

Una revisión de la búsqueda armónica

A survey of harmony search

Carlos Cobos, M.Sc., José Pérez, Ing. & Darío Estupiñan, Ing.

Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI), Departamento de Sistemas, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia.

coboscarlos@gmail.com, j.perezhdez@hotmail.com, dario.estupinan@gmail.com

Recibido para revisión 01 de octubre de 2010, aceptado 28 de junio de 2011, versión final 30 de junio de 2011

Resumen— El algoritmo de búsqueda armónica (Harmony Search Algorithm) es un algoritmo meta heurístico que basa su funcionamiento en el proceso de la improvisación musical. La búsqueda armónica ha sido aplicado a infinidad de problemas de optimización, mostrando su eficiencia frente a otras meta heurísticas y otras técnicas matemáticas de optimización. Este artículo revisa el desarrollo y la evolución del algoritmo en los últimos 10 años, mostrando los diferentes campos de aplicación y sus mejoras más importantes.

Palabras Clave— Algoritmo de búsqueda armónica, Meta heurísticas, Optimización, Métodos híbridos, Aplicaciones de búsqueda armónica.

Abstract— The Harmony Search Algorithm is a meta-heuristic algorithm which bases its operation on the musical improvisation process. HS has been applied to many optimization problems, showing its efficiency compared to other meta-heuristics and mathematical optimization techniques. This paper reviews the development and evolution of the algorithm over the last 10 years, outlining the different areas of application and the most important improvements along the way

Keywords— Harmony search algorithm, Meta-heuristics, Optimization, Hybrid methods, Harmony search applications.

I. INTRODUCCIÓN

El algoritmo de Búsqueda Armónica, conocido como HS por sus siglas en inglés (Harmony Search), es un algoritmo meta heurístico que basa su funcionamiento en el proceso de improvisación musical [1, 2]. La improvisación musical es una característica musical que no todo músico posee. Es un proceso en el cual la experiencia y el conocimiento previo de las armonías aportan a la calidad de la pieza que se está tocando. El éxito del HS frente a otros algoritmos evolutivos han hecho de este algoritmo una herramienta esencial para múltiples problemas de optimización, entre los cuales se encuentran el diseño de

una red de distribución de agua [3, 4], el diseño estructural [5], problemas relacionados con el transporte [1], la solución al juego del sudoku [6], entre otros; además, ha sido objeto de diversas variaciones, como lo son GHS [7], IHS [8] y NGHS [9].

La optimización es uno de los campos más importantes en ciencia e ingeniería. Cuando se habla de minimizar el tiempo, los costos, los materiales y el espacio, se hace referencia al objetivo principal de todo proyecto: optimizar. Este aspecto tan importante hoy en día es objeto de investigación y desarrollo en el campo científico, con lo cual se busca mejorar aspectos tan importantes en la industria como lo son la productividad y el costo; y el tiempo de procesamiento y la reducción de espacio en disco, en el campo computacional. HS ha cumplido con este objetivo a cabalidad, lo cual ha sido demostrado en diversas áreas de aplicación [10, 11].

A continuación, en la sección 2 se presenta en detalle el algoritmo HS, mostrando sus ventajas frente a otros algoritmos meta heurísticos; en la sección 3 se muestran las mejoras más importantes realizadas al algoritmo HS; luego en la sección 4 y 5 se presentan las diferentes aplicaciones y transformaciones que HS ha tenido en los últimos 10 años (2000 - 2010), mostrando la tendencia en investigación y aplicación de esta meta heurística, y finalmente en la sección 6, se presentan las conclusiones generales del artículo.

II. BÚSQUEDA ARMÓNICA ORIGINAL

El algoritmo de la búsqueda armónica, es un algoritmo meta heurístico, es decir, un algoritmo aproximado de propósito general que consiste en procedimientos iterativos que guían una heurística combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda [12]. La versión para problemas discretos de este algoritmo fue propuesto por Zong Woo Geem y Kang Seo Lee [12] en el 2001, luego en 2005, Geem y Lee [13] propusieron la versión para problemas continuos. HS simula el proceso de improvisación

musical, en el cual los músicos buscan producir una armonía agradable determinada por el estándar estético auditivo [2]. Cuando un músico esta improvisando, el realiza una de las siguientes acciones:

1. Toca alguna melodía conocida que ha aprendido anteriormente.
2. Toca algo parecido a la melodía anteriormente mencionada, ajustándola poco a poco al tono deseado.
3. Compone una nueva melodía basándose en sus conocimientos musicales para seleccionar nuevas notas aleatoriamente.

Estas tres opciones formalizadas en [12], corresponden a los componentes del algoritmo: Uso de la memoria armónica, ajuste de tono y aleatoriedad, respectivamente.

“En la improvisación musical, cada músico toca una nota dentro de un posible rango, de tal manera que forman un vector armónico. Si el conjunto de notas tocadas por los músicos son consideradas una buena armonía, esta es guardada en la memoria de cada músico, incrementando la posibilidad de hacer una buena armonía la próxima vez. Del mismo modo en el proceso de optimización en ingeniería, cada variable de decisión inicialmente toma valores aleatorios dentro del rango posible, formando un vector solución. Si dicho vector, es decir, dicho conjunto de valores que lo conforman son una buena solución, esta es almacenada en la memoria de cada variable, aumentando la posibilidad de encontrar mejores soluciones en la siguiente iteración” [13] (Traducción libre).

HS es un algoritmo meta heurístico basado en una población, lo cual indica que un grupo de múltiples armonías pueden ser usadas en paralelo. Este recurso usado apropiadamente tiende a obtener un mejor rendimiento con una alta eficiencia. El proceso de improvisación que lleva a cabo el algoritmo HS para optimizar una función hace de este una poderosa herramienta de programación. Al no realizar cálculos matemáticos complejos, el procesamiento es mucho más rápido, lo cual hace que el tiempo de convergencia del algoritmo marque la diferencia entre los diferentes algoritmos meta heurísticos existentes [2].

Los algoritmos de búsqueda armónica han sido utilizados para una gran variedad de problemas de optimización reales, tales como la composición musical, enrutamiento de viajes,

diseño estructural, rutas de vehículos, diseño de tuberías de calor para satélites, entre otros [11]. La ventaja de los algoritmos armónicos frente a otros algoritmos evolutivos se basa en sus características, las cuales lo identifican y hacen de él una poderosa herramienta de optimización. Entre estas se destacan las siguientes: no requiere cálculos complejos, obvia óptimos locales y puede manejar variables discretas y continuas [1, 2]. Estas características permiten diferenciarlo de los algoritmos genéticos y hacen de él una poderosa herramienta basada en cálculos matemáticos simples e improvisación.

2.1 Descripción del Algoritmo HS

Los pasos de la versión continua del algoritmo HS son los siguientes (adaptado de [14]):

Paso 1. Inicializar los parámetros del problema y los parámetros de HS: El problema de optimización se define como minimizar (o maximizar) $f(x)$ tal que $LB_i < x_i < UB_i$ donde, $f(x)$ es la función objetivo, x es una solución candidata que consiste de N variables de decisión (x_i), y LB_i y UB_i son el límite de decisión más bajo y el más alto de cada variable, respectivamente. Los parámetros de HS se especifican en este paso. Estos parámetros son el tamaño de la memoria armónica (HMS), la tasa de consideración de la memoria armónica (HMCR), la tasa de ajuste del tono (PAR), el ancho de banda de ajuste del tono (BW) y el número de improvisaciones (NI).

Paso 2. Inicializar la memoria armónica: La memoria armónica inicial es generada desde una distribución uniforme en los rangos $[LB_i, UB_i]$, donde $1 \leq i \leq N$. Esto se realiza de la siguiente manera: $x_i^j = LB_i + r \times (UB_i - LB_i)$, donde $j = 1, 2, \dots, HMS$ y $r \sim U(0, 1)$. La variable r hace referencia a un número aleatorio y $U(0, 1)$ a la función que genera el número aleatorio uniforme entre cero (0) y uno (1).

Paso 3. Improvisar la nueva armonía: El proceso de generación de una nueva armonía es llamado *improvisación*. El nuevo vector armónico, $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, se genera utilizando las siguientes reglas: consideración de la memoria, ajuste del tono y selección aleatoria. Este procedimiento se muestra en la Figura 1. En la línea 006, r es un número aleatorio uniforme entre 0 y 1, y el valor bw es un ancho de banda arbitrario de la distancia para variables continuas [13].

```

001 para cada  $i \in [1, N]$  hacer
002   si  $U(0,1) < HMCR$  entonces /*consideración de la memoria*/
003     inicio
004        $x'_i = x_i^j$ , donde  $j \sim U(1, \dots, HMS)$ 
005       si  $U(0,1) \leq PAR$  entonces /*ajuste del tono*/
006          $x'_i = x_i^j + r \times bw$ 
007       fin_si
008     fin
009   sino /*selección aleatoria*/
010      $x'_i = LB_i + r \times (UB_i - LB_i)$ 
011   fin_si
012 fin_para

```

Figura 1. Improvisación de una nueva armonía

Paso 4. Actualizar la memoria armónica: La nueva armonía, $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, reemplaza la peor armonía almacenada en la memoria armónica si el *fitness* (o valor de aptitud del vector armónico actual, medido en términos de la función objetivo) es mejor que el de la peor armonía.

Paso 5. Verificar el criterio de parada: Terminar cuando el número máximo de improvisaciones (NI) se alcanza.

En general HS es poco sensible a los parámetros [1, 2], por esto, el algoritmo no requiere de una afinación exhaustiva de los parámetros para obtener buenas soluciones. A pesar de lo anterior, es preciso destacar que los parámetros HMCR y PAR ayudan al método en la búsqueda de mejores soluciones globales y locales, respectivamente. PAR y bw tienen un profundo efecto en el desempeño del algoritmo y es por esto que el ajuste de estos dos parámetros es muy importante.

2.2 HS Frente a Otras Estrategias de Optimización

Un algoritmo meta heurístico tiende a ser más exitoso si emplea mecanismos que no requieran de un conocimiento complejo para que un programador o desarrollador lo entienda. La ventaja de muchos algoritmos meta heurísticos radica en que su simplicidad puede ayudar a encontrar errores lógicos y solucionarlos de forma exitosa. La simulación de procesos naturales es uno de los primeros responsables del éxito de dichos algoritmos frente a algoritmos que emplean cálculos y operaciones matemáticas [2].

Los algoritmos meta heurísticos son algoritmos heurísticos avanzados, los cuales hacen uso de técnicas de alto nivel y algunos procesos de ensayo y error, para encontrar la solución a un problema determinado. Las meta heurísticas son consideradas técnicas o estrategias de alto nivel que intentan combinar técnicas de bajo nivel, y tácticas para exploración y explotación del espacio de búsqueda [1, 2]. Entre las más conocidas meta heurísticas se incluyen los algoritmos evolutivos [15], entre los cuales se encuentran los algoritmos genéticos (Genetic Algorithm, GA) [15] y los algoritmos Meméticos (Memetic algorithm, MA) [15], el Recocido Simulado (Simulated Annealing) [16], la Búsqueda Tabú [17], la optimización basada en colonia de hormigas (Ant Colony Optimization) [18, 19], la optimización basada en enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization) [20], la optimización basada en el algoritmo de la abeja (bee algorithm) [21, 22], la optimización basada en el algoritmo de la luciérnaga (firefly algorithm) [22, 23] y los algoritmos armónicos [22].

Entre las meta heurísticas se destacan dos características principales: la diversificación y la intensificación. También conocidos como exploración y explotación, los cuales son contradictorios entre sí, pero un adecuado balance entre los dos es determinante para el éxito de un algoritmo meta heurístico. La diversificación o exploración, es el proceso por el cual el algoritmo explora en muchos lugares y regiones del espacio de soluciones, tanto como sea posible de una manera eficiente y efectiva. Esta característica pretende que el algoritmo no

caiga en óptimos locales sin tener que recorrer todo el espacio de búsqueda. La intensificación o explotación pretende aprovechar la historia y la experiencia del proceso de búsqueda, asegurando la velocidad de convergencia, cuando sea necesaria haciendo uso de la reducción de la aleatoriedad y limitando la diversificación. Este proceso consiste en volver a explorar zonas del espacio prometedoras (en las cuales se hallaron buenas soluciones), ya exploradas parcialmente.

En HS, la diversificación es controlada por la tasa de ajuste de tono (PAR) y la aleatoriedad (1-HMCR), con lo cual se busca refinar los valores obtenidos anteriormente, es decir encontrar nuevos valores cercanos a los mejores valores ya obtenidos. Esto asegura que las buenas soluciones locales ya obtenidas sean guardadas en memoria mientras que la aleatoriedad hace que el algoritmo explore el espacio de búsqueda global de manera efectiva. Por otro lado, la intensificación en HS es representada por la tasa de consideración de la memoria armónica (HMCR). Un valor alto para la tasa de consideración de la memoria armónica indica que se reutilizan más valores almacenados en la memoria armónica. Si es demasiado bajo, la convergencia se tornaría demasiado lenta. Teniendo en cuenta estas características, se puede observar que la interacción entre estos dos componentes asegura el éxito del algoritmo HS frente a otros algoritmos, como ya ha sido probado en [5, 7, 24-28].

III. MEJORAS REALIZADAS AL ALGORITMO HS

HS es un algoritmo que ha sido aplicado en diversos problemas reales y sobre el cual se han realizado gran variedad de transformaciones, obteniendo resultados satisfactorios y motivando que la investigación sobre este algoritmo meta heurístico se haya incrementado en los últimos años [1, 2]. Entre las trasformaciones, o hibridaciones que ha sufrido HS se destacan las siguientes: la búsqueda armónica mejorada (IHS, Improve Harmony Search) [8], la búsqueda armónica global (GHS, Global-best Harmony Search) [7] y la nueva búsqueda armónica global (NGHS, Novel Global Harmony Search) [9]. Estos nuevos algoritmos han tenido en cuenta para su desarrollo las diversas técnicas de optimización existentes (PSO y mutación genética) y el ajuste dinámico de parámetros, para disminuir la sensibilidad al ruido en el algoritmo original, soportar mayor dimensionalidad y aumentar la precisión y el grado de convergencia en las soluciones, entre otras.

3.1 Búsqueda Armónica Mejorada (IHS)

La búsqueda armónica mejorada es un algoritmo armónico propuesto en el año 2007 por Mahdavi et al [8], que emplea un novedoso método para la generación de nuevos vectores solución basado en el ajuste dinámico de los parámetros PAR (tasa de ajuste del tono) y bw (ancho de banda de la distancia), logrando con esto mejorar la precisión y la velocidad de convergencia. Ha sido probado en problemas de optimización

en ingeniería y evaluado frente a otros algoritmos con éxito. Esta variante de la búsqueda armónica modifica el paso 3 del algoritmo original, el paso en el que se crea una nueva armonía. PAR y bw cambian dinámicamente con el número de iteraciones (improvisaciones) y se calculan con las fórmulas de la Figura 2.

$$PAR = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{(NI - 1)} \times (iter - 1)$$

Donde,

PAR	Tasa de ajuste del tono para cada iteración
PAR_{min}	Tasa mínima de ajuste del tono
PAR_{max}	Tasa máxima de ajuste del tono

NI	Número máximo de improvisaciones
$iter$	Número de iteración actual

$$bw = bw_{max} e^{(c \times (iter - 1))} \text{ donde } c = \frac{\ln(\frac{bw_{min}}{bw_{max}})}{(NI - 1)}$$

Donde,

bw	Ancho de banda de la distancia para cada iteración
bw_{min}	Ancho de banda de la distancia mínimo
bw_{max}	Ancho de banda de la distancia máximo

$$PAR = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{(NI - 1)} \times (iter - 1)$$

Donde,

PAR	Tasa de ajuste del tono para cada iteración
PAR_{min}	Tasa mínima de ajuste del tono
PAR_{max}	Tasa máxima de ajuste del tono
NI	Número máximo de improvisaciones
$iter$	Número de iteración actual

$$bw = bw_{max} e^{(c \times (iter - 1))} \text{ donde } c = \frac{\ln(\frac{bw_{min}}{bw_{max}})}{(NI - 1)}$$

Donde,

bw	Ancho de banda de la distancia para cada iteración
bw_{min}	Ancho de banda de la distancia mínimo
bw_{max}	Ancho de banda de la distancia máximo

Figura 2. Ecuaciones que rigen el cambio de los parámetros PAR y bw en el algoritmo IHS

El parámetro PAR crece linealmente con el número de iteraciones (aunque algunos artículos expresan algo diferente basado en resultados numéricos de simulación [29]), mientras que bw decrece exponencialmente (para más información ver Das et al. [30], donde se presenta una fundamentación teórica del poder exploratorio de HS). Con este cambio en los parámetros, IHS logra mejorar el rendimiento de HS, ya que encuentra mejores soluciones tanto a nivel global como local. “La principal desventaja de HIS es que el usuario necesita especificar los valores de bw_{min} y bw_{max} , lo cual es difícil de hacer y depende del problema a resolver” (Traducción libre) [7].

3.2 Mejor Búsqueda Armónica Global (GHS)

GHS es un algoritmo de optimización estocástica propuesto en el año 2008 por Mahamed G.H. Omran y Mehrdad Mahdavi [7], el cual hibrida la búsqueda armónica original con el concepto de inteligencia de enjambre propuesto en PSO [7], donde un enjambre de individuos (llamados partículas) vuela a través del espacio de búsqueda.

Cada partícula representa un candidato a la solución del problema de optimización. La posición de una partícula está influenciada por la mejor posición visitada por sí misma (es decir, su propia experiencia) y la posición de las mejores partículas en el enjambre (es decir, la experiencia de enjambre). GHS modifica el paso de ajuste del tono en HS de modo que el nuevo armónico puede imitar el mejor armónico en la memoria armónica. Esto permite a GHS trabajar eficientemente en problemas continuos y discretos. En general GHS es mejor que IHS y HS, por ejemplo cuando se aplica a problemas de gran dimensionalidad y cuando hay presencia de ruido [7], pero existen diferentes resultados de simulación [31], por ejemplo, en el diseño de redes de distribución de agua, mientras GHS es mejor que HS en problemas de tamaño pequeño ($n=8$) y mediano ($n=34$), HS es peor que GHS en problemas de tamaño grande ($n=454$).

El GHS realiza los mismos pasos que IHS con la salvedad de la modificación del paso 3 que corresponde a la improvisación de una nueva armonía, que se modifica conforme a la Figura 3.

```

001 para cada  $i \in [1, N]$  hacer
002   si  $U(0,1) < HMCR$  entonces /*consideración de la memoria*/
003     inicio
004        $x'_i = x_i^j$ , donde  $j \sim U(1, \dots, HMS)$ 
005       si  $U(0,1) \leq PAR(t)$  entonces /*ajuste del tono*/
006          $x'_i = x_k^{best}$ , donde  $best$  es el índice de la mejor armonía en la HM y  $k \sim U(1, N)$ 
007       fin_si
008     fin
009   sino /*selección aleatoria*/
010      $x'_i = LB_i + r \times (UB_i - LB_i)$ 
011   fin_si
012 fin_para

```

Figura 3. Improvisación en el algoritmo de la mejor búsqueda armónica global (GHS)

3.3 Nueva Búsqueda Armónica Global (NGHS)

NGHS propone una hibridación entre la búsqueda armónica, la optimización basada en enjambre y la mutación genética [9]. Este algoritmo se propuso para resolver problemas de fiabilidad, término usado para indicar la probabilidad de que un sistema funcione correctamente (sea seguro y eficiente) sin violar ninguna restricción. De los diversos problemas de fiabilidad que existen se tomaron: los sistemas complejos (sistemas de programación no lineal entera y mixta), un sistema de protección de exceso de velocidad para una turbina de gas y un problema de fiabilidad de un sistema a gran escala.

NGHS y HS son diferentes en tres aspectos: en el paso 1, la tasa de consideración de la memoria armónica (HMCR) y el rango de ajuste de tono (PAR) son excluidos, y se incluye la probabilidad de mutación genética (p_m); en el paso 3, se modifica el paso de la improvisación por completo de modo que la nueva armonía imite a la mejor armonía global en la memoria armónica (HM) como se muestra en la Figura 4; y en el paso 4, se reemplaza la peor armonía x_i^{worst} con la nueva armonía x' aun si x' es peor que x_i^{worst} [9].

Esta propuesta se ha probado en optimización de problemas discretos y muestra una mejor convergencia y una mayor capacidad de exploración del espacio de solución que el algoritmo de búsqueda armónica original (HS) y que la búsqueda armónica mejorada (IHS).

```

001 para cada  $i \in [1, N]$  hacer
002    $x_R = 2 \times x_i^{best} - x_i^{worst}$ 
003   si  $x_R > x_{iU}$  entonces
004     inicio
005        $x_R = x_{iU}$ 
006     fin
007   sino
008     si  $x_R < x_{iL}$  entonces
009        $x_R = x_{iL}$ 
010     fin_si
011   fin_si
012    $x'_i = x_i^{worst} + r \times (x_R - x_i^{worst})$  // % actualización de la posición
013   si  $r \leq p_m$  entonces
014      $x'_i = x_{iL} + r \times (x_{iU} - x_{iL})$  // % mutación genética
015   fin_si
016 fin_para

```

Figura 4. Nueva Improvisación en el algoritmo de la nueva búsqueda armónica global (NGHS).

IV. USOS DE HS Y SUS VARIACIONES

HS ha sido considerado por muchos autores como un algoritmo muy exitoso, compitiendo con otras meta heurísticas como lo son PSO, Tabu Search (TS) y GA. En los últimos años, varias investigaciones se han desarrollado alrededor de HS, y se ha aplicado a diversos problemas de optimización en ciencia e ingeniería, entre los cuales se incluyen: aplicaciones cotidianas, aplicaciones en ciencias de la computación, aplicaciones en ingeniería eléctrica, aplicaciones en ingeniería civil,

aplicaciones en ingeniería mecánica, aplicaciones biomédicas, aplicaciones en economía, aplicaciones en transporte, aplicaciones en ecología, entre otras [14, 32].

4.1 Aplicaciones Cotidianas

Cuando se habla de problemas cotidianos, se hace referencia a la aplicación de algoritmos de optimización en la solución de problemas comunes en el desarrollo humano y para las cuales no hay una ciencia o campo de investigación adecuado que lo identifique. Algunas de estos problemas son la composición musical, resolver un sudoku y la planeación de un tour. Todas las

anteriores, son tareas para las cuales se necesita de experiencia y de conocimiento previo de diversas herramientas o técnicas que permitan llevarlas a cabo con un grado de satisfacción adecuado.

La composición musical no solo depende de la experiencia y de los conocimientos en música, sino también del buen gusto y de la improvisación. Cuando se aplicó HS para componer piezas musicales en el estilo medieval, se logró teniendo en cuenta que una línea armónica se compone para acompañar a la melodía del canto gregoriano. El órgano, el cual es el instrumento usado para acompañar este canto sigue un conjunto de reglas [10], éstas se usaron para modificar los parámetros de HS y se adecuó el algoritmo para componer exitosamente líneas sobre la base de la armonía original de las líneas de canto gregoriano [33].

El juego del sudoku puede verse como un problema de optimización con numerosas penalidades únicas. Varios métodos han sido utilizadas para la solución de este problema, entre las cuales se encuentran: la teoría de grafos, la inteligencia artificial y los algoritmos genéticos [6]. El algoritmo de HS fue probado con éxito para encontrar una solución óptima sin ninguna violación de las tres reglas del juego en 285 problemas de sudoku con diferente nivel de dificultad.

La programación o planeación de actividades también es un problema común en la vida de las personas. Muchos de estos problemas tienden a tener una serie de restricciones (tiempo, espacio, orden, etc.) que son casi imposibles de controlar, lo que implica que no es posible tener una solución optima en un tiempo determinado. Este tipo de problemas son conocidos como NP completos. Los problemas NP completos son problemas en los cuales ninguna solución dada puede ser rápidamente verificada, y son también problemas NP-hard, lo cual indica que ningún problema NP puede ser convertido en único si se transforman sus entradas en tiempo polinomial.

HS ha sido aplicado a la programación de cursos universitarios [27], el cual es un problema NP completo, que consta de 3 restricciones fuertes y 3 restricciones suaves. Las restricciones fuertes deben ser cumplidas para que la solución sea usable, mientras que las restricciones suaves son deseables pero no absolutamente esenciales. Para resolver este problema, se realizó la adaptación de HS a las restricciones del problema, y se realizó la comparación del algoritmo HS propuesto frente a otros algoritmos que también fueron aplicados a este problema. El algoritmo planteado en [27] se destaca por ser capaz de encontrar un equilibrio entre la exploración a través HMCR en la consideración la memoria y explotación a través de PAR en el procedimiento de ajuste de tono.

4.2 Aplicaciones en Ciencias de la Computación

El algoritmo HS ha sido aplicado recientemente en muchas aplicaciones en ciencias de la computación e ingeniería, entre ellas: El clustering o agrupación de páginas web, el resumen o la sumarización de texto, el enrutamiento en internet y la robótica.

El clustering es un problema de gran importancia práctica que ha sido el foco de investigación sustancial en varios

dominios por décadas. Teniendo en cuenta las dimensiones y las propiedades de los documentos, el clustering tiende a ser una tarea mucho más difícil cuando se trata de documentos web. HS ha sido aplicado con éxito al problema del clustering de páginas web, tanto para una representación continua de datos [34] como para una representación discreta de datos [26]. HS basado en clustering ha sido hibridado con el algoritmo de k-means obteniendo como resultado HSCLUST [35]. Los resultados muestran que el clustering de documentos web basado en HS es una buena elección cuando se trata de particionar grandes cantidades de documentos [24]. Otro algoritmo para la agrupación de documentos web es IGBHSK, éste algoritmo híbrida GHS y K-means. IGBHSK tiene la capacidad de definir automáticamente el número de agrupaciones para un problema dado. Este algoritmo muestra mejores resultados cuando se usa con una matriz de términos frecuentes por documento, en el marco de un modelo vectorial de representación de documentos, cuando el criterio de información bayesiana es usado como función de aptitud y cuando se usa la similitud de cosenos para comparar los documentos [36].

El seguimiento visual (visual tracking) es usado comúnmente en sistemas para identificar correctamente un objetivo arbitrario en una secuencia de video. En este tipo de problemas se debe tener en cuenta la posibilidad de que el objetivo aparezca y desaparezca, cambie de tamaño, sea cubierto por otro objeto en la secuencia de video, con el objetivo de ubicarlo rápida y eficientemente. Los métodos más populares usados en seguimiento visual son el filtro Kalman y el filtro de partículas. HS e IHS han sido usados para crear el Harmony Filter (HF) [25], el cual usa el coeficiente de Bhattacharyya para comparar los histogramas de color en la secuencia de video. HF obtuvo mayor exactitud en el proceso de seguimiento y recobro del objetivo en situaciones en las que los otros dos algoritmos no lo lograron.

La robótica es una de las ciencias en las cuales HS ha sido aplicado con éxito frente a otros algoritmos evolutivos y otras técnicas matemáticas. El cálculo de las coordenadas de los movimientos de los robots es el fuerte en este tipo de aplicaciones, entre las cuales se encuentran el cálculo de trayectorias óptimas [37] y una aplicación para un prototipo de robot móvil reconfigurable [38].

En el cálculo de trayectorias óptimas [37], HS se usó para minimizar el tiempo de duración del movimiento, que es la restricción principal de este tipo de problemas que tienen como objetivo principal aumentar la productividad, para robots usados en el campo de la industria, en este caso, de un robot manipulador con 6 grados de libertad. HS es hibridado con la programación cuadrática secuencial (SQP, siglas de Sequential Quadratic Programming), dando como resultado HHSA con el fin de mejorar las soluciones para trayectorias calculadas, haciendo uso de la aleatoriedad con el fin de encontrar los valores iniciales óptimos que han de ser usados en SQP para calcular los vectores en el paso 3 del algoritmo. HS, SQP y HHSA fueron comparados demostrando que HHSA es más

eficiente que HS y que SQP en el cálculo de las trayectorias.

HS fue usado exitosamente en un prototipo de robot móvil reconfigurable [38]. HSMOO (Optimización Multi-objetivo con Búsqueda Armónica) se desarrolló para reconfigurar el diseño del robot con base a las restricciones planteadas y a la mecánica del suelo. HSMOO utiliza dos memorias armónicas, la primera para la evolución de los miembros armónicos, y la otra es considerada como un repositorio de almacenamiento externo para las soluciones optimas de Pareto que han sido encontradas. Se hace uso de la optimización de Pareto como criterio de rango para ordenar las soluciones optimas en la primera memoria armónica.

La llegada de varias aplicaciones multimedia en tiempo real en redes de alta velocidad crea una necesidad de calidad de servicio (QoS) de enrutamiento basado en multidifusión. Dos de las restricciones más importantes en QoS son la restricción de ancho de banda y la restricción de retardo de extremo a extremo. En [39] se presentan dos nuevos algoritmos centralizados para resolver el problema de multidifusión de menor costo con restricción de retardo en el ancho de banda basado en HS. HSPR y HSNPI, los cuales fueron evaluados en rendimiento y eficiencia frente a un algoritmo basado en GA y una versión modificada del algoritmo BSMA. Los resultados de la simulación de redes generadas aleatoriamente y topologías reales indican que el algoritmo HSNPI propuesto ha superado a los otros tres algoritmos.

4.3 Aplicaciones en Ingeniería Eléctrica

El método que permite conocer la forma más eficiente, con el menor costo y que mantiene operando de manera confiable un sistema de alimentación eléctrica, respetando las limitaciones operacionales de los recursos de generación disponibles es denominado Despacho Económico (Economic Dispatch). Varios métodos de programación matemática han sido empleados para resolver problemas de Despacho económico, tales como programación lineal, programación no lineal y programación homogénea [1, 40, 41]. Sin embargo, para que estos métodos sean realmente eficientes las variables y la función de costo necesitan ser continuas y tener un buen punto de inicio. Considerando el uso de varios tipos de combustibles, en la implementación se pueden encontrar funciones no convergentes, no suaves, zonas operativas prohibitivas, entre otras; lo cual hace que este tipo de problemas no sean resueltos por modelos tradicionales de programación matemática, y se apliquen modelos de programación dinámica y programación mixta no lineal entera, aunque estos métodos tienden a crear una expansión de las dimensiones del problema [41]. HS ha sido usado en esta área como una alternativa de solución a los métodos tradicionales, debido a su capacidad de exploración para encontrar las regiones de alto rendimiento dentro del espacio en un tiempo razonable. Su aplicación es una alternativa a uno de los problemas más difíciles de Despacho Económico que surge en Sistemas de Calor y Energía (CHP Systems) [40].

Dentro del diseño de sistemas eléctricos, se busca encontrar el mejor y más seguro punto de operación correspondiente a cada situación de carga [42]. En general, los problemas de diseño de sistemas eléctricos son problema altamente no lineales con restricciones y de gran escala. HS ha sido usado para la solución de este tipo de problemas eléctricos en una versión modificada llamada Búsqueda Armónica con Varianza de la Población (PVHS) [43], en donde “el parámetro de control conocido como ancho de banda (bw) ha sido igualado a la desviación estándar de la población actual” (traducción libre) [43]. Los resultados del algoritmo han demostrado su efectividad tras ser sometidos al sistema de pruebas IEEE 30.

En el campo de la detección foto-electrónica, una versión llamada búsqueda armónica adaptable (Adaptative Harmoy Search, AHS) ha sido usada para resolver el problema de Onda de densidad de fotón (Photondensity wave), dentro de la cual, “la memoria armónica se ajusta durante todo el proceso de búsqueda teniendo en cuenta la tasa HCMR y el ajuste de tono (PAR)” (traducción libre) [44]. Este método es usado para localizar anomalías incrustadas en la muestra de acuerdo con los parámetros de la ubicación a diagnosticar [44].

En la optimización de inversores multinivel, se presenta un nuevo método basado en HS para optimizar la forma de onda armónica escalonada para este tipo de inversores. “El método propuesto tiene como ventaja la alta tasa de convergencia y precisión en comparación con otros métodos convencionales de optimización” (traducción libre) [45]. La técnica propuesta se puede aplicar a convertidores multinivel con cualquier número de niveles. Como caso de estudio, el método es aplicado y probado en un inversor de 13 niveles. Los resultados de la simulación muestran la efectividad y la flexibilidad del método propuesto [45].

En el campo de las redes móviles, se propone un nuevo método de optimización guiado aleatoriamente para la detección multiusuario en DS-CDMA (Direct-Sequence Code Division Multiple Access), la cual es una técnica de modulación usada en el ámbito de las telecomunicaciones. HS se ha usado en conjunto con el algoritmo de detección multiusuario en un entorno de trabajo de decodificación de canal. Los resultados muestran que se puede alcanzar soluciones muy cercanas a las esperadas sin el empleo de una búsqueda óptima de detección multiusuario incluso en sistemas con alto nivel de carga [46].

4.4 Aplicaciones en Ingeniería Civil

La minimización de costos, materiales y espacio, son unas de las características más importantes en el diseño, desarrollo e implementación de una estructura o construcción. HS ha sido objeto de múltiples aplicaciones relacionadas con la construcción, el diseño de redes y la optimización de recursos, obteniendo excelentes resultados frente a otros algoritmos en la minimización del costo total de la construcción (producción), que para los ingenieros civiles, es el factor principal y lo que toda empresa busca, no dejando de lado la calidad de

los materiales y de la construcción en sí misma. Cuando se habla de diseño estructural, se hace referencia a la estructura o marco de la construcción, es decir, a las vigas y columnas de acero que soportaran el peso de la edificación [47, 48]. En esta parte, se tienen en cuenta la toma de decisiones acerca de las dimensiones de sección trasversal de los miembros que constituyen la estructura, y algunas veces, la geometría y topología de la propia estructura [47, 49].

En el diseño de redes hidráulicas, el objetivo principal del uso del HS, es optimizar los costos teniendo en cuenta las dimensiones de los tubos empleados en la red. HS se adecuó para seleccionar el diámetro para cada segmento de la tubería con el fin de minimizar el costo total de la red. Para esto se debe tener en cuenta las restricciones impuestas por la mecánica de fluidos, es decir: ecuaciones de masa y conservación de la energía, con lo cual se determina la presión mínima a la que debe estar sometida cada sección (segmento de la tubería) [3, 4]. Para probar las soluciones en [4], se usó EPANET [50], un paquete de software que permite evaluar la calidad del agua en sistemas de distribución de agua potable.

Una represa es una estructura de barrera para retención de agua con fines de riego, abastecimiento urbano de agua, navegación, usos industriales, generación de energía hidroeléctrica, usos recreativos, la creación de un hábitat de vida silvestre y el control de inundaciones. En este tipo de problemas, muchos investigadores han utilizado técnicas de programación dinámica en sus soluciones, pero este enfoque tiende a tener problemas de dimensionalidad, es decir, mayores requerimientos de memoria y mayores tiempos de computación. “Esto ha hecho que en los últimos años los algoritmos meta heurísticos como GA, SA y HS hayan sido considerados como el nuevo enfoque de solución a este tipo de problemas” (traducción libre) [51]. El objetivo de optimizar la programación de una represa está dado por la maximización de los beneficios para la generación de energía hidroeléctrica y la irrigación, satisfaciendo las restricciones propias del problema, entre estas: el rango del flujo de agua, el rango de presas almacenadas y la conservación de masa entre el flujo de entrada y salida. HS mostró ser mucho más eficiente que otros algoritmos al ser evaluado en un sistema de 4 presas [51].

Una inundación es un desbordamiento de agua que sumerge una porción de tierra. Las inundaciones son causantes de muchos problemas, entre estos: los daños a infraestructura, las epidemias, la contaminación del agua, escasez de cosechas y dificultades económicas. HS fue aplicado en [52], al igual que varias técnicas [51], para la calibración de tres parámetros del modelo más usado en este tipo de problemas, conocido como el modelo de Muskingum. El objetivo de este modelo es minimizar la diferencia entre las inundaciones reales y las inundaciones simuladas por el computador. Los resultados mostraron que HS fue más eficiente y se acerco al óptimo global encontrado por otra técnica, conocida como BFGS [51].

Las aguas subterráneas son un importante recurso hidráulico en todo el mundo [53]. Por tal motivo, el desarrollo de

estrategias sostenibles de planificación y gestión óptimas son necesarias para operar los recursos del agua subterránea. Modelos de simulación matemáticos son usados generalmente para predecir la futura respuesta de los sistemas de aguas subterráneas para diferentes flujos y condiciones de transporte de masa. Estos modelos se basan en la solución de ecuaciones diferenciales parciales que requieren algunos parámetros del modelo de distribución espacial hidrogeológicos. Dichos parámetros suelen ser desconocidos, debido a la complejidad de este tipo de sistemas. Esto hace que la identificación de estos sea una tarea importante para poder realizar las diferentes simulaciones en modelos de gestión utilizados para modelar las aguas subterráneas [53]. Modelos de simulación/optimización (S/O) han sido usados para la solución de muchos problemas de modelamiento de aguas subterráneas. Estos problemas se pueden clasificar en tres grupos principales: problemas de estimación de parámetros de aguas subterráneas, los problemas de gestión hidráulica de aguas subterráneas, y los problemas de gestión de calidad de aguas subterráneas. La estimación de parámetros se refiere a determinar algunos valores de los parámetros hidrogeológicos a través de enfoque de modelamiento inverso [53]. HS fue aplicado para solucionar el problema de la identificación de los parámetros [54] y los resultados fueron comparados con los obtenidos por la aplicación de GA, mostrando que HS requiere menos simulaciones que GA y las soluciones son iguales o mejores que las obtenidas por GA [53].

Las pendientes de suelo son comunes en ingeniería civil y la evaluación de su estabilidad es de gran importancia en esta rama. Para el análisis de este tipo de problemas es comúnmente usado el método del límite de equilibrio. Utilizando el método del límite de equilibrio, “un valor de F, también llamado el factor de seguridad se puede estimar sin el conocimiento de las condiciones de estrés inicial y un problema puede ser definido y resuelto en un plazo relativamente corto” (traducción libre) [45]. El método del límite de equilibrio es un problema estáticamente indeterminado y diferentes hipótesis sobre la distribución de fuerzas internas son adoptadas por diferentes métodos de análisis. En la actualidad, el método propuesto por Morgenstern y Price (1965) se utiliza para dar el factor de seguridad para la superficie de deslizamiento especificada [10]. El factor mínimo de seguridad de una pendiente y su correspondiente superficie de fallo crítico son fundamentales para el diseño adecuado de las medidas de estabilización del deslizamiento. HS fue empleado para localizar la superficie de fallo crítico en el análisis de estabilidad de pendientes [55]. Los resultados muestran que HS es eficiente y eficaz para la minimización de los factores de seguridad para varios problemas difíciles y el método de generación de superficies fallidas de prueba puede ser importante en el proceso de minimización [55].

4.5 Aplicaciones en Ingeniería Mecánica

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos (Shell and Tube Heat Exchangers - STHXs) son generalmente usados en

procesos industriales, debido a su relativa sencilla fabricación y su adaptabilidad a diferentes condiciones de operación. “El diseño de STHXs, incluyendo el diseño termodinámico y dinámico del fluido y la estimación de costos representa un proceso complejo que contiene un conjunto integrado de normas de diseño y el conocimiento empírico de diversos campos” (traducción libre) [56]. En [56] se explora el uso del HS y el análisis de sensibilidad global (GSA) para la optimización del diseño STHXs desde el punto de vista económico. Comparando los resultados de HS con los obtenidos por un algoritmo genético (GA) se obtiene que HS converge a la solución óptima con mayor precisión [56].

Para el diseño de redes de intercambiadores de calor, en [57] se presenta una nueva metodología híbrida para la síntesis de redes de intercambiadores de calor de costo óptimo (heat Exchange networks - HENs). Dicho problema se resuelve en dos niveles: El nivel superior genera la estructura del HENs usando HS. En el nivel inferior para evaluar el mínimo costo de cada estructura se utiliza una combinación de HS y SQP. Basado en el costo obtenido para cada estructura, HS clasifica los HENs y produce nuevas estructuras hasta que el algoritmo converge a una solución óptima [57]. Para propósitos de validación, se examinaron tres problemas de referencia y también un problema del mundo real de tamaño industrial. Los resultados de este estudio muestran que el nuevo enfoque es capaz de encontrar redes más económicas que las generadas por otros métodos.

Un diseño satelital requiere de la optimización de múltiples objetivos, tales como rendimiento, confiabilidad y peso. Para considerar estos objetivos se debe considerar una optimización multi-objetivo. En este caso HS se ha usado para considerar la conductancia térmica y la masa del tubo de calor. El estudio demostró que los resultados al aplicar HS encuentran una mejor solución que la tradicional basada en cálculo de BFGS [58].

El diseño de amarres de plataformas marinas requiere una cantidad relativamente importante de ciclos de diseño, ya que una solución deseada deberá cumplir restricciones de diseño complejo y ser económicamente competitiva. La complejidad de estas restricciones de diseño en el puerto puede ser consecuencia de acoplamiento entre el movimiento de la plataforma y el puerto (sistema de bandas), restricción de desplazamiento máximo del sistema de bandas, varios números de parámetros de diseño que definen los componentes del sistema del anclaje y la singularidad de las condiciones ambientales dependen del sitio, incluyendo la profundidad del agua, condición actual del viento y la ola, estado del fondo marino, entre otras [10]. El proceso de diseño se torna más complejo si se solicita el costo óptimo del diseño. El diseño de amarres busca encontrar una rigidez adecuada que sea lo suficientemente rígida y suave a la vez para satisfacer principalmente 2 restricciones de diseño: desplazamiento máximo horizontal requerido y la reducción de fuerzas extremas que actúan sobre la plataforma causadas por las interacciones entre el medio ambiente y las respuestas de la plataforma. HS fue aplicado a este problema con el fin

de determinar la longitud y el diámetro de cada componente del amarre [59]. Los resultados obtenidos muestran que la herramienta de optimización de amarres basadas en HS tienen potencial para encontrar rápidamente el costo óptimo de sistemas [10].

4.6 Aplicaciones en Medicina

La determinación de la función de moléculas de ARN se basa en gran medida en su estructura secundaria. Los actuales métodos físicos para la determinación de la estructura del ARN consumen demasiado tiempo y son costosos. “Esto ha hecho que los métodos de predicción computacional de la estructura sean una mejor alternativa para la solución de este tipo de problemas” (traducción libre) [60]. Varios algoritmos se han utilizado para la predicción de la estructura del ARN, incluyendo programación dinámica y algoritmos meta heurísticos. En [60] se propone el algoritmo HSRNAFold para encontrar la estructura secundaria del ARN con la mínima energía disponible y la similitud de la estructura nativa. HSRNAFold es comparado con otras técnicas de programación dinámica: RNAfold y Mfold como punto de referencia. Los resultados muestran que HSRNAFold es comparable a la programación dinámica en la búsqueda de las mínimas energías disponibles en todas las secuencias de prueba de ARN. El método propuesto es eficiente y prometedor en la predicción de la estructura secundaria del RNA basada en la mínima energía disponible [60].

La aplicación de algoritmos de clasificación de sonido incorporados en los audífonos es una tarea difícil de llevar a cabo. Los audífonos tienen que trabajar con una frecuencia de reloj muy baja para reducir al mínimo el consumo de energía y así maximizar la vida útil de la batería [61]. Esto requiere la reducción de la carga computacional, mientras se mantiene una baja probabilidad de error. Dado que el proceso de extracción de características es una de las tareas que más tiempo consume, la selección de un número reducido de características apropiadas es esencial, lo que requiere bajo coste computacional sin degradar la operación de este. HS permite una efectiva búsqueda de soluciones adecuadas a este problema fuertemente restringido. Los resultados del algoritmo HS son comparados con los alcanzados por otros métodos ampliamente utilizados y muestran que HS es una elección viable y muy prometedora en este tipo de problemas [61].

La física médica es una rama de la física que se refiere a la aplicación de radiación para uso terapéutico y de diagnóstico en medicina. En la física médica terapéutica, la radiación ionizante se utiliza para tratar a los pacientes afectados por cáncer. El objetivo principal de la radioterapia es entregar una gran cantidad de dosis de radiación a las células cancerosas sin afectar los órganos circundantes. El proceso comienza con la planificación de la radioterapia, lo que requiere la optimización de la colocación de radioisótopos o la intensidad del haz de radiación. Anteriormente, algoritmos de optimización tales como algoritmos genéticos (GA) y recocido simulado (SA), han

sido ampliamente usados [62]. Sin embargo, HS ha demostrado que es un algoritmo de optimización superior basado en los resultados en otros campos científicos. Por lo tanto, en [62] se investigó la optimización de la alta tasa de dosis de la braquiterapia de próstata con HS. Los resultados mostraron que el algoritmo es significativamente más rápido que el GA y que la rápida planificación permite mejorar el cuidado de paciente en física médica.

4.7 Aplicaciones en Economía

Un problema clásico e importante en Economía es la suma de radios. La suma de radios hace parte de la programación fraccional, la cual tiene como objetivo la optimización de uno o varios radios de diversas funciones. Este problema se considera muy difícil, porque se usan funciones no convexas y multimodales. Entre las aplicaciones de los problemas de suma de radios se encuentran: la contratación gubernamental, la ciencia de transporte, las finanzas, la economía, ingeniería, etc. Además, en su parte investigativa, estos problemas presentan grandes desafíos teóricos y computacionales.

En [63] se propone a PHS (Proposed Harmony Search, Búsqueda Armónica Propuesta), una variante de HS que ajustar el valor de bw basado en la diferencia central finita para aproximarse a la derivada. Los resultados obtenidos optimizando la función Himmelblau, muestran que el PHS obtuvo un mejor rendimiento frente al HS inicial, en cuanto al número de iteraciones. Al aplicar el PHS en la solución de diversos problemas de suma de radios, obtuvieron mejores resultados en el valor objetivo frente a otros métodos.

4.8 Aplicaciones en Transporte

HS ha sido exitoso en infinidad de problemas de transporte, entre ellos el enrutamiento de vehículos [28, 64]. El enrutamiento es uno de los más diversos problemas que se presentan en el campo de la optimización, al cual se le han aplicado diversas técnicas para su solución, como es el caso de los GA. El algoritmo HS fue usado en este tipo de problemas y demostró ser más eficiente a la hora de minimizar el costo total del proceso de transporte de un bus escolar que el algoritmo GA teniendo en cuenta el numero de iteraciones para alcanzar el optimo global, el costo promedio de múltiples ejecuciones y el tiempo de computación. En resumen, HS tiene potencial para ser aplicado en el campo de la ingeniería de tráfico.

4.9 Aplicaciones en Ecología

En la vida moderna, industrial y urbana, la conservación de los ecosistemas y sus especies es muy importante. Con el fin de lograrlo, diferentes técnicas de optimización cuantitativa han sido desarrolladas y utilizadas para el problema de selección de sitios de reserva natural. En el campo de la optimización, cinco clases de problemas de selección de reserva han sido identificados: problema de recuperación de especies (Species Set Covering Problem, SSCP), problema de recuperación máxima de especies (Maximal Covering Species Problem, MCSP), problema de la máxima representación de múltiples

especies (Maximal Multiple-Representation Species Problem, MMRSP), problema de la restricción de oportunidad de preservación (chance constrained covering problem) y problema de la preservación esperada (expected covering problem). De los cinco problemas de optimización propuestos, MCSP ha sido el modelo más usado comúnmente. MCSP maximiza el número de especies conservadas, mientras limita el número de reservas operadas [51, 65, 66]. HS fue modificado para adaptarse a varias funcionalidades específicas del problema como lo son: selección escasa (sparse selection), selección de la primera gran reserva (big-reserve-first selection) y selección de la primera diversidad (diversity-first selection). Aunque HS no alcanzó el óptimo global para el problema planteado con el modelo MCSP, obtuvo muchos resultados cercanos a este. Este aspecto es importante pues la identificación de soluciones óptimas alternativas es valiosa para la planeación y la toma de decisiones, dado el caso de la posible ausencia (no disponibilidad) de alguna reserva [51].

V. TENDENCIAS

La optimización se ha convertido en un campo importante en el cual, el desarrollo de nuevos algoritmos meta heurísticos que utilizan novedosas técnicas ha sido un punto fuerte y se ha convertido últimamente en el objetivo a seguir para muchos algoritmos evolutivos. La inclusión de nuevas técnicas, como la simulación de procesos naturales y la hibridación de las mismas con técnicas utilizadas anteriormente, ha permitido corregir debilidades en los algoritmos e identificar características a mejorar.

A raíz de este fenómeno, se han tenido en cuenta algunos problemas de optimización que se han vuelto un factor estándar para realizar análisis comparativos entre los diferentes métodos y algoritmos de optimización propuestos. El objetivo de este campo de investigación es identificar las características y el campo de aplicación de un nuevo algoritmo frente a otros desarrollados anteriormente, buscando aislar los diferentes factores que hacen fuerte y débil a dicha técnica utilizada en él en comparación a otros.

Diversos algoritmos han nacido desde que el HS fue desarrollado y probado con éxito en 10 funciones que representan problemas clásicos de optimización (Sphere, Schwefel, Step, Rosenbrock, Rotated hyper-ellipsoid, Generalized Schwefel, Rastrigin, Ackley, Griewank, Six-Hump Camel-back) [7], lo cual ha permitido mejorar el rendimiento en ciertas características importantes para el algoritmo. Entre estas se tiene el ruido, la dimensionalidad del problema, el ajuste de parámetros y el tipo de función.

GHS, IHS y NGHS son los desarrollos científicos más destacados que han solucionado algunas de las deficiencias de la versión original de la HS, mejorando el rendimiento y las propiedades de exploración y explotación del algoritmo.

Entre los diversos desarrollos que involucran al algoritmo HS se encuentran: HS + GA [67], Harmony-Tabu (HS+TS) [68], HS + DE [69], HS + PSO + Ant [70], HS + SA [71], HS + Chaos [72], HS + ANN [73], HSSA (HS + SQP) [74], HS + Solver [75], HS + Google Map [76], HS + Simplex [77], HS + Taguchi [78], entre otros.

En este sentido, se espera que en el futuro cercano se realicen nuevos procesos de hibridación del HS o sus variaciones con otras meta heurísticas para resolver problemas en diversas áreas del desarrollo humano. También se espera que HS sea usado en entornos híper heurísticos para la solución de diversos problemas discretos y continuos. Finalmente, la búsqueda de reglas más específicas para definir los valores de los parámetros del algoritmo HS de acuerdo a necesidades específicas del espacio de solución y las restricciones del problema.

VI. CONCLUSIONES

El algoritmo de búsqueda armónica (HS) ha demostrado ser una poderosa herramienta de optimización, la cual no necesita de cálculos matemáticos complejos para obtener soluciones óptimas a un problema determinado. En los últimos años, HS fue aplicado a gran cantidad de problemas, demostrando su eficiencia frente a otros algoritmos meta heurísticos y otras técnicas matemáticas de optimización. El desarrollo continuo de mejoras al algoritmo (GHS, IHS y NGHS, entre otras) y las diversas aplicaciones a nuevos tipos de problemas (economía, ciencias de la computación, ingeniería eléctrica, entre otros), indican que HS es una buena elección si lo que se busca es una poderosa herramienta de programación que obtenga un alto desempeño en la búsqueda de soluciones, un bajo consumo de tiempo, energía y costos computacionales. Su éxito en las diversas aplicaciones en ingeniería civil, ingeniería mecánica y la medicina, entre otras, hacen de HS un algoritmo clave para la optimización general que permite adaptar su estructura y parámetros dependiendo del campo de aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue co-financiado por la Universidad del Cauca bajo el proyecto VRI-2560.

REFERENCIAS

- [1] Geem, Z.W., Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications. 2009: p. 206.
- [2] Yang, X.-S., Harmony Search as a Metaheuristic Algorithm, in Music-Inspired Harmony Search Algorithm. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 1-14.
- [3] Geem, Z.W., Optimal Design of Water Distribution Networks Using Harmony Search. 2009: p. 112.
- [4] Geem, Z.W., Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Engineering Optimization, 2006. 38.
- [5] Geem, Z.W., Harmony search algorithms for structural design optimization, in Studies in computational intelligence, v.239. 2009, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 228.
- [6] Geem, Z.W., Harmony search algorithm for solving Sudoku, in Proceedings of the 11th international conference, KES 2007 and XVII Italian workshop on neural networks conference on Knowledge-based intelligent information and engineering systems: Part I. 2007, Springer-Verlag: Vietri sul Mare, Italy.
- [7] Omran, M.G.H. and M. Mahdavi, Global-best harmony search. Applied Mathematics and Computation, 2008. 198(2): p. 643-656.
- [8] Mahdavi, M., M. Fesanghary, and E. Damangir, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. Applied Mathematics and Computation, 2007. 188(2): p. 1567-1579.
- [9] Zou, D., et al., A novel global harmony search algorithm for reliability problems. Computers & Industrial Engineering, 2010. 58(2): p. 307-316.
- [10] Geem, Z.W., et al., Recent Advances in Harmony Search. Advances in Evolutionary Algorithms, 2008: p. 16.
- [11] Geem, Z., State-of-the-Art in the Structure of Harmony Search Algorithm, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 1-10.
- [12] Geem, Z., J. Kim, and G.V. Loganathan, A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. Simulation, 2001. 76(2): p. 60-68.
- [13] Lee, K. and Z. Geem, A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005. 194(36-38): p. 3902-3933.
- [14] Geem, Z.W., Recent Advances In Harmony Search Algorithm. Studies in Computational Intelligence. Vol. 270. 2010, Annandale, Virginia: Springer
- [15] Bäck, T., Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. 1995: p. 328.
- [16] Kirkpatrick, S., Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. Journal of Statistical Physics, 1984. 34(5-6): p. 12.
- [17] Enrique Alba, R.M., Tabu Search 2006. 36: p. 13.
- [18] Glover, F., et al., The Ant Colony Optimization

- Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances, in Handbook of Metaheuristics. 2003, Springer New York. p. 250-285.
- [19] Vázquez, K., Ant Colony Optimization. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2005. 6(4): p. 459-460.
- [20] Poli, R., J. Kennedy, and T. Blackwell, Particle swarm optimization. Swarm Intelligence, 2007. 1(1): p. 33-57.
- [21] Mira, J., J. Álvarez, and X.-S. Yang, Engineering Optimizations via Nature-Inspired Virtual Bee Algorithms, in Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach. 2005, Springer Berlin / Heidelberg. p. 317-323.
- [22] Yang, X.-S., Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. 2008: p. 128.
- [23] Watanabe, O., T. Zeugmann, and X.-S. Yang, Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, in Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 169-178.
- [24] Forsati, R. and M. Mahdavi, Web Text Mining Using Harmony Search, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 51-64.
- [25] Fourie, J., S. Mills, and R. Green, Visual Tracking Using Harmony Search, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 37-50.
- [26] Mahdavi, M. and H. Abolhassani, Harmony K-means algorithm for document clustering. Data Mining and Knowledge Discovery, 2009. 18(3): p. 370-391.
- [27] Al-Betar, M.A., A.T. Khader, and T.A. Gani, A harmony search for university course timetabling. 2008: p. 12.
- [28] Mahdavi, M., Solving NP-Complete Problems by Harmony Search, in Music-Inspired Harmony Search Algorithm. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 53-70.
- [29] Geem, Z.W. and K.-B. Sim, Parameter-setting-free harmony search algorithm. Applied Mathematics and Computation, 2010. 217(8): p. 3881-3889.
- [30] Das, S., et al., Exploratory Power of the Harmony Search Algorithm: Analysis and Improvements for Global Numerical Optimization. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on. 41(1): p. 89-106.
- [31] Geem, Z.W., Particle-swarm harmony search for water network design. Engineering Optimization, 2009. 41: p. 297-311.
- [32] Geem, Z.W., Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications. Studies in Computational Intelligence. Vol. 191. 2009, Rockville, Maryland: Springer Publishing Company, Incorporated. 206.
- [33] Geem, Z.W. and J.-Y. Choi, Music Composition Using Harmony Search Algorithm. Applications of Evolutionary Computing, 2007. 4448/2007: p. 7.
- [34] Mahdavi, M., et al., Novel meta-heuristic algorithms for clustering web documents. Applied Mathematics and Computation, 2008. 201(1-2): p. 441-451.
- [35] Forsati, R., et al. Hybridization of K-Means and Harmony Search Methods for Web Page Clustering. in Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, 2008. WI-IAT '08. IEEE/WIC/ACM International Conference on. 2008.
- [36] Cobos, C., et al. Web document clustering based on Global-Best Harmony Search, K-means, Frequent Term Sets and Bayesian Information Criterion. in IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC). 2010. Barcelona, Spain: IEEE.
- [37] Tangpattanakul, P., A. Meesomboon, and P. Artrit, Optimal Trajectory of Robot Manipulator Using Harmony Search Algorithms, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 23-36.
- [38] Xu, H., et al., Harmony Search Optimization Algorithm: Application to a Reconfigurable Mobile Robot Prototype, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 11-22.
- [39] Forsati, R., A.T. Haghhighat, and M. Mahdavi, Harmony search based algorithms for bandwidth-delay-constrained least-cost multicast routing. Computer Communications, 2008. 31(10): p. 2505-2519.
- [40] Fesanghary, M., An Introduction to the Hybrid HS-SQP Method and Its Applications, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 99-109.
- [41] Fesanghary, M., Harmony Search Applications in Mechanical, Chemical and Electrical Engineering, in Music-Inspired Harmony Search Algorithm. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 71-86.
- [42] Geem, Z.W., Recent Advances in Harmony Search Algorithm. 2010: p. 176.
- [43] Panigrahi, B., et al., Population Variance Harmony Search Algorithm to Solve Optimal Power Flow with Non-Smooth Cost Function, in Recent Advances In Harmony Search Algorithm. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 65-75.
- [44] Dong, H., et al. Improved harmony search for detection with photon density wave. in International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications. 2007. Beijing, China: SPIE.
- [45] Majidi, B., et al. Harmonic optimization in multi-level inverters using harmony search algorithm. in Power

- and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International. 2008.
- [46] Rong, Z. and L. Hanzo, Iterative Multiuser Detection and Channel Decoding for DS-CDMA Using Harmony Search. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2009. 16(10): p. 917-920.
- [47] Saka, M.P., Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009. 65(1): p. 36-43.
- [48] Geem, Z. and S. Degertekin, Optimum Design of Steel Frames via Harmony Search Algorithm, in *Harmony Search Algorithms for Structural Design Optimization*. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 51-78.
- [49] Saka, M. and F. Erdal, Harmony search based algorithm for the optimum design of grillage systems to LRFD-AISC. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009. 38(1): p. 25-41.
- [50] Rossman, L.A., EPANET- Users Manual. 1994: p. 7.
- [51] Geem, Z., C.-L. Tseng, and J. Williams, Harmony Search Algorithms for Water and Environmental Systems, in *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 113-127.
- [52] Kim, J.H., Z.W. Geem, and E.S. Kim, Parameter Estimation Of The Nonlinear Muskingum Model Using Harmony Search1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2001. 37(5): p. 1131-1138.
- [53] Ayvaz, M., Identification of Groundwater Parameter Structure Using Harmony Search Algorithm, in *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 129-140.
- [54] Ayvaz, M.T., Simultaneous determination of aquifer parameters and zone structures with fuzzy c-means clustering and meta-heuristic harmony search algorithm. *Advances in Water Resources*, 2007. 30(11): p. 2326-2338.
- [55] Cheng, Y.M., et al., An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis. *Engineering Optimization*, 2008. 40(2): p. 95 - 115.
- [56] Fesanghary, M., E. Damangir, and I. Soleimani, Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 2009. 29(5-6): p. 1026-1031.
- [57] Khorasany, R.M. and M. Fesanghary, A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks. *Computers & Chemical Engineering*, 2009. 33(8): p. 1363-1370.
- [58] Geem, Z.W. and H. Hwangbo, Application of Harmony Search to Multi-Objective Optimization for Satellite Heat Pipe Design. 2006.
- [59] Sam Ryu, A.S.D., Caspar N. Heyl, Zong Woo Geem, Mooring Cost Optimization Via Harmony Search. *Proceedings of OMAE07 - 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2007: p. 8.
- [60] Mohsen, A., A. Khader, and D. Ramachandram, An Optimization Algorithm Based on Harmony Search for RNA Secondary Structure Prediction, in *Recent Advances In Harmony Search Algorithm*. 2010, Springer Berlin / Heidelberg. p. 163-174.
- [61] Alexandre, E., L. Cuadra, and R. Gil-Pita, Sound Classification in Hearing Aids by the Harmony Search Algorithm, in *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 173-188.
- [62] Panchal, A., Harmony Search in Therapeutic Medical Physics, in *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. 2009, Springer Berlin / Heidelberg. p. 189-203.
- [63] Jaberipour, M. and E. Khorram, Solving the sum-of-ratios problems by a harmony search algorithm. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010. 234(3): p. 733-742.
- [64] Geem, Z.W., Application of Harmony Search to Vehicle Routing. *American Journal of Applied Sciences*, 2005: p. 6.
- [65] Geem, Z.W., Williams, J.C., Harmony search and ecological optimization. *International Journal of Energy and Environment* 1, 2007: p. 150 - 154.
- [66] Geem, Z.W. and J.C. Williams, Ecological optimization using harmony search, in *Proceedings of the American Conference on Applied Mathematics*. 2008, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS): Cambridge, Massachusetts.
- [67] Farhad, N., K. Ahamad Tajudin, and A.-B. Mohammed Azmi, Adaptive genetic algorithm using harmony search, in *Proceedings of the 12th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. 2010, ACM: Portland, Oregon, USA.
- [68] Das, V.V., et al., Music-Inspired Optimization Algorithm: Harmony-Tabu for Document Retrieval Using Relevance Feedback, in *Information Processing and Management*. 2010, Springer Berlin Heidelberg. p. 385-387.
- [69] Liao, T.W., Two hybrid differential evolution algorithms for engineering design optimization. *Applied Soft Computing*, 2010. 10(4): p. 1188-1199.
- [70] Kaveh, A. and S. Talatahari, Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 2009. 87(5-6): p. 267-283.
- [71] Tan, Y., et al., Design and Simulation of Simulated Annealing Algorithm with Harmony Search, in *Advances*

in Swarm Intelligence. 2010, Springer Berlin / Heidelberg.
p. 454-460.

[72] Santos Coelho, L.d. and D.L. de Andrade Bernert, An improved harmony search algorithm for synchronization of discrete-time chaotic systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009. 41(5): p. 2526-2532.

[73] Lee, J.-H. and Y.-S. Yoon, Modified Harmony Search Algorithm and Neural Networks for Concrete Mix Proportion Design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009. 23(1): p. 57-61.

[74] Fesanghary, M.M., M. Minary-Jolandan, M. Alizadeh, Y., Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008. 197(33-40): p. 3080-3091.

[75] Ayvaz, M.T., et al., Hybridizing the harmony search algorithm with a spreadsheet ‘Solver’ for solving continuous engineering optimization problems. *Engineering Optimization*, 2009. 41(12): p. 1119 - 1144.

[76] Geem, Z.W. and W.E. Roper, Various continuous harmony search algorithms for web-based hydrologic parameter optimisation. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 2010. 1: p. 14.

[77] Woo Seok Jang, H.I.K., Byung Hee Lee, Hybrid Simplex-Harmony search method for optimization problems. *Evolutionary Computation*, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on 2008: p. 8.

[78] Yildiz, A.R., Hybrid Taguchi-Harmony Search Algorithm for Solving Engineering Optimization Problems. *International Journal of Industrial Engineering - Theory, Applications and Practice*, 2008. 15.