

## Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía

*Metaheuristics: current trends and its applicability in ergonomics*

Mervyn Márquez Gómez

**Palabras Clave:** metaheurísticas, ergonomía, optimización.

**Key words:** metaheuristics, ergonomics, optimization.

### RESUMEN

Cuando los métodos convencionales no permiten darle solución a ciertos problemas de optimización, debido a la complejidad de los mismos, se debe recurrir al uso de métodos aproximados o heurísticos que permitan alcanzar soluciones buenas en un tiempo razonable. Por tal motivo, a lo largo de los años se han venido desarrollando y validando todo un conjunto de metodologías conocidas como metaheurísticas, para que guíen una heurística subordinada, combinando distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda. En el presente trabajo documental se realizan algunos planteamientos con relación a las características generales de las metaheurísticas, sus aplicaciones, sus tendencias actuales así como su posible aplicación en el área de la ergonomía. Al respecto se realizó una revisión de los artículos publicados en los últimos diez años en portales académicos reconocidos, encontrándose que los algoritmos genéticos constituyen la metaheurística más utilizada y el tipo de problema más tratado es el relacionado a la programación de tareas. Se planteó la posibilidad de emplear metaheurísticas en el abordaje de problemas de tipo ergonómico, en particular, en lo referente a clasificación de trabajos según el riesgo, determinación de relaciones entre tarea y riesgo, y desarrollo de soluciones de tipo administrativas.

### INTRODUCCION

En ocasiones, cuando se afrontan determinados problemas en el campo de la ingeniería industrial, no es suficiente con encontrar una solución, sino que es indispensable encontrar la mejor solución posible, o en otras palabras, optimizar. De esta forma, en ingeniería industrial y en especial en el área de investigación de operaciones, la optimización se refiere al proceso mediante el cual

### ABSTRACT

When conventional methods do not solve certain optimization problems, due to the complexity of it, approximate or heuristic methods must be used to achieve good solutions in a reasonable time. For this reason, over the years it has been developing and validating a set of methodologies known as metaheuristics, so they guide a subordinate heuristic by combining different concepts to explore and exploit the search space properly. In this documentary work some approaches are carried out in relation to the general characteristics of metaheuristics, their applications, their current trends as well as their possible application in the ergonomic area. In this respect a review of articles published in the last ten years in academic portals recognized was conducted, finding that genetic algorithms are the most commonly used metaheuristics and more treated problem type is the related programming tasks. It raised the possibility of using metaheuristics in ergonomic problems, in particular in relation to classification of works according to the risk, determining administrative relationships between task and risk, and development of solutions.

se trata de encontrar la mejor solución posible para un problema determinado, por lo general en un tiempo limitado, aunque coloquialmente se le ha utilizado de forma imprecisa como significado de "hacerlo mejor" (Duarte, 2007; Martí, 2003). En un problema de optimización se presentan diferentes soluciones y algún criterio para discriminar entre ellas, en otras palabras, se busca maximizar o minimizar una función objetivo, sujeta a restricciones.

En este sentido, a lo largo de los años se han venido creando todo un conjunto de herramientas o técnicas que permiten facilitar ese proceso de búsqueda de la mejor solución. No obstante, en la medida en que los problemas crecen en complejidad, algunas herramientas comienzan a perder utilidad y ni siquiera pueden generar soluciones válidas; por lo que deben darle paso a otros métodos que aun cuando no logren alcanzar la mejor solución, ofrecen la posibilidad de obtener buenas soluciones; tal es el caso de los métodos heurísticos y las metaheurísticas.

En las secciones siguientes se expone los resultados de una revisión documental realizada en el campo de las metaheurísticas, en primer lugar, se señalan algunos aspectos generales relacionados al concepto de los métodos heurísticos y las metaheurísticas, su clasificación y sus principales aplicaciones. Además, se refieren algunas de las tendencias más importantes que se vienen experimentando en los últimos años con relación al tema de las metaheurísticas, así como algunos planteamientos vinculados a la posibilidad de su adecuación e implementación para resolver ciertas situaciones asociadas al área de la ergonomía.

## METODOLOGÍA

En el presente trabajo documental se llevó a cabo una revisión de los artículos publicados durante los últimos diez años (desde el 2003 hasta el 2012) en directorios de acceso abierto (Open Access) tales como SciELO (Scientific Electronic Library Online), DOAJ (Directory of Open Access Journals), Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), e-Revistas (Plataforma Open Access de Revistas Científicas Electrónicas Españolas y Latinoamericanas) y Dialnet (Portal bibliográfico de acceso libre de la Universidad de la Rioja, España), así como en ProQuest (Portal de servicio de información perteneciente al Cambridge Information Group, con sede en Michigan).

Las palabras clave utilizadas para las respectivas búsquedas fueron metaheurística(o), heurística(o),

metaheuristic y heuristic, y se seleccionaron aquellos trabajos con una orientación enfocada a la aplicación de las metaheurísticas en campos de la ingeniería industrial o afín; obteniéndose 340 referencias de texto completo. Una vez revisados, los artículos fueron clasificados de acuerdo al tipo o tipos de metaheurísticas utilizadas, y de acuerdo al tipo de problema abordado.

## REVISIÓN Y DISCUSIÓN

### Métodos heurísticos

El término heurístico (o heurística) proviene del griego *heuriskein*, que significa hallar ó inventar; en este sentido la Real Academia Española (2012) lo define como técnica de la indagación y del descubrimiento; o como la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, es decir, reglas empíricas. En ciencia, la idea más genérica del término heurístico está vinculada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales empleando el conocimiento disponible, aunque en investigación de operaciones se usa el calificativo como contraposición a exacto (Melián et al., 2003).

Justamente sobre estas premisas se fundamentan la mayoría de conceptos dados a los métodos heurísticos. Maroto et al. (2002) lo define como las técnicas o procedimientos informales para resolver problemas, basados en la creatividad, la intuición, el conocimiento o la experiencia para hallar buenas soluciones o mejorar una existente; además, agregan que los mismos surgen como la única alternativa en aquellos casos cuyos modelos son muy complejos o intratables desde el punto de vista de los medios computacionales disponibles.

Al respecto, ya a finales de la década de los 80, Gould y Eppen (1987) explicaban que un problema podía ser tan complejo que el modelo diseñado para resolverlo no podía afrontarse mediante los métodos tradicionales; lo cual se presenta por la conjunción de dos circunstancias: un modelo "demasiado grande, no lineal en extremo o demasiado complejo en el aspecto lógico" (p.664), unido a la imposibilidad de recurrir al empleo de supuestos simplificadores o aproximaciones que hicieran el problema más manejable, debido a que

se destruiría demasiado la estructura del problema, alejándolo de la realidad. A este tipo de problemas difíciles de resolver se les denota como NP-hard en el contexto de la complejidad algorítmica.

Por su parte, Hillier y Lieberman (2010) explican que con frecuencia, los métodos heurísticos se refieren a un algoritmo iterativo novedoso, diseñado para abordar un determinado problema y no necesariamente a una gran cantidad de aplicaciones. Dentro de ese procedimiento, cada iteración supone la búsqueda de una nueva solución que eventualmente pudiera ser mejor que una solución encontrada previamente, repitiéndose durante un tiempo razonable.

Una característica fundamental de los métodos heurísticos es que mediante su utilización no se garantiza la solución óptima al problema en cuestión, sino más bien una solución factible muy buena, por lo que los métodos heurísticos se convierten en soluciones ad hoc que buscan más satisfacer que optimizar; de hecho, Martí (2003) acuña que muchos de los métodos heurísticos se han desarrollado para darle solución a un determinado tipo de problema, quedando prácticamente inhabilitados para su aplicación a otros problemas similares. Los métodos heurísticos proporcionan entonces soluciones heurísticas. De allí que, tal como lo plantea Luna (2008) las técnicas de optimización pueden ser de tipo exactas y aproximadas, encontrándose en estas últimas los métodos de naturaleza heurística.

Cuando se desarrollan algoritmos heurísticos, es importante evaluar que el mismo sea eficiente (esfuerzo computacional realista), bueno (solución cercana al óptimo) y robusto (baja probabilidad de obtener una mala solución), para lo cual se pueden emplear procedimientos tales como: comparación con la solución óptima, comparación con una cota, comparación con un método exacto truncado, comparación con otros heurísticos y análisis del peor caso (Martí, 2003).

Debido a la naturaleza tan diversa de los métodos heurísticos, Martí (2003) señala que resulta difícil dar una clasificación completa de los mismos, y más bien plantea un conjunto de categorías, no

excluyentes, en las que se pudieran ubicar los principales métodos desarrollados. Estas son:

1. Métodos de descomposición: el problema se descompone en subproblemas más fáciles de resolver.

2. Métodos inductivos: busca generalizar propiedades o técnicas identificadas de casos más pequeños y sencillos, al problema complejo o general.

3. Métodos de reducción: tienen como propósito restringir o reducir el espacio de soluciones, simplificando así el problema.

4. Métodos constructivos: se basan en la construcción progresiva de una solución del problema, mediante la selección de la mejor opción en iteraciones sucesivas. Dentro de ellos se pueden mencionar: heurísticos del vecino más próximo, heurísticos de inserción, heurísticos basados en árboles generadores, y heurísticos basados en ahorros.

5. Métodos de búsqueda local: se caracterizan por iniciar con una solución del problema, la cual debe ser mejorada progresivamente a lo largo del procedimiento. Dentro de esta categoría se pueden mencionar: procedimientos de dos intercambio, procedimientos de k intercambio y algoritmo de Lin y Kernighan.

6. Métodos combinados: De todos los métodos mencionados hasta el momento, los métodos constructivos y los métodos de búsqueda local merecen especial atención, debido a que su combinación ha permitido el surgimiento de nuevos métodos heurísticos, llamados métodos combinados y que constituyen el eslabón entre los métodos heurísticos y las metaheurísticas. Dentro de estos métodos combinados se pueden mencionar: procedimientos aleatorizados, métodos multi-arranque y GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures).

No obstante, Rodríguez (2010) sugiere otra división para los métodos heurísticos, a los que denomina también algoritmos aproximados, procedimientos inexactos o simplemente heurísticas; de esta forma, propone clasificarlos en métodos constructivos y métodos de búsqueda. Los primeros, definidos como métodos que son

capaces de construir una solución a un problema dado, en función a distintas estrategias tales como: voraz, de descomposición, de reducción y de manipulación del modelo. Mientras que los métodos de búsqueda parten de una solución factible dada y a partir de ella se intenta mejorarla. Como se aprecia, esta clasificación no es más que una estructuración diferente de la presentada por Martí (2003), donde más bien se intenta discriminar entre método y estrategia.

### Metaheurísticas

Una metaheurística "es un método de solución general que proporciona tanto una estructura general como criterios estratégicos para desarrollar un método heurístico específico que se ajuste a un tipo particular de problema" (Hillier y Lieberman, 2010, p. 598). La metaheurística nace con el propósito de evitar tener que comenzar de cero cada vez que se presente un problema cuyo modelo no puede ser tratado por los métodos convencionales, para encontrar una solución óptima. De acuerdo con estos autores, la principal ventaja de una metaheurística bien diseñada, es que permite moverse relativamente rápido hacia soluciones muy buenas, proporcionando una forma muy eficiente de resolver problemas complicados. Entre tanto, la principal desventaja es que no existe garantía de que la mejor solución que se obtenga, sea una solución óptima o incluso que esté cerca de serlo.

Por su parte, para Herrera (2009) las metaheurísticas son algoritmos aproximados de propósito general que consisten en procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada, combinando distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda. En otras palabras, tal como lo explica Martí (2003), los procedimientos metaheurísticos conceptualmente se ubican por encima de los métodos heurísticos, dado que guían su diseño para la resolución de problemas difíciles de optimización combinatoria, en los cuales los métodos clásicos no son efectivos. Las metaheurísticas combinan diferentes conceptos de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los

mecanismos estadísticos (Osman y Kelly, citados en Martí, 2003) y suelen basarse en los métodos heurísticos constructivos y de búsqueda local mencionados anteriormente. En este sentido, Rodríguez (2010) plantea que las metaheurísticas combinan ideas que provienen de cuatro campos de investigación diferentes: de las técnicas de diseño de algoritmos que resuelven una colección de problemas, de los algoritmos específicos dependientes del problema a resolver, de fuentes de inspiración del mundo real, y de métodos estadísticos.

Generalmente, la creación de métodos heurísticos es un proceso que conjuga dos características opuestas fundamentales: la intensificación (explotación del espacio) referida al esfuerzo empleado en la búsqueda en la región actual, y la diversificación (exploración del espacio) vinculada al esfuerzo empleado en la búsqueda en regiones distantes del espacio; por lo que debe buscarse el equilibrio entre ambas, para lograr buenas soluciones en poco tiempo (Herrera, 2009).

En la actualidad se conocen varias metaheurísticas que se han desarrollado exitosamente en la resolución de determinados problemas, tales como: los algoritmos voraces, la ascensión de colinas, el recocido simulado, colonias de hormigas, algoritmos de enjambre, la búsqueda tabú, los algoritmos genéticos, los algoritmos meméticos, entre otros.

No obstante, aunque suele ser una tarea poco sencilla, algunos autores han recopilado algunas formas en las que se pudieran clasificar las metaheurísticas; en este sentido autores como Duarte (2007) o, Blum y Roli (2003) presentan las siguientes taxonomías clásicas:

1. Atendiendo a la inspiración:

a. Natural: se basan en un símil real (biológico, social, cultural)

b. Sin inspiración: se obtienen directamente de sus propiedades matemáticas

2. Atendiendo al número de soluciones:

a. Poblacionales: buscan el óptimo a través de un conjunto de soluciones

b. Trayectoriales: trabajan con una solución que mejoran iterativamente

3. Atendiendo a la función objetivo:

a. Estáticas: no hacen ninguna modificación sobre la función objetivo del problema

b. Dinámicas: modifican la función objetivo durante la búsqueda

4. Atendiendo a la vecindad:

a. Una vecindad: utilizan exclusivamente una estructura de vecindad

b. Varias vecindades: modifican la estructura de vecindad

5. Atendiendo al uso de memoria:

a. Sin memoria: se basan exclusivamente en el estado anterior

b. Con memoria: utilizan una estructura de memoria para recordar la historia pasada

Por su parte, Herrera (2009) presenta una posible forma de clasificación de las metaheurísticas:

1. Basadas en métodos constructivos: las cuales parten de una solución inicial vacía y se van agregando componentes hasta construir una solución. En este grupo se pueden mencionar: GRASP, optimización basada en colonias de hormigas.

2. Basadas en trayectorias: utilizan como heurística subordinada cualquier algoritmo de búsqueda local, que sigue una trayectoria en el espacio de búsqueda, mediante iteraciones que tratan de remplazar una solución inicial por otra de mejor calidad. Allí se encuentran: búsqueda local, templado simulado, búsqueda tabú, búsqueda local iterativa, entre otras.

3. Basadas en poblaciones: el proceso contempla múltiples puntos de búsqueda en el espacio, que evolucionan en paralelo. Dentro de ellas están: algoritmos genéticos, algoritmos meméticos, algoritmos basados en nubes de partículas, búsqueda dispersa, entre otros.

Melián et al. (2003) más bien las clasifican en función del tipo de procedimientos a los que se refiere, asemejándose más a la categorización de los métodos heurísticos presentada anteriormente. De esta forma, mencionan que los tipos fundamentales son las metaheurísticas para los métodos de relajación, las metaheurísticas para los procesos constructivos, las metaheurísticas para las búsquedas por entornos y las metaheurísticas para

los procesos evolutivos, y señala como otros tipos intermedios, las metaheurísticas de descomposición y las de memoria a largo plazo. En la Tabla 1 se resumen las diferentes formas de clasificar las metaheurísticas de acuerdo a los autores citados.

Por otro lado, no debe dejarse de mencionar las metaheurísticas inspiradas en distintos fenómenos de la naturaleza tales como las redes neuronales, las colonias de hormigas, las bandadas de aves o bancos de peces, los cuales han dado origen a metaheurísticas como las redes neuronales artificiales, los sistemas de hormigas, o la optimización de partículas inteligentes.

Tabla 1. Formas de clasificación de las metaheurísticas

Criterio	Tipo de Metaheurística
Fuente de inspiración	Fenómenos naturales Sin inspiración
Cantidad de soluciones	Poblacional Trayectorial
Función objetivo	Estática Dinámica
Cantidad de vecindades	Una vecindad Varias vecindades
Uso de memoria	Sin memoria Con memoria
Estrategia seguida	Método constructivo Basada en trayectorias Basada en poblaciones
Tipo de procedimientos referidos	Para métodos de relajación Para procesos constructivos Para búsquedas por entorno Para procesos evolutivos De descomposición De memoria a largo plazo

Como se puede apreciar, no existe una clasificación rigurosa ni totalmente aceptada respecto a la gran diversidad de metaheurísticas desarrolladas, las cuales presentan diferencias en cuanto a su naturaleza, estrategia seguida, estructuración, o número de soluciones consideradas a la vez; lo que hace que en algunos casos las categorías planteadas no sean excluyentes, permitiendo que un mismo método pudiera incluirse en más de una categoría. Además, como ya se ha planteado la esencia de la metaheurística es guiar el desarrollo de métodos heurísticos que permitan darle solución a un problema determinado, y facilitar la toma de decisiones.

### Principales aplicaciones

Las metaheurísticas, tradicionalmente se han venido utilizando e implementando en la resolución de problemas de optimización combinatoria, definidos por Martí (2003) como aquellos problemas de optimización caracterizados por presentar un conjunto amplio de posibles soluciones, en los que resulta prácticamente imposible evaluar todas las soluciones para hallar la solución óptima.

Debido a su similitud con diferentes situaciones, con el transcurrir de los años se han venido popularizando un conjunto de problemas de optimización combinatoria ampliamente aplicables en determinados contextos. Dentro de estos problemas clásicos o estructurados, señalados por autores como Duarte (2007) y Martí (2003), se encuentran el problema del viajante de comercio o agente viajero, el problema de la mochila, el problema de la ordenación lineal, el problema de asignación cuadrática, el problema del cubrimiento o empaquetado de conjuntos, o el problema de enrutamiento de vehículos, por nombrar los más comunes.

No obstante, éstos no son los únicos problemas, sino que por el contrario se pueden identificar fácilmente una gran cantidad de problemas de optimización tanto en la ciencia como directamente en la industria. En la Ingeniería Industrial es común encontrarse ante situaciones que exigen determinar camino más corto, plan de mínimo costo, asignación óptima, secuencia óptima, distribución de recursos a mínimo costo, entre otros (Herrera, 2009).

En la revisión documental efectuada, se obtuvo que el tipo de problema más común está referido a la programación o secuenciación de operaciones de producción (scheduling) y sus derivaciones, el cual fue

tratado en el 29,1% de los casos. Resalta dentro de este grupo los casos de secuenciación en configuraciones de producción tipo Job Shop o taller, caracterizados por producir pequeños lotes de una variedad amplia de productos.

El enrutamiento de vehículos en sus diferentes versiones fue analizado en el 17,6% de los artículos consultados y constituye el segundo tipo de problema más repetitivo, y no sólo incluye la distribución a nivel industrial, sino casos de flota de buses escolares y servicios de recolección. En tercer lugar figura el problema de asignación de recursos con un 8,5%; mientras que problemas como el clásico agente viajero y la localización de plantas fueron abordados en el 5,0% de los casos.

Se pueden mencionar otros tipos de casos o problemas como distribución en planta, clasificación, empaquetamiento, elaboración de horarios, productividad, inventarios, entre otros. Así mismo, cabe reseñar que algunos de los trabajos revisados no abordaron problemas o casos reales sino ejemplos o problemas hallados en la literatura y que permiten validar nuevas estrategias o parámetros.

### Tendencias actuales

Como resultado de la revisión de los artículos consultados, fue posible detectar que en los últimos diez años ha prevalecido el uso de los algoritmos bioinspirados como método de resolución de problemas de optimización, tal como se muestra en la Tabla 2. Allí se señala el porcentaje de artículos (sobre la base de 340 trabajos) en los que fue utilizada una determinada metaheurística, bien de forma individual o en combinación con otra.

Tabla 2. Relación de artículos por tipo de metaheurística utilizada

Metaheurística	Siglas en inglés	Cantidad	Porcentaje
Algoritmos genéticos / Algoritmos evolutivos	GA / EA	92	27,1
Búsqueda tabú	TS	76	22,4
Optimización por colonia de hormigas	ACO	51	15,0
Recocido simulado	SA	50	14,7
Procesos aleatorizados y adaptativos de búsqueda voraz	GRASP	40	11,8
Búsqueda de vecindad variable	VNS	29	8,5
Búsqueda local	LS	19	5,6
Optimización por enjambre de partículas	PSO	17	5,0
Búsqueda dispersa	SS	16	4,7
Colonia artificial de abejas	ABC	10	2,9
Redes neuronales artificiales	ANN	8	2,4
Búsqueda armónica	HS	5	1,5
Algoritmos meméticos	MA	4	1,2
Algoritmo de la luciérnaga	FF	3	0,9
Otras metaheurísticas		9	2,6

De esta forma, resalta en primer lugar el uso de los algoritmos genéticos (GA) como la metaheurística preferida por los investigadores; la misma fue utilizada en el 27,1% (92) de los casos. El tipo de problema que ha sido abordado de forma más repetitiva por los algoritmos genéticos es el de programación de la producción, específicamente en lo referente a la asignación y secuenciación de las operaciones del proceso, tanto en sistemas de producción tipo taller como en líneas de producción. En este sentido se pueden reseñar trabajos como los de Correa et al. (2008), D'Armas (2010), Debels y Vanhoucke (2007), Magalhães (2009), Mateo y D'Armas (2008), Ramírez et al. (2009), Ramírez et al. (2011), Taheri y Zomaya (2009), Toro et al. (2006), y Zinflou et al. (2010).

En segundo lugar, como las metaheurísticas más recurrentes en los trabajos consultados, se encuentra la búsqueda tabú (TS), figurando en el 22,4% (76) de las investigaciones. Al igual que en el caso de los GA, también se ha empleado tanto de forma individual como en combinación con otras metaheurísticas, para tratar problemas de diferente índole, aunque resaltan los casos de enrutamiento de vehículos, secuenciación o programación de la producción y localización de instalaciones (Caramia y Giordani, 2009; Gagné et al., 2005; Hernández et al., 2006; Li et al., 2009; Liu y Koza, 2012; Martins et al., 2003; Moreno et al., 2005; Wassan et al., 2008).

La optimización por colonia de hormigas (ACO) constituye la tercera metaheurística más utilizada en los artículos encontrados, tal como lo refleja el 15,0% (51) de las referencias. En este caso, los problemas más recurrentes siguen siendo el de secuenciación o programación, enrutamiento de vehículos y el agente viajero (Allaoua y Gasbaoui, 2009; Ke et al., 2010; Li et al., 2009; Merkle y Middendorf, 2003; Sadjadi et al., 2008; Surekha, 2010; VAsko et al., 2011). Esta metaheurística pertenece a la categoría de los algoritmos bioinspirados que buscan replicar fenómenos o comportamientos de la naturaleza para la solución de problemas cotidianos, y la misma está inspirada en el comportamiento que siguen las hormigas al momento de buscar sus alimentos.

Seguidamente, con 14,7% y 11,8% de artículos, continúan el recocido simulado (SA) y los procesos aleatorizados y adaptativos de búsqueda voraz (GRASP), respectivamente (Baesler et al., 2008; Barros y Moccellini, 2003; Bautista et al., 2008; Bermeo y Calderón, 2009; Escobar et al., 2011; Hernández et al., 2011; Peixoto y Barbieri, 2011).

La práctica de combinar dos o más metaheurísticas como estrategia para alcanzar mejores soluciones en tiempos más cortos se ha venido convirtiendo en una importante tendencia para resolver diversos problemas de optimización. Al respecto, en la revisión efectuada se hallaron 57 trabajos (16,8%) que incluyen metodologías híbridas o hibridación, es decir, se incorpora una metaheurística como apoyo a otra metaheurística principal, por lo general para formar la población inicial y así reducir el tiempo que implica arrancar con una población al azar; tal es el caso de Báez et al. (2008) quienes utilizaron ANN para la generación de los valores iniciales que luego serán mejorados mediante GA.

Así mismo, otro ejemplo de hibridación es la estrategia implementada por Toro y Granada (2005) para resolver un problema de asignación generalizada, la cual consistió en abordar la etapa de mutación del GA a través del SA. Por su parte, González y González (2007) probaron una metaheurística híbrida para la solución de un problema de enrutamiento de vehículos, la cual consiste en utilizar un algoritmo genético para conformar clústeres de los clientes, seguido de un algoritmo de búsqueda tabú para hallar la ruta dentro de cada clúster, encontrando mejoras hasta de un 23% respecto al empleo de sólo GA.

Soto et al. (2008) abordaron el problema de enrutamiento de vehículos mediante una metaheurística híbrida conformada por GA para clasificar y ACO para optimizar localmente cada sub-ruta, obteniendo soluciones cercanas a las óptimas conocidas.

Otra tendencia importante de mencionar en el tema de las metaheurísticas es la de paralelismo o paralelización, referida al uso compartido y simultáneo de recursos computacionales, de forma que se puedan ejecutar tareas pequeñas de un

problema más grande en varios computadores o procesadores, en especial en aquellos problemas intensivos en tiempos de cómputo y en requerimientos de memoria. Su ventaja viene dada además por la posibilidad de utilizar diferentes estrategias y valores de los parámetros de forma simultánea, para lograr una mayor diversidad y exploración del espacio de búsqueda (Lüer et al., 2009; Alfonso et al., 2010).

Para Alfonso et al (2010) el paralelismo junto a la hibridación constituyen dos de las ramas más exitosas para la construcción de algoritmos eficientes. La mezcla de ambas estrategias, es decir, utilizar modelos paralelos donde se usan diferentes procedimientos de búsqueda para explorar el espacio de soluciones, da origen a una metaheurística heterogénea paralela.

No obstante, aun cuando muchos investigadores continúan transitando en el camino del desarrollo de las metaheurísticas, bien por la creación de nuevos algoritmos o mediante el perfeccionamiento de los ya existentes, ha surgido un nuevo concepto que trasciende al de las metaheurísticas en cuanto a la búsqueda de solución de problemas complejos; se trata de las denominadas hiperheurísticas, definidas como métodos que inteligentemente controlan la selección de la heurística subordinada que debiera ser aplicada en cada punto de decisión dependiendo de sus características y de la región del espacio de solución en estudio, mediante un mecanismo de aprendizaje. De esta forma, las hiperheurísticas buscan superar la desventaja de

replicabilidad que tienen las metaheurísticas, pretendiendo así mayor vinculación entre la calidad de la solución y la rapidez de la implementación y la ejecución (Garrido, 2006).

El mismo autor menciona que las hiperheurísticas pueden incluir métodos sin aprendizaje, con aprendizaje, basadas en razonamiento y con aprendizaje incremental. Algunas de las hiperheurísticas utilizando metaheurísticas son la búsqueda tabú incremental, algoritmos genéticos evolucionados, sistema de hormigas, recocido simulado incremental, entre otras.

El papel de las metaheurísticas en la ergonomía

A pesar de que en el campo de la ingeniería industrial, las metaheurísticas se han venido aplicando y relacionando principalmente a la resolución de problemas del área de la administración de la producción y las operaciones, específicamente en temas como la planificación y programación de tareas, localización, distribución en planta, y la distribución y abastecimiento de mercancía; es posible darle otras aplicaciones con fines distintos, aunque en esencia se pueda tratar de derivaciones de los mismos problemas clásicos. Tal es el caso del área de la ergonomía en la que las metaheurísticas pudieran realizar importantes contribuciones que permitan darle solución a ciertas situaciones problemáticas. Al respecto, en la revisión documental efectuada se encontraron tres referencias (del mismo autor principal) en las que se realizaron planteamientos ergonómicos y cuyo abordaje se llevó a cabo mediante metaheurísticas (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Trabajos relacionados con ergonomía

Autor	Metaheurística utilizada	Objetivo
Asensio (2009)	Algoritmos genéticos (GA)	Generar y evaluar agendas de rotación que consideren, simultáneamente, múltiples factores de riesgo relacionados con los trastornos músculo-esqueléticos
Asensio et al. (2010)	Redes neuronales artificiales (ANN)	Predecir el riesgo de padecer trastornos músculo-esqueléticos asociado a puestos de trabajo con tareas de levantamiento de carga
Asensio y Diego (2011)	Algoritmos genéticos (GA)	Obtener agendas de rotación que permitan prevenir trastornos músculo-esqueléticos en entornos caracterizados por la repetitividad de movimientos



En el primer trabajo referido, Asensio (2009) desarrolló una metodología basada en algoritmos genéticos para generar agendas de rotación orientadas a reducir los tiempos de exposición de los trabajadores, a determinados factores de riesgo relacionados a trastornos músculo-esqueléticos y por consiguiente prevenir la aparición de los mismos. Las agendas o planes de rotación pertenecen a los denominados problemas de horarios y secuenciación, ampliamente analizados mediante técnicas metaheurísticas, por considerarse como un problema de optimización complejo.

Una característica importante en la metodología propuesta por Asensio (2009) es la consideración de múltiples factores que pueden afectar una correcta asignación de los trabajadores a los puestos de trabajo, incluyendo restricciones de tipo individual u organizacional, por lo que, no sólo se estaría buscando la prevención de lesiones músculo-esqueléticas, sino además mejora de las condiciones psicosociales, facilitar la formación de los trabajadores, facilitar la reincorporación de trabajadores lesionados y mejorar la productividad. Para la validación del modelo, por no encontrarse trabajos similares para su contrastación, se procedió a una validación experimental mediante su aplicación sobre un caso específico. Los resultados encontrados sugieren eficiencia de la metodología en el proceso de diseño ergonómico de agendas de rotación.

En el segundo trabajo publicado por Asensio et al (2010) se propone el desarrollo de una red neuronal artificial (ANN) con fines de clasificación. Se busca predecir el riesgo de que un trabajador padezca trastornos musculoesqueléticos en la parte baja de la espalda (LBDs por sus siglas en inglés) en puestos de trabajo que implique la realización de tareas con levantamiento de cargas. De esta forma el rol de la ANN es el de clasificar los puestos de trabajo en dos grupos: los que representan un riesgo alto de provocar LBDs y los que representan un riesgo bajo. Así, los ergónomos podrán contar con mejor información al momento de realizar diagnósticos de los riesgos y tomar las medidas respectivas.

La ANN desarrollada en este caso se caracterizó por contar con un elevado número de conexiones que pudieran relacionar las características de la tarea con el riesgo de provocar LBDs; se emplearon tres capas ocultas en las que sus neuronas además de conectarse con las neuronas de la capa siguiente, podían saltar sobre ella y conectarse con neuronas de capas posteriores, estrategia que, de acuerdo a los autores, permitió que la red se entrenara más rápido. En general, fueron entrenadas redes con 7, 8 y 9 neuronas en la primera capa oculta, 5, 6 y 7 en la segunda, 3 en la tercera y 1 en la capa de salida de la red. La red que arrojó los mejores valores en cuanto a la proporción de puestos de trabajo correctamente clasificados fue la compuesta por capas ocultas de 8, 6 y 3 neuronas respectivamente, la cual contenía 197 conexiones neuronales. Los resultados del trabajo de Asensio et al (2010) arrojaron una precisión mayor que el de otros trabajos previos, alcanzando el 81,6% de clasificaciones correctas.

Por su parte, en el tercer trabajo presentado por Asensio et al (2011) se plantea el uso de algoritmos genéticos (GA) para afrontar el problema de obtener agendas de rotación que permita a los trabajadores disminuir la exposición a tareas con niveles altos de repetitividad de movimientos, como es el caso de las líneas de producción. La importancia del uso de la metaheurística radica en la complejidad que puede llegar a tener el problema debido a la cantidad de rotaciones requeridas y el número de puestos de trabajo a considerar.

El algoritmo desarrollado fue denominado ROTOCRA (Rotación ergonómica basada en OCRA) y busca aprovechar la eficacia de optimización de los GA con la capacidad de diagnosticar riesgos por movimientos repetitivos que ofrece el método de evaluación ergonómica OCRA, y el mismo se probó en un caso formado por 14 puestos de trabajo con niveles de riesgo desde alto hasta bajo, y en el cual se presentan algunos trabajadores con limitaciones de rotación. Luego de ejecutar el algoritmo diez veces, fue posible encontrar soluciones factibles para cada ejecución, cumpliendo con cada restricción dada y

evitando la sobreexposición de los trabajadores a niveles altos de riesgo por repetitividad.

Como se puede apreciar en los casos mencionados anteriormente, las metaheurísticas pueden jugar un papel importante como apoyo a la labor de los ergónomos, tanto en la clasificación de tareas con diferentes tipos de riesgo ergonómico, como en la búsqueda de soluciones organizacionales que permitan disminuir la exposición a determinados tipos de riesgo.

En general, de acuerdo a la Asociación Internacional de Ergonomía (IEA, 2010), se pueden mencionar tres grandes dominios o niveles de acción de la ergonomía: física, cognitiva y organizacional. La ergonomía física se refiere a las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas humanas relacionadas con la actividad física (incluyen posturas de trabajo, manejo de materiales, movimientos repetitivos, trastornos músculo esqueléticos relacionados con el trabajo, diseño del lugar de trabajo). La ergonomía cognitiva se refiere a procesos mentales tales como la percepción, la memoria, el razonamiento y la respuesta motora, que afectan a las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema (incluyen carga de trabajo mental, toma de decisiones, habilidad en el desempeño, interacción hombre-máquina). La ergonomía organizacional se refiere a la optimización de sistemas socio-técnicos,

incluyendo sus estructuras organizativas, políticas y procesos (incluyen comunicación, administración del recurso humano, diseño del trabajo, diseño de tiempos de trabajo, trabajo en equipo, diseño participativo).

De esta forma, en la Tabla 4 se sintetizan algunas aplicaciones de las metaheurísticas en la ergonomía, de acuerdo a su nivel de actuación. Como se puede apreciar, dentro de las metaheurísticas que pudieran implementarse para abordar las situaciones planteadas, resaltan GA, ANN, SA, TS y ACO, cuya implementación dependerá del tipo de problema a resolver y de la preferencia del investigador, dado su dominio sobre algún método en particular; inclusive es factible recurrir a estrategias de hibridación, como por ejemplo, utilizando GA para optimizar los pesos de una ANN, o utilizando SA para generar la población inicial en un GA.

No obstante, es importante señalar que soluciones de tipos administrativas u organizacionales tales como la rotación en el trabajo o el establecimiento de pausas, no deben responder al primer nivel de solución en los problemas ergonómicos, sino que deben implementarse en aquellos puestos en los que el nivel de riesgo no puede ser disminuido mediante soluciones de ingeniería o intervenciones ergonómicas, bien sea por limitaciones técnicas, económicas o del mismo sistema productivo.

Tabla 4. Posibles aplicaciones de las metaheurísticas en la ergonomía

Nivel de actuación	Aplicación	Metaheurística recomendada
Ergonomía física	Clasificación de puestos de trabajo o tareas de acuerdo al tipo de riesgo físico asociado	ANN o híbrida
	Determinación de la relación entre las características del puesto de trabajo y exigencias físicas de las tareas con trastornos músculo-esqueléticos	ANN, ACO o híbrida
	Ajuste en ciertas medidas de diseño de puestos o herramientas de trabajo y la disposición de los elementos en el lugar de trabajo, de forma que minimicen los riesgos asociados a posturas estresantes, basado en medidas antropométricas de la población	GA, TS, SA, ACO, ANN o híbrida
	Generación de planes de rotación que minimicen algún riesgo en particular tales como la exposición a niveles de ruido altos, ambientes térmicos extremos, levantamiento de cargas, posturas estresantes, movimientos repetitivos, entre otros	GA, TS, SA, ACO o híbrida
Ergonomía cognitiva	Clasificación de puestos de trabajo o tareas de acuerdo al nivel de carga mental requerido	ANN o híbrida
	Determinación de la relación entre las características de los sistemas interactivos del trabajo con niveles de carga mental	ANN, ACO o híbrida
	Generación de planes de rotación que minimicen la carga mental o psicológica de los trabajadores	GA, TS, SA, ACO o híbrida
Ergonomía organizacional	Generación de planes de rotación que permita mejorar relaciones sociales del trabajador debido al desarrollo de nuevas habilidades, disminución de la monotonía y aumento de la sensación de responsabilidad	GA, TS, SA, ACO o híbrida
	Establecimiento de pausas en el trabajo en concordancia con el flujo del proceso propio del sistema de producción	GA, TS, SA, ACO, PSO, GRASP o híbrida
	Distribución equitativa y participativa de la carga de trabajo	GA o híbrida

## REFLEXIONES FINALES

Las metaheurísticas aplicadas a problemas de optimización constituyen aun un campo en plena consolidación y desarrollo, día tras día siguen surgiendo nuevos modelos o nuevas estrategias de tratar los modelos ya existentes, y cuyo ámbito de aplicación también se sigue expandiendo, debido en primer lugar a la flexibilidad que justamente caracterizan a este tipo de herramientas, por tratarse de metodologías hechas a la medida, y en segundo lugar por las analogías que se realizan de determinadas situaciones a problemas clásicos de optimización como el agente viajero, enrutamiento de vehículos, secuenciación y horarios, entre otros. Entre las tendencias actuales más sobresalientes resaltan el uso de los algoritmos genéticos para resolver problemas relacionados a la programación o secuenciación de tareas tanto en ambientes de producción industrial como en otros casos afines.

## REFERENCIAS

Alfonso, H., Salto, C., Minetti, G., Stark, N., Bermúdez, C., Orellana, A. y Sanz, F. (2010). Metaheurísticas aplicadas a problemas de optimización. Ponencia en el XII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, El Calafate, 5 de mayo de 2010. Argentina.

Allaoua, B. y Gasbaoui, B. (2009). Ant Colony Optimization Applied on Combinatorial Problem for Optimal Power Flow Solution. *Leonardo Journal of Sciences*, 8 (14), p.1-17.

Asensio, S. (2009). Metodología para la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo desde un enfoque ergonómico mediante algoritmos evolutivos. (Tesis doctoral). Recuperado el 15 de febrero de 2013 de <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6287/tesisUPV3088.pdf>

Asensio, S., Diego, J. y Alcaide, J. (2010). Predicción del riesgo de lesiones músculoesqueléticas en el levantamiento de cargas mediante redes neuronales. Ponencia en el XIV International Congress on Project Engineering, Madrid, 30 de junio de 2010. España.

Asensio, S. y Diego, J. (2011). Desarrollo de un algoritmo para generar agendas de rotación que minimicen el riesgo por movimientos repetitivos. Ponencia en XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Huesca, 6 de julio de 2011. España.

Baessler, F., Moraga, R. y Cornejo, O. (2008). Introducción de elementos de memoria en el método simulated annealing para resolver problemas de programación multiobjetivo de máquinas paralelas. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 16 (3), p.428-437.

Báez, O., Torres, R., Alvarado, A., Ortiz, F. y Moras, C. (2008). Metodología de ayuda a la decisión para el plan de producción

Así mismo, siguen en expansión la implementación de otras metaheurísticas bioinspiradas como la optimización por colonia de hormigas y por enjambre de partículas. A su vez, independiente al tipo de modelo utilizado, la hibridación y el paralelismo constituyen dos importantes estrategias que permiten maximizar los beneficios de las metaheurísticas, representados fundamentalmente por la calidad de las soluciones encontradas y los tiempos de cómputo incurridos. Es factible la utilización de algunas metaheurísticas como apoyo a las labores de diagnóstico, análisis y solución de problemas de tipo ergonómico, en especial para clasificación de puestos de trabajo en función del riesgo, la determinación de relaciones entre las características de una tarea y el riesgo latente asociado, y para el desarrollo de soluciones de tipo administrativas tales como la elaboración de planes o agendas de rotación de los trabajadores.

en sistemas de manufactura flexible. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 2 (1), p.1-13.

Barros, A. y Moccellin, J. (2003). Análise da flutuação do gargalo em flow shop permutacional com tempos de setup assimétricos e dependentes da sequência. *Gestão & Produção*, 11 (1), p.101-108.

Bautista, J., Pereira, J. y Adenso-Díaz, B. (2008). A GRASP approach for the extended car sequencing problem. *Journal of Scheduling*, 11 (1), p.3-16.

Bermeo, E. y Calderón, J. (2009). Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte. *El Hombre y la Máquina*, 32, p.52-67.

Blum, C. y Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35 (3), p.268-308.

Caramia, M. y Giordani, S. (2009). A new approach for scheduling independent tasks with multiple modes. *Journal of Heuristics*, 15 (4), p.313-329.

Correa, A., Rodríguez, E. y Londoño, M. (2008). Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: estado del arte. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 5 (3), p.151-161.

D'Armas, M. (2010). Algoritmos evolutivos para la secuenciación de operaciones con tiempos de preparación. *Ingeniería Industrial, Actualidad y Nuevas Tendencias*, II (4), p.7-26.

Debels, D. y Vanhoucke, M. (2007). A Decomposition-Based Genetic Algorithm for the Resource-Constrained Project-Scheduling Problem. *Operations Research*, 55 (3), p.457-469.

Duarte, A. (2007). Metaheurísticas. Madrid: Dykinson.

Escobar, L., Álvarez, D. y Romero, R. (2011). Equipo asíncrono de agentes basados en recocido simulado aplicado al problema

- del agente viajero simétrico. *Scientia et Technica*, XVI (49), p.122-127.
- Gagné, C., Gravel, M. y Price, W. (2005). Using metaheuristic compromise programming for the solution of multiple-objective scheduling problems. *The Journal of the Operational Research Society*, 56 (6), p.687-698.
- Garrido, P. (2006). Hiperheurísticas: un nuevo enfoque para la resolución de problemas complejos. Recuperado el 01 de noviembre de 2012 de [http://www.inf.utfsm.cl/~mcriff/IA-avanzada/Hyper\\_Pres.pdf](http://www.inf.utfsm.cl/~mcriff/IA-avanzada/Hyper_Pres.pdf).
- González, G. y González, F. (2007). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 3: Genetic Clustering and Tabu Routing. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27 (2), p.106-113.
- Gould, F. y Eppen, G. (1987). *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*. México: Prentice-Hall.
- Hernández, A., Guerrero, F., Caballero, R. y Molina, J. (2006). Algoritmo tabú para un problema de distribución de espacios. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 1, p.25-37.
- Hernández, J., Hernández, S. y Flores, I. (2011). Algoritmo racoado simulado para el problema de la programación del tamaño del lote económico bajo el enfoque de ciclo básico. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 19 (3), p.473-485.
- Herrera, F. (2009). Introducción a los algoritmos metaheurísticos. Recuperado el 29 de octubre de 2012 de <http://sci2s.ugr.es/docencia/metaheurísticas/Int-Metaheurísticas-CAEPIA-2009.pdf>.
- Hillier, F. y Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. 9a ed. México: McGraw-Hill.
- International Ergonomics Association (IEA) (2010). Definition of ergonomics. Recuperado el 01 de marzo de 2012 de [http://www.iea.cc/01\\_what/What%20is%20Ergonomics.html](http://www.iea.cc/01_what/What%20is%20Ergonomics.html).
- Ke, L., Feng, Z., Ren, Z. y Wei, X. (2010). An ant colony optimization approach for the multidimensional knapsack problem. *Journal of Heuristics*, 16 (1), p.65-83.
- Li, X., Tian, P. y Leung, S. (2009). An ant colony optimization metaheuristic hybridized with tabu search for open vehicle routing problems. *The Journal of the Operational Research Society*, 60 (7), p.1012-1025.
- Liu, S. y Kozan, E. (2012). A hybrid shifting bottleneck procedure algorithm for the parallel-machine job-shop scheduling problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 63 (2), p.168-182.
- Lüer, A., Venegas, B. y Bustos, J. (2009). Estrategias de paralelización de metaheurísticas aplicadas a problemas de localización de instalaciones. *Ingeniería Industrial*, 8 (2), p.75-90.
- Luna, F. (2008). *Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones*. (Tesis doctoral). Recuperado el 01 de noviembre de 2012 de <http://neo.lcc.uma.es/tesis/F.Luna.PhD.Dissertation.pdf>.
- Magalhães, J. (2009). A metaheuristic for project scheduling with multi-modes and limited resources. *Iberoamericana de Engenharia Industrial*, 1 (1), p.88-105.
- Maroto, C., Alcázar, J. y Ruíz, R. (2002). *Investigación operativa: modelos y técnicas de optimización*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martí, R. (2003). *Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria*. Valencia, España: Universidad de Valencia.
- Martins, V., Santos, L., Barbosa, M. y Ferrari, R. (2003). Otimização de layouts industriais com base em busca tabu. *Gestão & Produção*, 10 (1), p.69-88.
- Mateo, M. y D'Armas, M. (2008). Programación de la secuencia de las órdenes de producción mediante la aplicación de algoritmos genéticos. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 12 (49), p.217-226.
- Melián, B., Moreno, J. A. y Moreno, J. M. (2003). Metaheurísticas: una visión global. *Revista iberoamericana de inteligencia artificial*, 19, p.7-28.
- Merkle, D. y Middendorf, M. (2003). Ant Colony Optimization with Global Pheromone Evaluation for Scheduling a Single Machine. *Applied Intelligence*, 18 (1), p.105-111.
- Moreno, L., Velásquez, J. y Díaz, F. (2005). Solución al problema combinado de ubicación estratégica de almacenes y asignación de inventarios usando técnicas heurísticas. *Dyna*, 72 (145), p.57-66.
- Peixoto, G. y Barbieri, C. (2011). Uso da técnica de busca em vizinhança de grande porte para a programação da escala de motoristas de ônibus urbano. *Transportes*, 18 (2).
- Ramírez, S., Jiménez, X., López, M. y Contreras, K. (2009). Aplicación de un algoritmo genético simple con reparación en un caso real de planeación de producción discreta: fase I. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 3 (1), p.1-13.
- Ramírez, S., Moncayo, L. y González, G. (2011). Un caso real de asignación de recursos en un proceso con líneas paralelas y productos múltiples. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 5 (1), p.47-75.
- Real Academia Española (2012). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 28 de octubre de 2012 de <http://lema.rae.es/drae/?val=heuristico>.
- Rodríguez, C. (2010). *Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores*. (Trabajo de grado). Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.
- Sadjadi, S., Bouquard, J. y Ziaee M. (2008). An Ant Colony Algorithm for the Flowshop Scheduling Problem. *Journal of Applied Sciences*, 8 (21), p.3938-3944.
- Soto, D., Soto, W. y Pinzón, Y. (2008). Una metaheurística híbrida aplicada a un problema de planificación de rutas. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 5 (3), p.135-144.
- Surekha, P. (2010). Solving Fuzzy based Job Shop Scheduling Problems using GA and ACO. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 1 (2), p.95-102.
- Taheri, J. y Zomaya, A. (2009). RBT-GA: a novel metaheuristic for solving the multiple sequence alignment problema. *BMC Genomics*, 10 (Suppl 1), S10.
- Toro, E. y Granada M. (2005). Método híbrido entre el algoritmo genético de Chu-Beasley y simulated annealing para la solución del problema de asignación generalizada. *Scientia et Technica*, XI (28), p.19-24.
- Toro, E., Restrepo, Y. y Granada M. (2006). Algoritmo genético modificado aplicado al problema de secuenciamiento de tareas en sistemas de producción lineal – Flow Shop. *Scientia et Technica*, XII (30), p.285-290.

Vasko, F., Bobeck, J. Governale, M., Rieksts, D. y Keffer, J. (2011). A statistical analysis of parameter values for the rank-based ant colony optimization algorithm for the traveling salesperson problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 62 (6), p.1169-1176.

Wassan, N., Nagy, G. y Ahmadi, S. (2008). A heuristic method for the vehicle routing problem with mixed deliveries and pickups. *Journal of Scheduling*, 11 (2), p.149-161.

Zinflou, A., Gagné, C. y Gravel, M. (2010). Genetic Algorithm with Hybrid Integer Linear Programming Crossover Operators for the Car-Sequencing Problem. *INFOR* 48 (1), p.23-37.

**Autor**

**Mervyn Márquez Gómez.** Ingeniero Industrial. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Experimental del Táchira. Participante del Doctorado en Ingeniería, Área Industrial, Universidad de Carabobo. Profesor Agregado a Dedicación Exclusiva, Investigador PEII Nivel B, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela.

E-mail: [mervyn@unet.edu.ve](mailto:mervyn@unet.edu.ve) Recibido:

Recibido 13/09/2012

Aceptado: 18/12/2013