng Manage* 1:17–23.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



8. Gustafson, A.; Schunnesson, H.; Galar, D.; Kumar, U. Production and maintenance performance analysis: manual versus semi-automatic LHDs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 19 No. 1, 2013 pp. 74-88
9. Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M. (2012). Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 1.
10. Jing, Z., Hua, J., Zhu, Y. (2017). Multi-objective Integrated Optimization Problem of Preventive Maintenance Planning and Flexible Job-Shop Scheduling. *Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. DOI 10.2991/978-94-6239-255-7\_25.
11. Johnson, D. S., Demers, A., Ullman, J. D., Garey, M. R., Graham, R. M. (1974). Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms. *SIAM J. Comput.* Vol. 3, No. 4
12. Kumar, S.; Kumar – Lad, B. (2016). Integrated production and maintenance planning for parallel machine system considering cost of rejection. *Journal of the Operational Research Society*, 1 –13
13. Kumar, S.; Purohit, B, S.; Kumar, B, L. Integrated Approach for Job Scheduling and Multi-Component Maintenance Planning in a Production System. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014)
14. Lee, Ch, Y. (1991). Parallel machines scheduling with non-simultaneous machine available time, *Discrete Appl. Math.* 30 53–61.
15. Lee, Ch, Y. (1996). Machine scheduling with an availability constraint. *Journal of Global Optimization* 9: 395-416.
16. Lee, Ch, Y., He, Y., Tang, G. (2000). A note on “parallel machine scheduling with non-simultaneous machine available time”. *Discrete Applied Mathematics*. 100, 133–135
17. Lee, W., Ch.; Wu, Ch, Ch. (2008). Multi machine scheduling with deteriorating jobs and scheduled maintenance. *Applied Mathematical Modelling* 32, 362–373.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"



18. Mirabedini, S, N.; Iranmanesh, H. (2014). A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (PM). *Int J Adv Manuf Technol*. 70:1579–1589
19. Pinedo, M. L., (2012) *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. Cuarta edición. Springer. New York University. New York.
20. Ruiz, R.; García-Díaz, J.; Maroto, C. Considering scheduling and preventive maintenance in the flowshop sequencing problem. *Computers & Operations Research*, 2007, vol. 34, no 11, p. 3314-3330 [consulta: 2014-12-08], ISSN 0305-0548.
21. Tambe, P. P.; Kulkarni, M. S. (2013). A novel approach for production scheduling of a high pressure die casting machine subjected to selective maintenance and a sampling procedure for quality control. *Int J Syst Assur Eng Manag*.
22. Wang S and Liu M (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 37, Pp. 182–192.
23. Wang S, Liu M (2013). A branch and bound algorithm for single-machine production scheduling integrated with preventive maintenance planning. *Int J Prod Res* 51(3):847–868
24. Xu, D.; Sun, K.; Li, H. Parallel machine scheduling with almost periodic maintenance and non-preemptive jobs to minimize makespan. *Computers & Operations Research* 35 (2008) 1344 – 1349
25. Zahedi, Z; Salim, A. (2017). Integrating Preventive Maintenance Scheduling as Probability Machine Failure and Batch Production Scheduling. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, vol. 7, no 2, p. 105-112.

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"

II CONVENCION  
 CIENTIFICA  
 INTERNACIONAL

**2019**  
**UCLV**

Anexo 1. Tiempos de operación (h/entre fallos) del equipamiento productivo de la UEB Centroplast.

No.	TTI-130-1	TTI-130-2	TTI-300	IJ-300	EM -300	EM -480	JM -650
1.	493,62	809,54	314,83	1182,57	1833,15	765,15	2036,16
2.	836,58	863,99	724,92	2722,91	2220,9	1761,8	1600,33
3.	920,34	725,36	304,32	767,44	1189,64	496,56	1001,49
4.	494,76	811,41	315,56	1185,3	1837,38	766,92	1093,67
5.	155,04	754,27	298,89	371,43	1575,77	640,33	2098,3
6.	183,54	1.101,01	217,06	639,71	1681,61	284,5	2306,17
7.	896,04	969,51	571,5	2146,64	1327,61	1388,94	1048,98
8.	940,46	390,35	546,3	2030,05	2092,15	1542,86	1301,65
9.	400,64	829,05	327,97	980,67	2245,11	811,01	796,48
10.	402,42	1.659,97	256,67	1464,08	1994,46	623,79	1024,38
11.	546,24	903,83	257,05	1089,92	1914,46	381,69	1268,47
12.	625,86	326,41	399,18	1499,37	2324,25	970,14	1848,1
13.	392,16	1.023,14	250,12	1139,5	1456,36	607,88	1426,31
14.	262,20	630,01	167,23	628,15	1973,73	806,43	1061,97
15.	750,12	830,20	478,43	1397,06	2785,71	1162,75	361,37
16.	328,32	1.538,44	209,4	1300,00	1219,28	508,92	3657,9
17.	311,72	783,22	71,26	1088,50	1414,89	173,18	1932,2
18.	730,88	254,64	721,28	395,25	1199,73	1052,96	534,67
19.	597,36	1.079,67	381	1945,26	2218,41	925,96	1258,12
20.	165,30	571,09	305,43	1505,10	1613,87	856,23	1666,7
21.	579,80	130,87	550,9	984,50	1955,25	123,7	636,26
22.	515,28	845,06	328,65	588,68	2226,2	798,73	758,85
23.	499,32	418,88	318,47	1545,60	1818,8	773,99	1044,33
24.	728,10	878,08	847,07	1395,25	1574,25	1058,67	1495,55
25.	659,88	574,20	312,22	1450,60	2025,25	1487,9	1425,25
26.	650,16	582,26	31,99	285,85	1584,5	77,75	639,88
27.	241,68	1.396,36	154,15	240,36	1933,12	874,63	788,12
28.	916,56	1.003,16	384,59	1045,5	2025,25	1820,75	1667,8
29.	544,88	941,60	393,99	1455,75	1975,33	1029,67	1545,45
30.	420,66	689,88	268,3	1305,00	1875,25	652,06	961,26
31.	181,26	297,27	115,61	650,25	2200,5	880,97	1033,33
32.	506,16	830,10	322,83	593,66	1975,75	784,59	948,25
33.	248,52		158,51			585,23	1120,65
34.	886,24		584,15			2148,79	1235,66
35.	278,16		177,41			431,17	758,63
36.	245,10		156,33			379,93	
37.	93,48		359,62			144,9	
38.	705,66		450,07			1093,83	
39.	752,40		479,89			666,29	

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



Anexo 2. Tiempos de inactividad (h) debido a fallos del equipamiento productivo.

Nº.	TTI-130-1	TTI-130-2	TTI-300	IJ-300	EM -300	EM -480	JM -650
1.	106,21	114,18	52,78	51,09	16,41	31,48	66,60
2.	244,56	262,91	121,53	117,65	37,79	72,48	153,34
3.	68,93	74,1	34,25	33,16	10,65	20,43	43,22
4.	106,46	114,45	52,9	51,21	16,45	31,55	66,75
5.	33,36	35,86	16,58	16,05	5,15	9,89	20,92
6.	39,49	42,46	19,63	19,00	6,10	11,70	24,76
7.	192,81	207,27	95,81	92,75	29,79	57,14	120,89
8.	352,99	379,46	175,41	169,8	54,54	104,62	221,32
9.	43,17	46,41	21,45	20,77	6,67	12,80	27,07
10.	86,59	93,09	43,03	41,65	13,38	25,66	54,29
11.	52,98	56,96	26,33	25,49	8,19	15,70	33,22
12.	134,67	144,77	66,92	64,78	20,81	39,91	84,44
13.	84,38	90,71	41,93	40,59	13,04	25,01	52,91
14.	56,42	60,65	28,04	27,14	8,72	16,72	35,37
15.	161,41	173,51	80,21	77,64	24,94	47,84	101,20
16.	70,65	75,95	35,11	33,98	10,92	20,94	44,29
17.	24,04	25,84	11,95	11,56	3,71	7,12	15,07
18.	243,34	261,59	120,92	117,06	37,60	72,12	152,57
19.	128,54	138,18	63,88	61,83	19,86	38,09	80,59
20.	35,57	38,24	17,68	17,11	5,50	10,54	22,30
21.	17,17	18,46	8,53	8,26	2,65	5,09	10,77
22.	110,88	119,19	55,1	53,34	17,13	32,86	69,52
23.	107,44	115,5	53,39	51,68	16,60	31,84	67,36
24.	285,77	307,21	142,01	137,47	35,24	84,70	179,18
25.	206,54	222,04	102,64	124,26	15,66	61,21	188,36
26.	10,79	11,6	5,36	95,5	7,25	3,20	24,00
27.	52,00	55,9	25,84	100,8	38,33	15,41	16,25
28.	197,22	212,01	98,01	138,75	48,00	58,45	175,34
29.	267,87	287,96	133,11	30,33	39,27	79,39	225,00
30.	90,52	97,31	44,98	16,8	16,00	26,83	105,16
31.	39,00	41,93	19,38	135,25	24,00	11,56	23,80
32.	108,91	117,08	54,12	140,66	35,16	32,28	236,58
33.	53,48	57,49	26,57	85,75	20,80	15,85	145,36
34.	298,28		148,23			88,4	80,35
35.	59,85		29,74			17,74	98,25
36.	52,74		26,21			15,63	152,16
37.	20,11		10			5,96	
38.	151,84		75,46			45	
39.	161,90		80,45			47,98	
40.	116,87		3,41			2,04	

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCIUCLV 2019"



Anexo 3. Resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la distribución Weibull de la variable TBF por cada máquina.

TTI-130-1

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0708	A real	0,3045	P-value	0,9059
D crit	0,2178	A crit	0,7570		

TTI-130-2

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1264	A real	0,6900	P-value	0,1173
D crit	0,2360	A crit	0,7570		

TTI-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1121	A real	0,4659	P-value	0,0974
D crit	0,2178	A crit	0,7570		

IJ-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1265	A real	0,3943	P-value	0,3654
D crit	0,2360	A crit	0,7570		

EM-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0941	A real	0,4027	P-value	0,1648
D crit	0,2360	A crit	0,7570		

EM-480

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1062	A real	0,5673	P-value	0,2899
D crit	0,2178	A crit	0,7570		

JM-650

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1153	A real	0,5368	P-value	0,4060
D crit	0,2300	A crit	0,7570		

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
 "II CCI UCLV 2019"



Anexo 4. Resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la distribución Weibull de la variable TTR por cada máquina

TTI-130-1

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0863	A real	0,3051	P-value	0,3485
D crit	0,2150	A crit	0,7570		

TTI-130-2

K-S		A-D		Chi	
D real	0,1014	A real	0,3165	P-value	0,0666
D crit	0,2340	A crit	0,7570		

TTI-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0762	A real	0,2121	P-value	0,7998
D crit	0,2150	A crit	0,7570		

IJ-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0824	A real	0,4251	P-value	0,3372
D crit	0,2340	A crit	0,7570		

EM-300

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0917	A real	0,3184	P-value	0,0791
D crit	0,2340	A crit	0,7570		

EM-480

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0762	A real	0,2124	P-value	0,7998
D crit	0,2150	A crit	0,7570		

JM-650

K-S		A-D		Chi	
D real	0,0887	A real	0,4292	P-value	0,5125
D crit	0,2267	A crit	0,7570		

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"

II CONVENCION  
CIENTIFICA  
INTERNACIONAL  
**2019**  
**UCLV**

Información de contacto

[convencionuclv@uclv.cu](mailto:convencionuclv@uclv.cu)

[www.uclv.edu.cu](http://www.uclv.edu.cu)