

**EL MÉTODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS Y EL CRITERIO DE  
MÍNIMA ENTROPÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN DISIPADOR DE  
CALOR**

**JOSÉ JULIÁN ÁVILA ARIAS  
ORLANDO ANTONIO NAVARRO MONCADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EL MÉTODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS Y EL CRITERIO DE  
MÍNIMA ENTROPÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN DISIPADOR DE  
CALOR**

**JOSÉ JULIÁN ÁVILA ARIAS  
ORLANDO ANTONIO NAVARRO MONCADA**

**Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR**

**PhD. CARLOS RODRIGO CORREA CELY  
INGENIERO QUÍMICO**

**CODIRECTOR**

**PhD(c). IVÁN MAURICIO AMAYA CONTRERAS  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2014**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	19
2. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	20
2.1. CONCEPTO DE OPTIMIZACIÓN .....	20
2.2. MÉTODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS .....	21
2.3. CRITERIO DE MÍNIMA GENERACIÓN DE ENTROPÍA .....	23
3. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS .....	26
3.1. PRUEBA # 1 .....	27
3.2. PRUEBA # 2 .....	28
3.3. PRUEBA # 3 .....	31
4. APLICACIÓN DEL ALGORITMO ABC EN EL DISEÑO DE UN DISIPADOR DE CALOR .....	35
4.1. MODELO PROPUESTO .....	36
4.2. EXPERIMENTOS .....	40
5. CONCLUSIONES .....	49
6. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES .....	51
REFERENCIAS .....	52
ANEXOS .....	54

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del ABC .....	22
Tabla 2. Funciones de prueba utilizadas .....	26
Tabla 3. Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos .....	26
Tabla 4. Valores generales para los experimentos .....	27
Tabla 5. Resultados obtenidos con ABC para la primera prueba .....	28
Tabla 6. Resultados obtenidos con ABC para la segunda prueba.....	29
Tabla 7. Resultados obtenidos con ABC para la tercera prueba .....	31
Tabla 8. Tiempo de ejecución de los resultados de la Tabla 7 .....	32
Tabla 9. Condiciones de operación y parámetros físicos del disipador de calor....	41
Tabla 10. Comparación de resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) por medio de diferentes métodos diseño .....	41
Tabla 11. Comparación de resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) y la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) utilizando diferentes métodos diseño.....	45
Tabla 12. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) de enfriamiento y el espesor ( $d$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño .....	46
Tabla 13. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) de enfriamiento y la altura ( $a$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño.....	46
Tabla 14. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad de flujo ( $V_F$ ) de enfriamiento, la altura ( $a$ ) de cada aleta y el espesor ( $d$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño .....	47
Tabla 15. Resumen de las pruebas de optimización realizadas en el diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas.....	48
Tabla 16. Resultados de la primera prueba realizada para la función $f_1$ .....	57
Tabla 17. Resultados de la primera prueba realizada para la función $f_2$ .....	57

Tabla 18. Resultados de la primera prueba realizada para la función $f_3$ .....	58
Tabla 19. Resultados de la primera prueba realizada para la función $f_4$ .....	58
Tabla 20. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) .....	64
Tabla 21. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) y la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) .....	64
Tabla 22. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) y el espesor ( $d$ ) de cada aleta.....	64
Tabla 23. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) y la altura ( $a$ ) de cada aleta.....	65
Tabla 24. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ), la altura ( $a$ ) de cada aleta y el espesor ( $d$ ) de cada aleta ...	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pseudocódigo del algoritmo ABC .....	22
Figura 2. Número de iteraciones en función de la dimensión del problema.....	29
Figura 3. Tiempo de ejecución en función de la dimensión del problema.....	30
Figura 4. Solución encontrada para cada función con respecto al número de fuentes de alimento.....	33
Figura 5. Tiempo de ejecución de la solución encontrada por ABC.....	33
Figura 6. Parámetros de diseño del disipador de calor.....	35
Figura 7. Comportamiento de la función Tasa de Generación de Entropía ( $S_{gen}$ ) y la Resistencia Total del Disipador ( $R_{Total}$ ) en función del Número de Aletas ( $N$ ) ..	42
Figura 8. Comportamiento de los factores $S_{gen1}$ y $S_{gen2}$ en función del número de aletas ( $N$ ) .....	43
Figura 9. Comportamiento de $S_{gen1} + S_{gen2}$ en función de las fuentes de alimento a) generadas inicialmente al azar y b) reagrupadas una vez finalizado el proceso de optimización .....	44
Figura 10. Convergencia del algoritmo ABC durante la última prueba de optimización .....	48
Figura 11. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_1$ .....	59
Figura 12. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_2$ .....	59
Figura 13. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_3$ .....	60
Figura 14. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_4$ .....	60
Figura 15. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_1$ .....	61
Figura 16. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_2$ .....	62
Figura 17. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función $f_3$ .....	62

Figura 18. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_4$   
.....63

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Descripción del algoritmo Colonia Artificial de Abejas.....	54
Anexo B. Resultados de la primera evaluación realizada al algoritmo ABC. ....	57
Anexo C. Resultados de la tercera evaluación realizada al algoritmo ABC. ....	61
Anexo D. Resultados de las pruebas de optimización para el diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas.....	64

## NOMENCLATURA

$a$	<i>Altura de la aleta m.</i>
$A_c$	<i>Área de la sección transversal de la aleta <math>m^2</math>.</i>
$b$	<i>Espesor de la placa base m.</i>
$d$	<i>Espesor de la aleta m.</i>
$D_h$	<i>Diámetro Hidráulico del canal.</i>
$f_{app}$	<i>Factor de fricción aparente para el desarrollo del flujo hidrodinámico.</i>
$f$	<i>Factor de fricción.</i>
$h$	<i>Coefficiente de transferencia de calor por convección <math>W/(m^2 \cdot K)</math>.</i>
$k$	<i>Conductividad térmica del material de las aletas <math>W/(m \cdot K)</math>.</i>
$K_c$	<i>Coefficiente de contracción repentina del canal disipador.</i>
$K_e$	<i>Coefficiente de expansión repentina del canal disipador.</i>
$K_f$	<i>Conductividad térmica del fluido <math>W/(m \cdot K)</math>.</i>
$L$	<i>Longitud del disipador de calor m.</i>
$L^*$	<i>Longitud ajustada del canal m.</i>
$m$	<i>Parámetro de la aleta <math>m^{-1}</math>.</i>
$n$	<i>Numero de aletas.</i>
$Nu$	<i>Numero de Nulsselt.</i>
$P_c$	<i>Perímetro de la aleta m.</i>
$P_r$	<i>Numero de Prandtl.</i>
$Re_{Dh}$	<i>Número del canal de Reynolds.</i>
$Re_s$	<i>Número de Reynolds.</i>
$Re^*_s$	<i>Número Reynolds del canal ajustado.</i>
$R_{fin}$	<i>Resistencia térmica de una aleta <math>K/W</math>.</i>
$R_{total}$	<i>Resistencia térmica total <math>K/W</math>.</i>
$s$	<i>Espaciamiento entre dos aletas (ancho del canal).</i>

$T_a$	Temperatura Ambiente °C.
$V_{ch}$	Velocidad promedio del canal m/s.
$V_f$	Velocidad de aproximación m/s.
$W$	Ancho del dissipador de calor m.
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### Símbolos Griegos

$\rho$	Densidad del aire $\text{kg}/\text{m}^3$
$\Delta P$	Caída de presión en el canal del dissipador de calor Pa

#### Subíndices

$app$	Aparente
$c$	Contracción
$e$	Expansión
$fin$	Aleta
$Re_{Dh}$	Número del canal de Reynolds.
$Re_s$	Número de Reynolds.

## RESUMEN

**TÍTULO:** El método de Colonia Artificial de Abejas y el Criterio de Mínima Entropía para el diseño óptimo de un disipador de calor

**AUTORES:** José Julián Ávila Arias – Orlando Antonio Navarro Moncada \*\*

**PALABRAS CLAVE:** ABC, Disipador de Calor, Generación de Mínima Entropía, Optimización.

**CONTENIDO:** En el presente trabajo se lleva a cabo la implementación del algoritmo de Colonia Artificial de Abejas (ABC) como estrategia de solución al diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas, obtenido mediante el Criterio de Mínima Generación de Entropía. Este método de modelado y optimización combina principios fundamentales de mecánica de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos de transporte, además de características físicas del disipador (dimensiones, material de construcción, restricciones, formas). De la inclusión y combinación de estos parámetros se logra obtener un modelo más realista del elemento dispositivo de enfriamiento. En cuanto a la implementación de ABC, como primer paso se procede a la verificación del algoritmo mediante funciones típicas de optimización. En este proceso se ejecutaron tres diferentes pruebas con el objetivo de evaluar el funcionamiento, la convergencia y el rendimiento del algoritmo. Una vez verificado esto, se aplica el algoritmo ABC para obtener la solución al modelo del disipador. De este modo, se procede a la ejecución de un contraste con el que se confirma que los resultados obtenidos recrean los reportados por la literatura. En efecto, el algoritmo de Colonia de Abejas alcanza el rendimiento y la utilidad requerida como estrategia de optimización en la búsqueda de solución a problemas de ingeniería.

---

\* Trabajo de Grado en la Modalidad de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenieras Fisicomecánicas. Escuela de Ingenieras Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector Ph(C). Iván Mauricio Amaya Contreras.

## ABSTRACT

**TITLE:** The method of Artificial Bee Colony and Entropy Generation Minimization for the optimal design of a heat sink<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** José Julián Ávila Arias – Orlando Antonio Navarro Moncada<sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** ABC, Entropy Generation Minimization, Optimization, Plate-Fin Heat Sinks.

**CONTENT:** In the present work it carried out the implementation of the algorithm artificial bee colony (ABC) as solution strategy for the design of heat sink kind of micro channel, obtained by means of criterion Minimum Generation Entropy. This method combines modeling and optimization fundamental principles of fluid mechanics, heat transfer and other transport phenomena, in addition to physical characteristics of the sink (dimensions, material of construction, restrictions, and forms). Inclusion and combination of these parameters is possible to obtain a more realistic device cooling element model. Regarding the implementation of ABC, as a first step it proceeds to the verification of algorithm using optimization typical functions. In this process, three different tests were run in order to evaluate the performance, convergence and performance of the algorithm. After this, the ABC algorithm is applied to obtain the model of heat sink. Thus, it proceeds to the execution of a comparison which confirms the results obtained recreate those reported in the literature. Indeed, the algorithm artificial bee colony achieves the performance and utility required as optimization strategy in find to solutions to engineering problems.

---

<sup>\*</sup> Work Degree in Research Mode.

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physicomechanical Engineers. School of Electrical Engineers, Electronics and Telecommunications. Director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector Ph(C). Iván Amaya Mauricio Contreras.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el continuo desarrollo tecnológico ha permitido que en el diseño de circuitos integrados (CI) se logre empaquetar una alta cantidad de componentes electrónicos en un solo chip. Es así como el número de componentes en los CI ha evolucionado de niveles como SSI (Small-Scale Integration) y MSI (Medium-Scale Integration), donde se integran de cientos a miles de transistores en un chip, hasta niveles como LSI (Large-Scale Integration), y VLSI (Very Large-Scale Integration) que integran cientos de miles a millones de transistores en un mismo chip [12]. Atado a este desarrollo tecnológico, se ha generado de manera directa un aumento en las exigencias en disipación de calor. Esto debido a que los transistores adicionales aumentan la tasa de generación de calor, que pueden llegar a degradar el comportamiento del dispositivo, o incluso a destruirlo.

Para dar solución al problema de transferencia de calor en CI, Tuckerman y Pease [11] propusieron el uso de disipadores de calor con micro-canales. Estos elementos están compuestos por múltiples micro-canales y se encuentran fijados al sustrato del componente electrónico. El calor generado por el componente electrónico es transferido al fluido refrigerante por una fuerza de convección y retirado de los micro-canales, lo cual permite una tasa de transferencia de calor alta. Un modelo de estos elementos, puede ser obtenido mediante la aplicación del Criterio de Mínima Generación de Entropía. Dicho método fue propuesto por Bejan [2], en el cual se incluyen principios fundamentales de mecánica de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos de transporte, además de características físicas del disipador (dimensiones, material de construcción, restricciones, formas). De la inclusión y combinación de estos parámetros se logra obtener un modelo más realista del elemento disipador de calor.

Esta investigación propone la implementación de un algoritmo metaheurístico para solucionar el modelo de un disipador de calor de tipo placa de aletas. Este modelo fue obtenido mediante el Criterio de Mínima Generación de Entropía, y se propone optimizar el número de aletas ( $N$ ), la velocidad del flujo refrigerante ( $V_f$ ), el espesor de cada aleta ( $d$ ) y la altura de cada aleta ( $a$ ). El algoritmo utilizado se denomina Colonia Artificial de Abejas (ABC por sus siglas en inglés *Artificial Bee Colony*) [8] y los resultados obtenidos serán contrastados con los reportados por Culham y Muzychka [5] y por Araque [1], los cuales utilizaron un método determinístico y un método metaheurístico híbrido, respectivamente.

## 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN<sup>1</sup>

El diseño óptimo de un disipador de calor de tipo placa de aletas, modelado bajo el Criterio de Mínima Generación de Entropía, se logra solucionando de manera simultánea un sistema de ecuaciones no lineales, en el cual se combinan diferentes parámetros de diseño. Autores como Culham y Muzychka [5], y Araque [1] presentan una solución a esta serie de ecuaciones. Los dos primeros mediante el método determinístico Newton Raphson, y el último mediante el método metaheurístico híbrido Enjambre de Partículas + Simplex. Este informe presenta al algoritmo metaheurístico de Colonia Artificial de Abejas para encontrar una solución al modelo de un disipador de tipo placa de aletas. Los resultados obtenidos se contrastarán con los obtenidos por medio de los dos métodos anteriormente mencionados.

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un disipador de calor óptimo utilizando el algoritmo de Colonia Artificial de Abejas y el Criterio de Mínima Generación de Entropía. (*Ver Página 35*).

### 1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para dar cumplimiento al objetivo general del trabajo de grado, se requiere:

- 1) Implementar el algoritmo de optimización Colonia Artificial de Abejas en la plataforma comercial MATLAB. (*Ver página 26*).
- 2) Contrastar los resultados obtenidos con los reportados previamente en la literatura. (*Ver página 40*).

---

<sup>1</sup> Investigación constituida por el aporte intelectual consensuado de los estudiantes José Ávila y Orlando Navarro con el Profesor Carlos Rodrigo Correa y el Ingeniero Iván Mauricio Amaya.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se describen, de manera breve y clara, los conceptos primordiales que abarcan la teoría necesaria para la comprensión del presente trabajo de grado en la modalidad investigación. En la primera parte, se aborda el concepto de optimización. Seguido a esto, se presenta el algoritmo metaheurístico Colonia Artificial de Abejas. Por último, se enuncia el modelado a través del Criterio de Mínima Generación de Entropía.

### 2.1. CONCEPTO DE OPTIMIZACIÓN

La solución de un problema de optimización se obtiene por medio de la selección del mejor elemento en un conjunto de posibles alternativas. Para problemas con espacios de búsqueda pequeños se puede hallar una solución en un tiempo corto evaluando cada una de las posibles soluciones. Sin embargo, en problemas donde el espacio de búsqueda es demasiado grande es ineficiente hacer una búsqueda exhaustiva. Por lo anterior, se justifica el uso de métodos no tradicionales o metaheurísticos. Estos métodos permiten realizar una exploración rápida y eficiente de todo el espacio de búsqueda, lo que a su vez logra una solución aceptable en corto tiempo y con un bajo costo computacional.

Como ejemplo de técnicas metaheurísticas, que basan su funcionamiento en comportamientos colectivos presentes en la naturaleza, podemos mencionar los algoritmos basados en colonias de hormigas o *Ant Colony Optimization* (ACO), enjambres de partículas o *Particle Swarm Optimizacion* (PSO) y colonia de abejas o *Artificial Bee Colony* (ABC).

A continuación, se presenta una descripción detallada de la técnica que se utiliza en la presente investigación: el método de Colonia Artificial de Abejas.

## 2.2. MÉTODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS

El método de Colonia Artificial de Abejas (ABC por sus siglas en inglés *Artificial Bee Colony*) es un algoritmo de tipo metaheurístico desarrollado en el 2005 por Dervis Karaboga, quien se inspiró en el comportamiento inteligente de las abejas melíferas para llevar a cabo la búsqueda de fuentes de alimento [8].

En ABC, la colonia artificial se compone de abejas empleadas y de abejas desempleadas, y estas últimas pueden ser observadoras o exploradoras. Las abejas empleadas explotan las fuentes de alimento; las abejas observadoras permanecen en la colonia a la espera de elegir una fuente de alimento para explotar; por último, las abejas exploradoras realizan una búsqueda aleatoria de nuevas fuentes de comida.

En el algoritmo de Colonia Artificial de Abejas, la primera mitad de la colonia se compone de abejas empleadas y la otra mitad de desempleadas. Cada fuente de alimento tiene asignada una abeja empleada. En otras palabras, el número de abejas empleadas es igual al número de fuentes de alimento alrededor de la colmena. Si alguna fuente no mejora después de cierto número de iteraciones, las abejas la abandonan y la reemplazan por una nueva fuente, encontrada de manera aleatoria por una abeja exploradora [6]. Los principales pasos del algoritmo son los siguientes:

- *Inicializar*
- *REPETIR*
- *Fase de las abejas empleadas*
- *Fase de las abejas observadoras*
- *Fase de las abejas exploradoras*
- *La mejor fuente de alimento encontrada hasta el momento se registra*
- *HASTA (Se cumplen los requisitos)*

ABC presenta un bajo número de parámetros para su ejecución, como puede verse en la Tabla 1 [7].

Tabla 1. Parámetros del ABC

<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
Número de soluciones	SN	Número de soluciones (fuentes de alimento), que es igual al número de abejas empleadas u desempleadas observadoras.
Número de ciclos	MCN	Número total de ciclos (iteraciones) que ejecutará ABC
Límite	Limit	Número de ciclos que se conservará una solución sin mejora antes de ser reemplazada por una nueva generada por una abeja exploradora

Fuente: Autores

Figura 1. Pseudocódigo del algoritmo ABC

```

1: Inicializar la población de soluciones  $x_{i,j}$ ,  $i = 1 \dots SN$ ,  $j = 1 \dots D$ ;  $abandono_i = 0$ ,
   donde  $abandono$  es el contador para abandono de fuentes que no mejoran.
2: Evaluar la población de soluciones
3: Ciclo = 1
4: REPETIR

   {--Fase de Abejas Empleadas--}
5: For  $i = 1$  hasta  $SN$  hacer
6:   Producir nuevas fuentes  $v_{i,j}$  por las abejas empleadas que se encuentran en
   las fuentes de alimento  $x_{i,j}$  usando ( 1 ) y calcular la calidad asociada a esta
   nueva fuente

           
$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{ik}) \quad ( 1 )$$


7:   Aplicar el proceso de selección entre  $v_{i,j}$  y  $x_{i,j}$ , y seleccionar la mejor
8:   Si la fuente  $x_{i,j}$  no mejora,  $abandono_i = abandono_i + 1$ , de lo contrario
    $abandono_i = 0$ 
9: end for
10: Calcular el valor de probabilidad  $P_{i,j}$  para las soluciones  $x_{i,j}$  usando ( 2 )

           
$$p_i = \frac{f_i t_i}{\sum_{n=1}^{SN} f_i t_n} \quad ( 2 )$$


```

```

    {--Fase de Abejas Desempleadas--}
11:  $t = 0, i = 1$ 
12: REPETIR
13: if  $random < P_i$  entonces
14: Producir nuevas fuentes  $v_{i,j}$  por las abejas desempleadas usando ( 1 ) y calcular la calidad asociada a esta nueva fuente
15: Aplicar el proceso de selección entre  $v_{i,j}$  y  $x_{i,j}$ , y seleccionar la mejor
16: Si la fuente  $x_{i,j}$  no mejora,  $abandono_i = abandono_i + 1$ , de lo contrario  $abandono_i = 0$ 
17:  $t = t + 1$ 
18: end if
19: hasta ( $t = SN$ )

    {--Fase de Abejas Exploradoras--}
20: if  $max(abandono_i) > limit$  entonces
21: Reemplazar  $x_{i,j}$  con una nueva fuente encontrada de manera aleatoria por ( 3 )

                
$$x_i^j = x_{min}^j + rand(0,1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (3)$$


22: end if
23: Memorizar la mejor solución lograda hasta ahora
24:  $Ciclo = Ciclo + 1$ 
25: hasta ( $Ciclo = MCN$ )

```

Fuente: Autores

En el Anexo A se encuentra una descripción detallada del algoritmo Colonia Artificial de Abejas.

### 2.3. CRITERIO DE MÍNIMA GENERACIÓN DE ENTROPÍA

El criterio de mínima generación de entropía (EGM, por sus siglas en inglés *Entropy Generation Minimization*) es un método de modelado y optimización que incorpora, además de características físicas del sistema o del proceso (dimensiones, materiales, restricciones, formas), principios fundamentales de mecánica de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa y otros fenómenos de transporte [4], para la construcción de un modelo realista del

mismo. El continuo desarrollo del método ha permitido su aplicación a sectores de la ingeniería térmica y la ciencia, tales como: la criogenia, transferencia de calor, los sistemas de almacenamiento, plantas de energía solar, las plantas de energía nuclear y fósil, y refrigeradores [3].

La generación de entropía está fuertemente relacionada con la transferencia de calor y los efectos de fricción, los cuales sirven como medida directa de la pérdida de energía que se produce durante determinado proceso.

El método de mínima generación de entropía aporta un medio para evaluar conjuntamente los parámetros más relevantes de un sistema como el que se pretende abordar en este trabajo de grado (Modelado de un disipador de calor), con respecto al rendimiento térmico y los efectos viscosos que en este se presentan. Este método permite la optimización de uno o más parámetros de diseño [2], por lo cual se requiere fijar los demás parámetros.

Para calcular la entropía y minimizarla, el método EGM muestra un enfoque más distante de la termodinámica, el cual armoniza la termodinámica, mecánica de fluidos y la transferencia de calor en una herramienta poderosa para el modelado y optimización de sistemas reales. Este método consta de 3 aspectos críticos que son: el modelado del sistema, el desarrollo de la tasa de generación de entropía como función de parámetros físicos del modelo y la minimización de esta misma tasa ya calculada.

La realización del modelado y la optimización de EGM se utilizan dos enfoques los cuales consisten:

- I. Considerar el sistema completo, para luego dividir este en comportamientos de uno o más mecanismos irreversibles y declarar el resto del sistema libre de irreversibilidad.

II. Dividir el sistema en sus componentes reales y explorar dichas componentes en búsqueda de una o más características elementales.

Este segundo enfoque es utilizado para realizar el modelado del sistema estudiado en este trabajo, el cual consiste en reducir al mínimo la tasa de generación de entropía de manera básica para cada nivel, es decir comenzar desde lo más simple hacia lo más complejo. Un punto importante de este enfoque se encuentra cuando se considera una componente o característica elemental en un sistema grande por separado, esta componente especificada en los puntos de separación actúa como restricción en la optimización del sistema más pequeño. El principio de aislamiento termodinámico [2] debe aplicarse en las etapas anteriores de la optimización, cuando las componentes y elementos están totalmente integrados al sistema [4].

El modelado del disipador que se desea estudiar en este trabajo se presenta en la sección 4.1 donde se aplica el enfoque de características elementales a un cuerpo para encontrar su tasa de generación de entropía dividido en dos componentes que son: la generación de entropía debida a la transferencia de calor y la generación debida a la fuerza de arrastre del fluido refrigerante.

### 3. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS

En el presente capítulo se expone la verificación del algoritmo Colonia Artificial de Abejas, mediante la aplicación de funciones típicas de optimización recopiladas por M. Molga y C. Smutnicki [9]. La formulación, rango y valor óptimo de estas funciones se dan en la Tabla 2.

Tabla 2. Funciones de prueba utilizadas

<i>Función</i>	<i>Formulación</i>	<i>Rango</i>	<i>Óptimo</i>
<i>De Jong's</i>	$f_1 = \sum_{i=1}^D x_i^2$	$-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	$f(\vec{0}) = 0$
<i>Valle Rosenbrock</i>	$f_2 = \sum_{i=1}^{D-1} 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2$	$-2.048 \leq x_i \leq 2.048$	$f(\vec{0}) = 0$
<i>Rastrigin</i>	$f_3 = 10D + \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i))$	$-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	$f(\vec{0}) = 0$
<i>Griewangk</i>	$f_4 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$-600 \leq x_i \leq 600$	$f(\vec{0}) = 0$

Fuente: Autores

En la Tabla 3 se adjuntan las especificaciones del equipo de cómputo utilizado para ejecutar las pruebas. Para desarrollar el scripts del algoritmo y sus correspondientes pruebas se utilizó el software de cómputo MathWorks® MatLAB® 7.0.4.

Tabla 3. Especificaciones del equipo de cómputo usado en los experimentos

<i>Fabricante</i>	<i>Toshiba®</i>
<i>Modelo</i>	<i>Satellite™ L745-SP4147CL</i>
<i>Procesador</i>	<i>Intel® Core™ i5-2430M @ 2.4 GHz</i>
<i>RAM</i>	<i>4.00 GB</i>
<i>Sistema Operativo</i>	<i>Microsoft® Windows® 7 Home Premium de 64 bits</i>

Fuente: Autores

En el proceso de verificación del algoritmo ABC, se ejecutaron tres diferentes pruebas. La primera de ellas, evalúa el correcto funcionamiento del algoritmo. En la segunda prueba se aumentó el grado de complejidad de los problemas para corroborar la convergencia del algoritmo. Por último, se determinó la influencia de los parámetros de ejecución del algoritmo en el rendimiento del mismo.

### 3.1. PRUEBA # 1

En la primera prueba,  $f_1$  función De Jong's,  $f_2$  función Valle Rosenbrock,  $f_3$  función Rastrigin y  $f_4$  función Griewangk, toman como dimensión el valor de 2. Cada experimento consta de 10 repeticiones con diferentes fuentes iniciales. En el algoritmo se establecieron dos criterios de parada: un valor de tolerancia asociado a la respuesta y otro de saturación, que finaliza el proceso una vez la respuesta no mejora después de cierto número de iteraciones. Estos valores se pueden observar en Tabla 4. En el caso del algoritmo ABC, el número de fuentes de alimento ( $SN$ ) es igual a 100, el número de ciclos ( $MCN$ ) es de 1000 y el valor de Limite ( $Limit$ ) es igual a  $0.1 \times MCN$ .

Tabla 4. Valores generales para los experimentos

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>R</i>	10
<i>D</i>	2
<i>Tol</i>	1e-15
<i>Sat</i>	0.1*MCN

*R, Número de Repeticiones; D, Dimensión para las Funciones; Tol, Valor de Tolerancia; Sat, Valor de Saturación; MCN, Máximo Número de Ciclos (Parámetro de ejecución del ABC).*

Fuente: Autores

El mejor resultado obtenido con ABC de las 10 repeticiones de cada experimento, y su comparación respecto al valor óptimo, se muestra en la Tabla 5. También se presenta el número de iteraciones, el tiempo de cómputo y el criterio de parada de

esta prueba. Adicionalmente se presenta la desviación estándar de las diez repeticiones.

Tabla 5. Resultados obtenidos con ABC para la primera prueba

<i>Función</i>	<i>Mejor Resultado</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Iteraciones</i>	<i>Criterio de Parada</i>	<i>Tiempo [s]</i>	<i>Desviación Estándar</i>
$f_1$	3.32215E-17	0	51	Tol	0.7921	2.99492E-16
$f_2$	1.63705E-06	0	112	Sat	1.5962	0.000904631
$f_3$	0	0	78	Tol	1.1866	0
$f_4$	1.11022E-16	0	196	Tol	2.898	3.35321E-16

Fuente: Autores

De la Tabla 5 se observa que el algoritmo encuentra el valor óptimo de la función  $f_3$ . Para las funciones  $f_1$  y  $f_4$ , el algoritmo encuentra una respuesta cercana al óptimo de cada función. En cuanto a  $f_2$ , el mínimo se encuentra a lo largo de un estrecho valle en forma de cilindro, lo que lleva a que transcurran muchas iteraciones sin que mejore el óptimo y por tanto el algoritmo sale por saturación. En el Anexo B se encuentran de manera detallada los resultados de cada uno de los experimentos realizados, así como las figuras de convergencia (Figura 11 a Figura 14) de los resultados mostrados en la Tabla 5.

### 3.2. PRUEBA # 2

Para el desarrollo de la segunda prueba se aumenta el valor de la dimensión de cada problema. Para este caso se toman 10, 30 y 50 dimensiones. El número de ciclos, *MCN*, durante estos experimentos es de 5000. Los resultados obtenidos de esta prueba se consignan en la Tabla 6, y en la Fuente: Autores

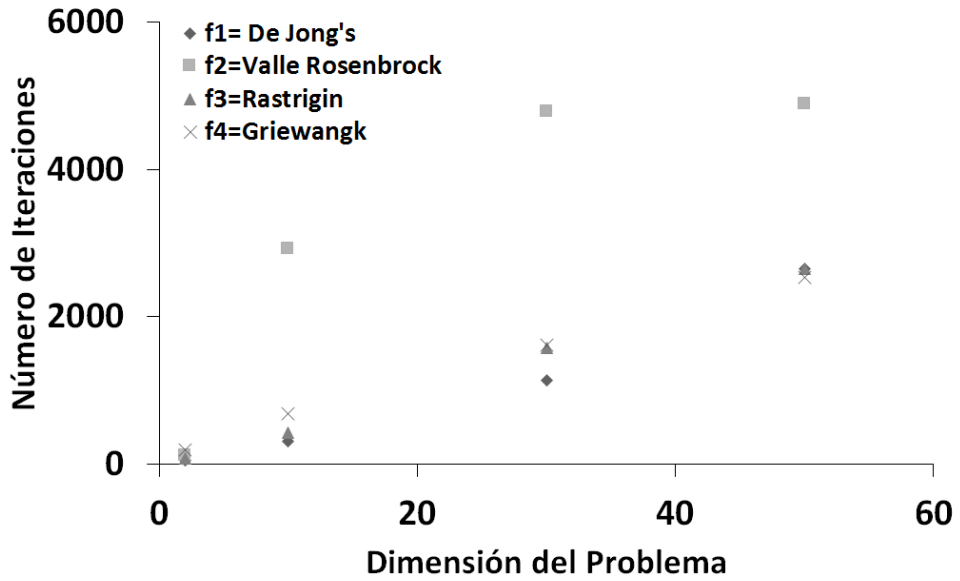
Figura 2 y Figura 3 se muestra el comportamiento del número de iteraciones y tiempo de ejecución en función de la dimensión de cada problema.

Tabla 6. Resultados obtenidos con ABC para la segunda prueba

<i>Función</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Mejor resultado</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Iteraciones</i>	<i>Tiempo [s]</i>
$f_1$	10		4.23E-16	2.33E-16	304	5.7617
	30	0	7.12E-16	8.65E-17	1141	17.5441
	50		7.94E-16	6.43E-17	2658	37.3103
$f_2$	10		1.94E-04	9.30E-03	2927	45.5055
	30	0	5.15E-04	1.58E-01	4785	61.4965
	50		9.77E-02	7.96E+00	4891	82.4587
$f_3$	10		0.00E+00	0.00E+00	421	8.2381
	30	0	0.00E+00	0.00E+00	1578	26.9275
	50		0.00E+00	5.22E-14	2656	40.1984
$f_4$	10		9.99E-16	3.36E-16	690	17.6188
	30	0	2.22E-16	2.74E-16	1622	42.1053
	50		6.66E-16	1.18E-16	2537	52.8892

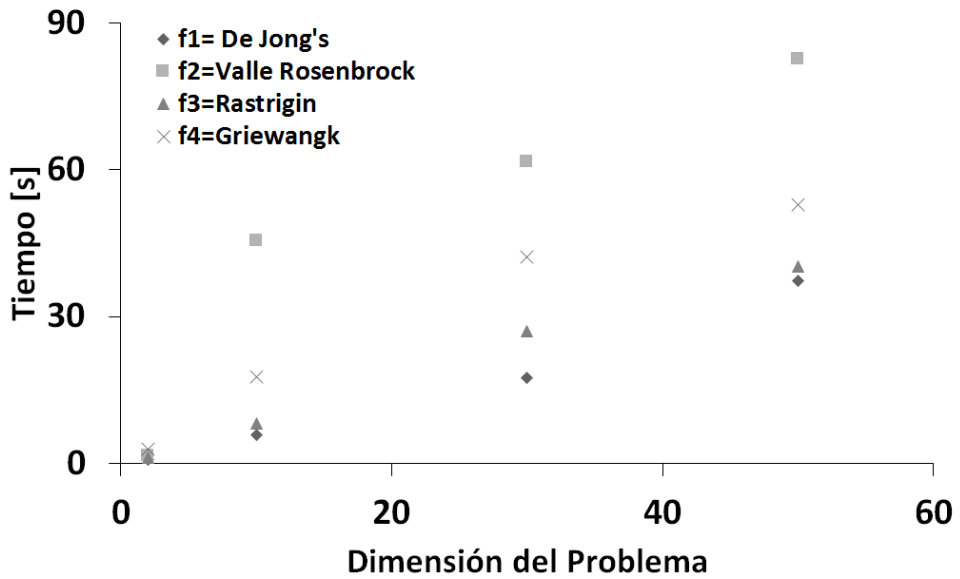
Fuente: Autores

Figura 2. Número de iteraciones en función de la dimensión del problema



Fuente: Autores

Figura 3. Tiempo de ejecución en función de la dimensión del problema



Fuente: Autores

Tal como se observa en la Tabla 6, ABC alcanza el valor óptimo de la función  $f_3$  para todas las dimensiones (10, 30 y 50). Para  $f_1$  y  $f_4$  se logra una solución próxima (del orden de  $10E-16$ ) al valor óptimo de cada una de ellas. En el caso de

$f_2$  se alcanza una respuesta por saturación con baja precisión. Nuevamente, esto es debido a la difícil convergencia que presenta esta función en particular.

De la Fuente: Autores

Figura 2 se observa, que a mayor dimensión del problema, se necesitan más iteraciones para llegar a una respuesta. Este comportamiento se puede observar nuevamente en la Figura 3, pero para el tiempo de convergencia. De lo anterior, se puede concluir la fuerte dependencia del tiempo de ejecución y de las iteraciones, con respecto a la dimensión del problema.

### 3.3. PRUEBA # 3

Con el fin de analizar el comportamiento del algoritmo ABC con respecto al número de fuentes de alimento<sup>2</sup> ( $SN$ ) se realizaron pruebas variando este valor. Las funciones toman como dimensión el valor de diez y el número de ciclos se fija en 1000 como único criterio de parada. En la Tabla 7 y Fuente: Autores

Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos y tiempo de cómputo para cada función con 5, 25 y 50 fuentes. En el Anexo C se adjuntan las gráficas del comportamiento de los resultados presentes en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos con ABC para la tercera prueba

<i>Función</i>	<i>Número de fuentes de alimento (SN)</i>		
	5	25	50
$f_1$	2.7615E-16	1.7709E-16	7.4194E-17

<sup>2</sup> Parámetro de ejecución del ABC dado en la Tabla 1.

$f_2$	0.0286	0.0143	0.0076
$f_3$	1.42E-14	0	0
$f_4$	0.0295	0.0172	0.0074

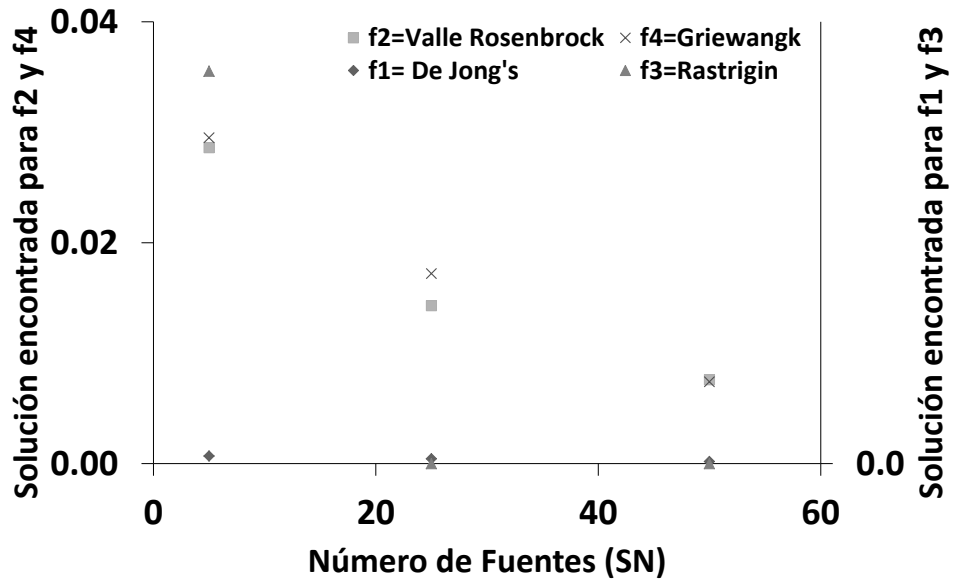
Fuente: Autores

Tabla 8. Tiempo de ejecución de los resultados de la Tabla 7

<i>Función</i>	<i>Número de fuentes de alimento (SN)</i>		
	5	25	50
$f_1$	0.4430	2.1414	6.6057
$f_2$	0.4553	2.4131	6.7418
$f_3$	0.4573	2.3723	6.0975
$f_4$	0.9590	3.8986	8.3490

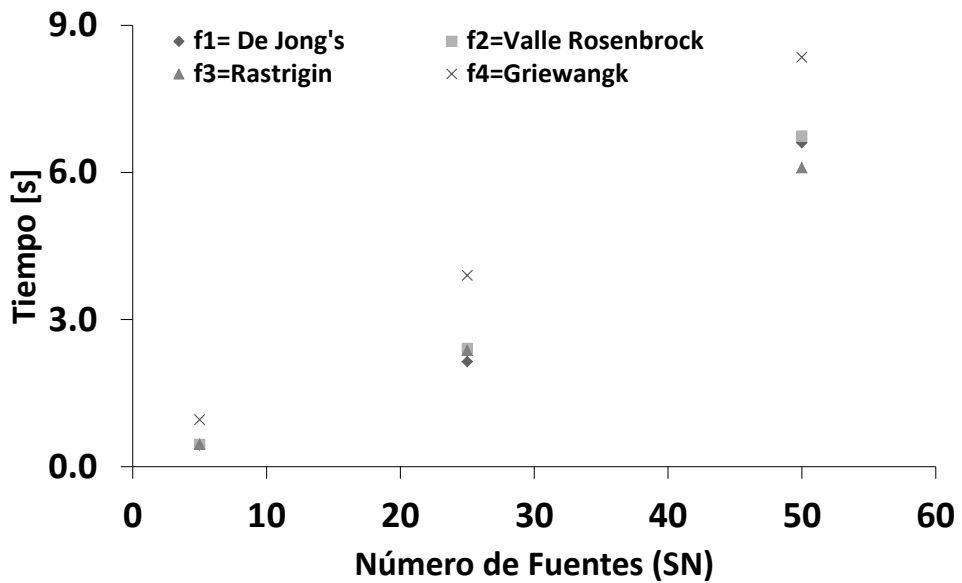
Fuente: Autores

Figura 4. Solución encontrada para cada función con respecto al número de fuentes de alimento



Fuente: Autores

Figura 5. Tiempo de ejecución de la solución encontrada por ABC



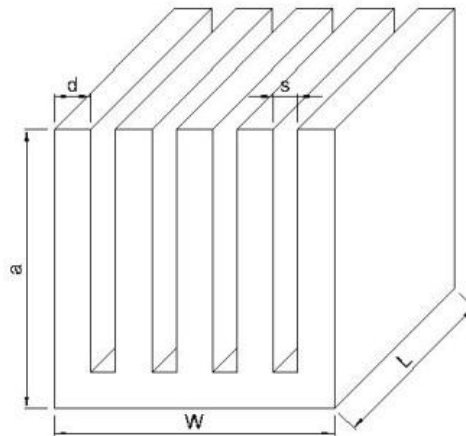
Fuente: Autores

En la Figura 4 se aprecia, que a mayor número de fuentes, la respuesta encontrada por el algoritmo se acerca cada vez más al valor óptimo de cada una de las funciones, cero para todas en este caso. Pero a su vez, como se puede observar en la Figura 5, el tiempo de ejecución aumenta cuan mayor es el número de fuentes.

#### 4. APLICACIÓN DEL ALGORITMO ABC EN EL DISEÑO DE UN DISIPADOR DE CALOR DE CALOR

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación del algoritmo ABC para encontrar el diseño óptimo de un disipador de calor de tipo paca de aletas, (Figura 6) modelado bajo el Criterio de Mínima Generación de Entropía. A partir de la información recopilada en cada prueba, se contrasta el método con las investigaciones previas realizadas por [5] y por [1]. Para ello, se observan detalles como: parámetros dimensionales del disipador, número de iteraciones y tiempo de cómputo.

Figura 6. Parámetros de diseño del disipador de calor



Fuente: Autores

De la misma manera, se realiza una descripción detallada de las ecuaciones que modelan un disipador de calor de tipo placa de aletas. Estas derivan del estudio de la minimización en la generación de entropía junto con los factores que intervienen en el diseño y su construcción. La descripción se guía por las investigaciones ya realizadas por [5-6] y [10], y se expone a continuación.

#### 4.1. MODELO PROPUESTO

La descripción del modelo utilizado en este trabajo está sujeto a las siguientes hipótesis [5]: velocidad de flujo uniforme, propiedades térmicas constantes, superficies superiores de las aletas adiabáticas, material isotrópico, conducción axial de la aleta despreciable y cambios de energía cinética y potencial despreciables. El modelo de mínima generación de entropía está dado por la siguiente expresión [5]:

$$\dot{S} = \frac{\dot{Q}\theta_b}{T_{inf}^2} + \frac{F_d V_f}{T_{inf}} \quad (4)$$

donde  $\dot{Q}$  representa la transferencia de calor en la base de las aletas;  $\theta_b$  es la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y la velocidad de flujo refrigerante  $V_f$ . Por su parte, la fricción del fluido está dada en forma de fuerza de arrastre ( $F_d$ ) a lo largo de la dirección del flujo del aire.  $\theta_b$  está relacionada directamente con la resistencia térmica total del disipador de calor, y a partir de dicha relación se obtiene la siguiente ecuación:

$$\theta_b = \dot{Q} \cdot R_{total} \quad (5)$$

Al sustituir la ecuación ( 5 ) en ( 4 ), se llega a una expresión general que describe la tasa de generación de entropía en el disipador:

$$\dot{S} = \frac{\dot{Q}^2 R_{total}}{T_{inf}^2} + \frac{F_d V_f}{T_{inf}} \quad (6)$$

La tasa de generación de entropía dada en la ecuación ( 6 ) se compone por dos factores importantes como lo son: la resistencia térmica total del disipador y la disipación viscosa. La primera se estima por la siguiente ecuación:

$$R_{total} = \frac{b}{k \cdot L \cdot W} + \frac{1}{\frac{n}{R_{fin}} + h \cdot (n - 1) \cdot s \cdot L} \quad (7)$$

donde  $b$  es el espesor de la base del disipador;  $k$  es la conductividad térmica del material de las aletas;  $L$  es la longitud del disipador;  $W$  es el ancho del disipador;  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección;  $N$  es el número de aletas, y  $R_{fin}$  es la resistencia térmica de cada una de las aletas. Según [10],  $R_{fin}$  se expresa como:

$$R_{fin} = \frac{1}{\sqrt{h \cdot P_c \cdot k \cdot A_c} \tanh(m \cdot a)} \quad (8)$$

donde

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot P_c}{k \cdot A_c}} \quad (9)$$

En ( 8 ) y ( 9 ),  $P_c$  es el perímetro de una aleta;  $A_c$  es el área de la sección transversal de una aleta;  $m$  es el parámetro de la aleta, y  $a$  es la altura de las aletas. El perímetro y área de sección transversal ( $P_c$  y  $A_c$ ) se expresan como  $P_c = 2a + 2d$  y  $A_c = a \cdot d$ , respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor  $h$  es determinado por la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Nu \cdot k_f}{s}$$

donde  $k_f$  es la conductividad térmica del fluido y  $Nu$  es el número de Nusselt. Este último representa la relación del aumento de la transmisión de calor desde una superficie que transfiere calor por convección comparada con una transferencia de calor únicamente por conducción.  $Nu$  está dado por la expresión:

$$Nu = \left[ \left( \frac{Re_s^* Pr}{2} \right)^{-3} + \left( 0.664 \sqrt{Re_s^* Pr}^{\frac{1}{3}} \sqrt{1 + \frac{3.65}{\sqrt{Re_s^*}}} \right)^{-3} \right]^{-\frac{1}{3}} \quad (10)$$

donde  $Re_s^*$  es el número de Reynolds del canal ajustado, considerado como un parámetro del canal.  $Pr$  es el número de Prandtl, y representa la relación entre la viscosidad y la difusividad térmica.  $Re_s^*$  es definida como

$$Re_s^* = \frac{Re_s \cdot s}{L} \quad (11)$$

En ( 11 ),  $Re_s$  es el número de Reynolds, que representa la relación de las fuerzas de inercia a fuerzas viscosas.  $Re_s$  es definido como

$$Re_s = \frac{s \cdot V_{ch}}{\nu} \quad (12)$$

En ( 12 ),  $s$  es el ancho del canal,  $V_{ch}$  es la velocidad de flujo horizontal del canal y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del aire. La caída de presión requerida por el disipador de calor puede obtenerse a partir de la siguiente expresión [10]:

$$F_d = \left( f_{app} \cdot \frac{n \cdot (2a \cdot L + s \cdot L)}{a \cdot W} + K_c + K_e \right) \frac{\rho \cdot V_{ch}^2}{2} \quad (13)$$

En ( 13 ),  $f_{app}$  es el factor aparente para un flujo hidrodinámico,  $K_c$  es el coeficiente de contracción, mientras que  $K_e$  es el coeficiente de expiación repentinos del canal del disipador de calor, y  $\rho$  es la densidad del aire. Para un canal rectangular  $f_{app}$  puede ser evaluada bajo el concepto de flujo laminar propuesto en [10]:

$$f_{app} = \frac{1}{Re_{Dh}} \left[ \left( \frac{3.44}{\sqrt{L^*}} \right)^2 + (f \cdot Re_{Dh})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

En ( 14 ),  $Re_{Dh}$  es el número del canal de Reynolds,  $L^*$  es la longitud ajustada de dicho canal y  $f$  es su factor de fricción.

$$L^* = \frac{L}{D_h Re_{Dh}} \quad (15)$$

$$D_h = \frac{2 \cdot s \cdot a}{s + a} \quad (16)$$

$$Re_{Dh} = \frac{V_{ch} \cdot D_h}{\nu} \quad (17)$$

De las ecuaciones anteriores,  $D_h$  es el diámetro hidráulico del canal en la ecuación ( 13 ), los coeficientes  $K_c$  y  $K_e$  pueden expresarse de la siguiente forma:

$$K_c = 0.42 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n \cdot d}{W} \right)^2 \right]^2 \quad (18)$$

$$K_e = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n \cdot d}{W} \right)^2 \right]^2 \quad (19)$$

donde el término  $f \cdot Re_{Dh}$  de la ecuación ( 14 ) puede escribirse como

$$f \cdot Re_{Dh} = 24 - 32.57 \left( \frac{s}{a} \right) + 46.721 \left( \frac{s}{a} \right)^2 - 40.829 \left( \frac{s}{a} \right)^3 + 22.954 \left( \frac{s}{a} \right)^4 - 6.089 \left( \frac{s}{a} \right)^5 \quad (20)$$

En ( 21 ), se muestra una expresión para  $V_{ch}$  que representa la velocidad de flujo de entrada horizontal en el canal del disipador de calor.

$$V_{ch} = V_f \left( \frac{s+d}{s} \right) \quad (21)$$

## 4.2. EXPERIMENTOS

Para el desarrollo de los experimentos se propone optimizar cuatro parámetros que intervienen en el diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas. Estos son: el número de aletas del disipador ( $N$ ), la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ), la altura ( $a$ ) y el espesor ( $d$ ) de cada aleta. La tasa de generación de mínima entropía, descrita por la ecuación ( 6 ), representa la función objetivo a minimizar. El proceso de optimización se realizó a partir de la inclusión progresiva de cada uno de los parámetros de diseño, hasta que de manera simultánea se determinó el valor óptimo de cada variable. El estado de funcionamiento y los parámetros físicos del disipador se observan en la Tabla 9.

Tabla 9. Condiciones de operación y parámetros físicos del disipador de calor

<i>Parámetro o Condición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Área de la placa base</i>	$m^2$	$0.05 \times 0.05$
<i>Espesor de la placa base</i>	$m$	0.002
<i>Conductividad térmica del disipador</i>	$W/(m \cdot k)$	200
<i>Temperatura ambiente</i>	$K$	298
<i>Densidad del fluido (aire)</i>	$kg/m^3$	1.2
<i>Viscosidad cinemática (aire)</i>	$m^2/s$	$1.58 \times 10^{-5}$
<i>Conductividad del fluido (aire)</i>	$W/(m \cdot k)$	0.025
<i>Calor a disipar</i>	$W$	30
<i>Número de Prandtl</i>	-	0.71

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization

En la primera prueba de optimización se determinó el número óptimo de aletas del disipador ( $N$ ) para una velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) de  $2 m/s$ ; una altura de la aleta ( $a$ ) de  $25 mm$ , y un espesor de la aleta ( $d$ ) de  $1 mm$ . En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos por [5] y [1], así como los obtenidos con el método ABC, luego de ejecutar 5 veces cada prueba.

Tabla 10. Comparación de resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) por medio de diferentes métodos diseño

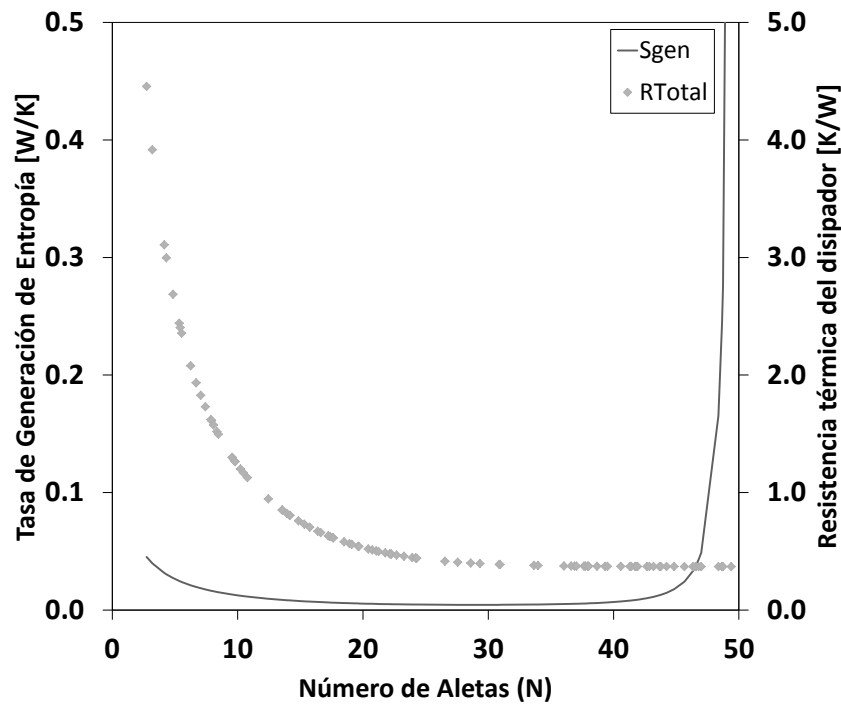
<i>Parámetro</i>	<i>Culham y Muzychka [5]</i>	<i>Araque [1]</i>	<i>ABC</i>
$N$	28.57	28.9705	28.9642
$V_F$	2.0	2.0	2.0000
$a$	0.025	0.025	0.025
$d$	0.001	0.001	0.001
$S_{gen}$	4.423317E-03	4.421604E-03	4.421603E-03
$\theta_b$	11.51	11.91	11.9111
$Re$	473.9	443.5041	430.6471
<i>Iteraciones</i>	-	25	18
<i>Tiempo<sup>3</sup></i>	-	9.6483	0.3751

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization, Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos y autores

<sup>3</sup> El tiempo de cómputo depende de las características del equipo de cómputo en el que fueron realizadas las pruebas, ver Tabla 3.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de la tasa de generación de entropía y el de la resistencia total del disipador, en función del número de aletas del disipador ( $N$ ). En esta se evidencia que al aumentar el número de las aletas, la resistencia total del disipador disminuye. En consecuencia, se genera una baja en la diferencia de temperatura en la base del disipador, que a su vez disminuye la tasa de generación de entropía. Este comportamiento se mantiene en un rango del número de aletas entre 20 y 35, sin embargo fuera de estos límites la tasa de generación presenta un aumento de tipo exponencial. Por su parte, para los valores del número de aletas menores a 20 se genera un aumento en la resistencia del disipador, lo que lleva a un aumento en la diferencia de temperatura en la base del disipador.

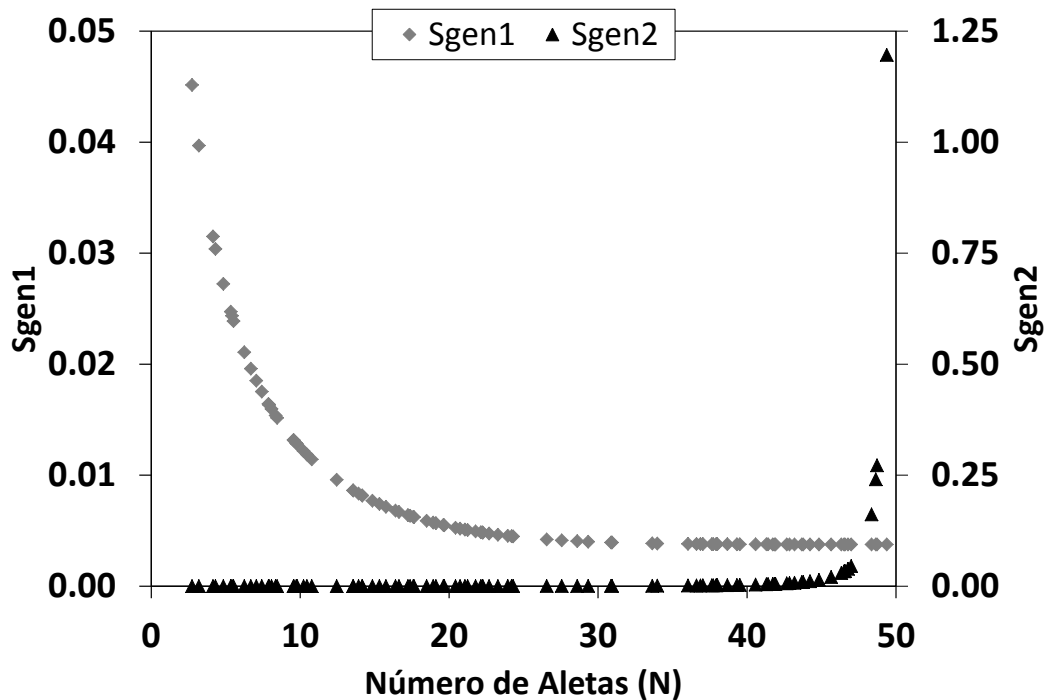
Figura 7. Comportamiento de la función Tasa de Generación de Entropía ( $S_{gen}$ ) y la Resistencia Total del Disipador ( $R_{total}$ ) en función del Número de Aletas ( $N$ )



Fuente: Autores

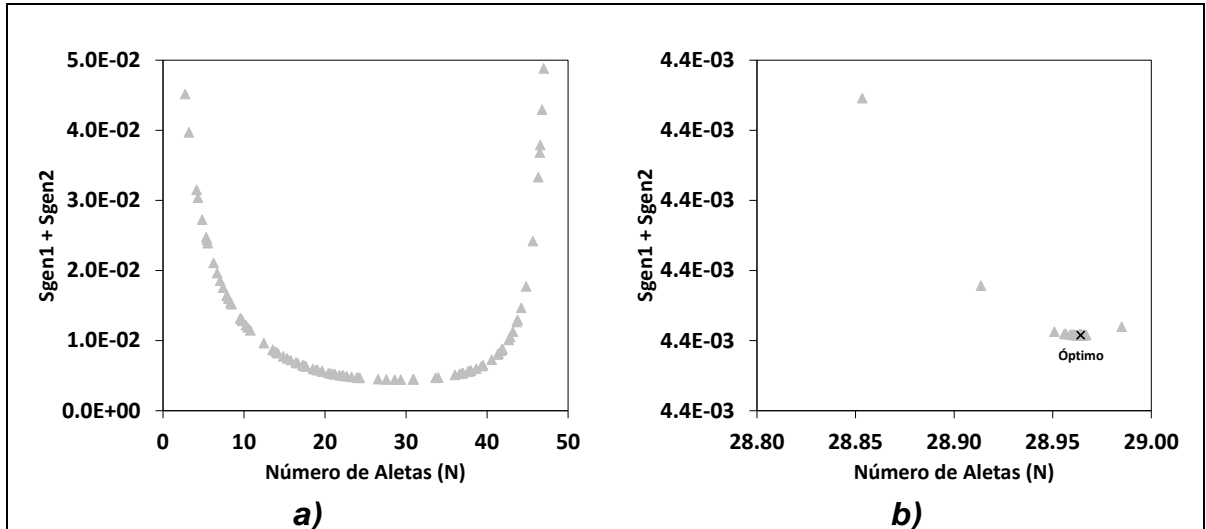
La ecuación ( 6 ), presentada en la sección 4.1, es claramente una función de dos factores principales: la resistencia térmica total del disipador y la disipación viscosa, los que se denominaran en adelante como  $S_{gen1}$  y  $S_{gen2}$  respectivamente. En la Figura 8 se muestra la gráfica de  $S_{gen1}$  y  $S_{gen2}$  en función del número de aletas, y la Figura 9 presenta el comportamiento de la suma de ambos factores durante el proceso de optimización.

Figura 8. Comportamiento de los factores  $S_{gen1}$  y  $S_{gen2}$  en función del número de aletas ( $N$ )



Fuente: Autores

Figura 9. Comportamiento de  $S_{gen1} + S_{gen2}$  en función de las fuentes de alimento a) generadas inicialmente al azar y b) reagrupadas una vez finalizado el proceso de optimización



Fuente: Autores

De la Figura 8 se puede observar la contribución que hace respectivamente cada factor a la ecuación ( 6 ). Asimismo, se aprecia que entre los factores  $S_{gen1}$  y  $S_{gen2}$  existe una relación inversa, por lo que se puede afirmar que el mínimo para la función objetivo se logra mediante el balance de estos dos factores. En la Figura 9 se observa como las fuentes de alimento buscan agruparse en el punto óptimo una vez transcurrido el proceso de optimización.

Para la segunda prueba se realiza la inclusión del parámetro de velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) a la primera prueba ya realizada. Ello, manteniendo constantes los valores dados anteriormente para la altura y el espesor de la aleta. Los resultados se consignan en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación de resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) y la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) utilizando diferentes métodos diseño

<i>Parámetro</i>	<i>Culham y Muzychka [5]</i>	<i>Araque [1]</i>	<i>ABC</i>
$N$	26.77	26.7640	26.7661
$V_F$	2.8	3.2709	3.2631
$a$	0.025	0.025	0.025
$d$	0.001	0.001	0.001
$S_{gen}$	3.912044E-03	3.846154E-03	3.846136E-03
$\theta_b$	9.49	8.9420	8.9538
$R_e$	713.3	787.4401	758.1724
<i>Iteraciones</i>	-	32	24
<i>Tiempo</i>	-	7.3804	0.4775

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization, Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos y autores

Se observa que el número óptimo de aletas para el disipador disminuyó en comparación con la prueba anterior, lo que genera el aumento de la resistencia total del disipador, la diferencia de calor en la base del disipador, y por ende, la tasa de generación de entropía. No obstante, dicho efecto se ve contrarrestado por el aumento de la velocidad del flujo refrigerante, que para la prueba anterior era de  $2 \text{ m/s}$  y en la presente se estima en un valor de  $3.2677 \text{ m/s}$ . De esta compensación, entre los dos parámetros de diseño involucrados en la prueba, se da como resultado una tasa de generación de entropía ( $3.846142E - 03$ ) menor que la obtenida en el caso anterior ( $4.421603E - 03$ ).

La tercera prueba propone la optimización de: el número de aletas, la velocidad del flujo refrigerante, la altura y espesor de la aleta, a través de dos pruebas independientes. En la primera se incluye el espesor de la aleta manteniendo constante el valor de la altura. En la segunda, se fijó el espesor de la aleta y se optimizó la altura. Los resultados de estas pruebas se observan en la Tabla 12 y Tabla 13, respectivamente.

Tabla 12. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) de enfriamiento y el espesor ( $d$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño

<i>Parámetro</i>	<i>Culham y Muzychka [5]</i>	<i>Araque [1]</i>	<i>ABC</i>
$N$	38.14	35.1168	35.0717
$V_F$	3.28	3.4747	3.4519
$a$	0.025	0.025	0.025
$d$	0.0004	0.00050102	0.00050185
$S_{gen}$	3.742493E-03	3.718337E-03	3.718259E-03
$\theta_b$	8.66	8.5956	8.6376
$Re$	583.9	638.1517	611.5217
<i>Iteraciones</i>	-	40	35
<i>Tiempo</i>	-	11.5627	0.8210

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization, Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos y autores

Tabla 13. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad del flujo refrigerante ( $V_F$ ) de enfriamiento y la altura ( $a$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño

<i>Parámetro</i>	<i>Culham y Muzychka [5]</i>	<i>Araque [1]</i>	<i>ABC</i>
$N$	24.57	24.39	24.4280
$V_F$	1.48	1.7004	1.7004
$a$	0.0966	0.09110	0.0903
$d$	0.001	0.001	0.001
$S_{gen}$	2.928798E-03	2.910046E-03	2.910000E-03
$\theta_b$	7.21	7.0391	7.0446
$Re$	409.8	450.9084	444.7987
<i>Iteraciones</i>	-	40	33
<i>Tiempo</i>	-	11.2452	0.6210

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization, Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos y autores

En los resultados presentados en la Tabla 12 y Tabla 13 se observa una disminución en la tasa de generación de entropía respecto a las dos primeras pruebas realizadas. De la misma manera, el proceso de optimización que incluye

el espesor de la aleta, generó como resultado un valor óptimo muy pequeño  $0.5\text{ mm}$  en contraste al valor establecido ( $1\text{ mm}$ ) en las dos primeras pruebas. Dicho resultado puede representar una limitación para efectos de su fabricación. En cuanto al proceso de optimización donde se incluye la altura de la aleta, se presenta un aumento exagerado de aproximadamente  $90\text{ mm}$ , comparado con el valor fijado en las primeras pruebas ( $25\text{ mm}$ ). La inclusión de estos dos parámetros, en el proceso de optimización, afecta de manera considerable las dimensiones del disipador. Factores que, en efecto, se debe tener en cuenta al momento de su fabricación.

Por otra parte, la prueba final consiste en determinar el número óptimo  $N$  de aletas, la altura óptima  $a$  de la aleta, el espesor óptimo  $d$  de cada aleta, y la velocidad del flujo óptima  $V_F$  refrigerante. Los resultados de diseño obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de resultados de la optimización del número ( $N$ ) de aletas, la velocidad de flujo ( $V_F$ ) de enfriamiento, la altura ( $a$ ) de cada aleta y el espesor ( $d$ ) de cada aleta utilizando diferentes métodos diseño

<i>Parámetro</i>	<i>Culham y Muzychka [5]</i>	<i>Araque [1]</i>	<i>Propuesto</i>
$N$	19.07	14.5869	14.5434
$V_F$	1.21	1.2691	1.2791
$a$	0.122	0.1357	0.1325
$d$	0.0016	0.0024	0.0024
$S_{gen}$	2.844152E-03	2.785483E-03	2.785286E-03
$\theta_b$	7.2	6.8840	6.8679
$Re$	433.3	562.9180	564.2063
<i>Iteraciones</i>	-	74	64
<i>Tiempo</i>	-	24.2984	1.2438

Fuente: Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization, Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos y autores

Los valores óptimo obtenidos en la prueba realizada ( $N \cong 15$ ,  $V_F = 1.2791 \text{ m/s}$ ,  $d = 2.41 \text{ mm}$  y  $a = 132.7 \text{ mm}$ ) producen la menor tasa de generación de entropía encontrada hasta el momento. La Tabla 15 muestra un resumen de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas propuestas. La convergencia del algoritmo ABC se presenta en la Fuente: Autores

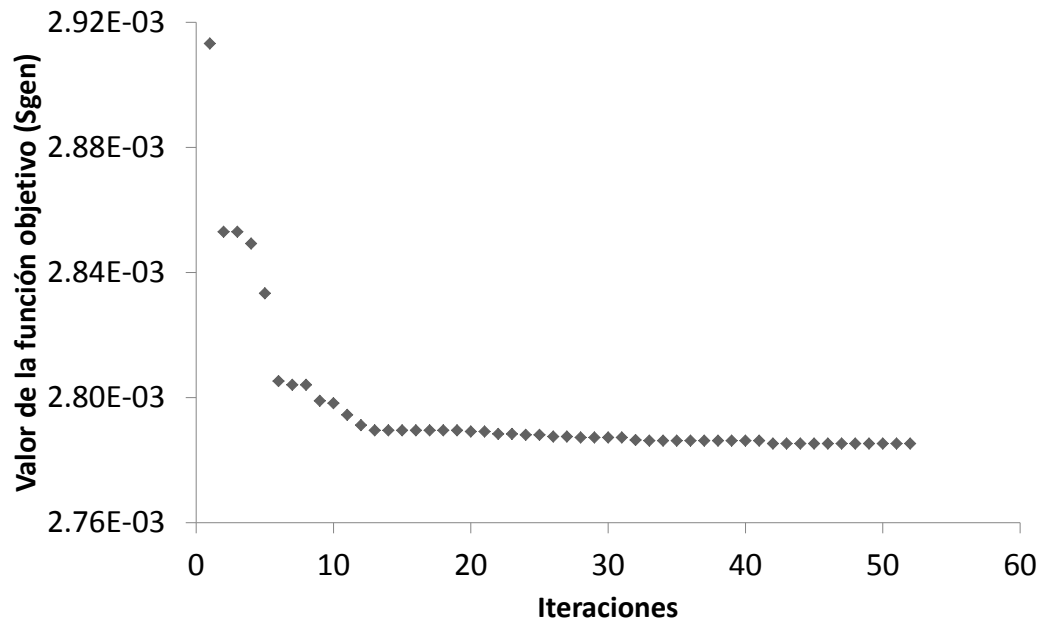
Figura 10, que muestra la gran eficacia del mismo.

Tabla 15. Resumen de las pruebas de optimización realizadas en el diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas

Prueba	$N$	$V_F$	$a$	$d$	$\theta_b$	$S_{gen}$
1	28.9642	2.0000	0.0250	1.00E-03	11.9111	4.421603E-03
2	26.7661	3.2631	0.0250	1.00E-03	8.9538	3.846136E-03
3	35.0717	3.4519	0.0250	0.5018E-03	8.6376	3.718259E-03
4	24.4280	1.7004	0.0903	1.00E-03	7.0446	2.910000E-03
5	14.5434	1.2791	0.1325	2.41E-03	6.8679	2.785286E-03

Fuente: Autores

Figura 10. Convergencia del algoritmo ABC durante la última prueba de optimización



Fuente: Autores

## 5. CONCLUSIONES

Se cumplieron cada uno de los objetivos planteados para el desarrollo de esta investigación.

Se verificó la precisión y exactitud del método Colonia de Abejas Artificial frente a funciones tradicionalmente utilizadas en problemas de optimización, dando resultados satisfactorios.

El tiempo de ejecución del algoritmo ABC depende directamente de la dimensión del problema, y del parámetro de ejecución Número de Soluciones o Fuentes de Alimento ( $SN$ ), lo anterior debido a que un aumento en cualquier de estos dos factores produce que el algoritmo debe hacer más evaluaciones de la función para obtener la respuesta.

La cantidad de iteraciones utilizadas por el algoritmo ABC, para encontrar la solución al diseño propuesto para un disipador de calor, fueron menores que las utilizadas por el algoritmo híbrido Enjambre de Partículas + Simplex [1] (Ver Tabla 10 a Tabla 14).

Al evaluar la función objetivo y optimizar los parámetros de diseño propuesto para un disipador de calor de tipo placa de aletas con el método Colonia Artificial de Abejas, se encontraron resultados similares a los resultados reportados por otros autores.

Se puede concluir que el método Colonia Artificial de Abejas es una herramienta de optimización recomendable para la solución al diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas, ya que se logró reproducir de manera satisfactoria los

resultados encontrados en la literatura, y además presento mejor rendimiento en cuanto al número de iteraciones utilizadas en los procesos de optimización.

## 6. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

Analizar el comportamiento del algoritmo ABC frente a otros problemas de optimización y de ingeniería.

Proponer modificaciones al algoritmo ABC para la producción de nuevas fuentes de alimento y el mecanismo de reemplazo de las mismas por parte de las abejas exploradoras. Asimismo, realizar un estudio para una posible hibridación del algoritmo ABC con algún otro método metaheurístico.

## REFERENCIAS

- [1] A. A. Araque Herrera, "Uso de algoritmos metaheurísticos híbridos combinados con la minimización de entropía en problemas de transferencia de calor en circuitos electrónicos," Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [2] A. Bejan, "Entropy generation in heat transfer," in *Entropy Generation Minimization*, J. Wiley., Boca Raton, FL: CRC Press, 1996, pp. 71–104.
- [3] A. Bejan, "Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 3, p. 1191, 1996.
- [4] A. Bejan, "Exergy Analysis, Entropy Generation Minimization, and Constructal Theory," in *Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power*, 3rd ed., vol. 4, M. Kutz, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006, pp. 118–143.
- [5] J. R. Culham and Y. S. Muzychka, "Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization," *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 159–165, Jun. 2001.
- [6] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *J. Glob. Optim.*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, Apr. 2007.
- [7] D. Karaboga and B. Basturk, "Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems," *Adv. Soft Comput. Found. Fuzzy Log. Soft Comput.*, vol. 4529, pp. 789–798, 2007.
- [8] D. Karaboga and B. Basturk, "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm," *Sci. Appl. Soft Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 687–697, Jan. 2008.
- [9] M. Molga and C. Smutnicki, "Test functions for optimization needs," pp. 1–43, 2005.
- [10] P. Ning, F. F. Wang, K. D. T. Ngo, and S. Member, "Forced-Air Cooling System Design Under Weight Constraint for High-Temperature SiC

Converter,” *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 1998–2007, 2014.

- [11] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, “High-performance heat sinking for VLSI,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 126–129, May 1981.
- [12] N. H. E. Weste and D. Harris, *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective*, Third Edit. Addison Wesley, 2004, p. 800.

## ANEXOS

### Anexo A. Descripción del algoritmo Colonia Artificial de Abejas.

En el algoritmo ABC, la posición de una fuente de alimento representa una posible solución al problema de optimización y la cantidad de néctar de la fuente de alimento corresponde a la calidad (fitness) de la solución. En el primer paso, ABC genera una población distribuida al azar ( $G = 0$ ) de soluciones  $SN$  (posiciones de las fuentes de alimento), donde  $SN$  indica el tamaño de la población. Cada solución  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, SN$ ) es un vector de dimensión  $D$ , y es el número de parámetros a optimizar. Después de la inicialización, la población se somete a ciclos repetidos,  $C = 1, 2, \dots, MCN$ , de los procesos de búsqueda de las abejas empleadas, abejas observadoras y abejas exploradoras. Una abeja empleada produce una modificación en la posición (solución) que hay en su memoria, según la información local (información visual) y la cantidad de néctar (valor de la calidad) de una fuente candidata (nueva solución). Si la cantidad de néctar (calidad de la nueva solución) es mayor que la de la anterior, la abeja memoriza la nueva posición y olvida la antigua. De lo contrario, mantiene la posición de la anterior en su memoria. Después de que todas las abejas empleadas completan el proceso de búsqueda, estas comparten la información sobre la posición y calidad de las fuentes de alimento con las abejas observadoras en el área de la danza. Una abeja observadora evalúa la información tomada de todas las abejas empleadas y elige una fuente de alimento con base en la probabilidad relacionada con la cantidad de néctar (calidad de la solución). Como en el caso de la abeja empleada, se produce una modificación de la posición en su memoria y se comprueba la cantidad de la fuente de néctar candidata. Siempre que su néctar es mayor que la de la anterior, la abeja memoriza la nueva posición y se olvida de la antigua.

Una abeja artificial observadora elige una fuente de alimento dependiendo del valor de la probabilidad asociada con esa fuente de alimento,  $p_i$ , calculado por la siguiente expresión ( 22 ):

$$p_i = \frac{f_i t_i}{\sum_{n=1}^{SN} f_i t_n} \quad ( 22 )$$

donde  $f_i t_i$  es el valor de la calidad de la solución de  $i$  que es proporcional a la cantidad de néctar de la fuente de alimentación en la posición  $i$  y  $SN$  es el número de fuentes de alimentos que es igual al número de abejas empleadas (BN).

Con el fin de producir una posición de alimento candidata respecto a la memoria, el ABC utiliza la siguiente expresión ( 23 ):

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad ( 23 )$$

donde  $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$  y  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  son índices que se eligen aleatoriamente. Aunque  $k$  se determina al azar, este tiene que ser diferente de  $i$ .  $\phi_{ij}$  es un número aleatorio entre  $[-1, 1]$ . Como puede verse en (5), si la diferencia entre los parámetros  $x_{ij}$  y  $x_{ik}$  decrece, la variación en la posición de  $x_{ij}$  también lo hace. Por lo tanto, la búsqueda se acerca de manera adaptativa a la solución óptima en el espacio de búsqueda. Si el valor de parámetro producido por esta operación excede su límite predeterminado, el parámetro puede ser ajustado a un valor aceptable.

La fuente de alimento que es abandonada por las abejas es sustituida por una nueva fuente de alimento encontrada por las abejas exploradores, esto es simulado mediante la producción de una posición al azar y su sustitución por la que se abandona. En el algoritmo si después de cierto número de ciclos predeterminados la fuente no mejora, esta debe ser abandonada. El valor de este número de ciclos predeterminados es un importante parámetro de control en el

algoritmo ABC, el cual es llamado "*limite*" para el abandono. Supongamos que la fuente abandonada es  $x_i$  e  $i \in \{1, 2, \dots, D\}$ , entonces las abejas exploradoras descubren una nueva fuente de alimento para reemplazar la fuente  $x_i$ . Esta operación puede ser definida por la siguiente ecuación (6)

$$x_i^j = x_{min}^j + rand(0,1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (24)$$

Después de que cada posición de fuente candidata  $v_{ij}$  es generada y luego evaluada por la abeja artificial, su rendimiento se compara con la antigua fuente. Si la calidad asociada a esta nueva fuente es mayor que la de la antigua fuente, este es reemplazada por la generada. De lo contrario, la fuente antigua se mantiene. En otras palabras, el mecanismo para seleccionar entre la fuente antigua y la candidata es de una selección codiciosa.

Por todo lo enunciado, se puede observar que hay tres parámetros de control utilizados en el algoritmo ABC: El número de fuentes de alimento, que es igual al número de abejas empleadas u observadoras (*SN*), el valor del límite para abandono (*Limit*), y el número de máximo de ciclos (*MCM*).

Anexo B. Resultados de la primera evaluación realizada al algoritmo ABC.

A continuación se presentan los resultados de los primeros experimentos realizados al algoritmo ABC para cada función de prueba.

Tabla 16. Resultados de la primera prueba realizada para la función  $f_1$

<i>Experimento</i>	<i>Resultado</i>	<i>Fuente</i>		<i>Iteraciones</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Criterio de parada</i>
1	5.50312E-16	-2.2243E-08	-7.4543E-09	51	0.7258	Tol
2	7.58741E-16	1.74453E-08	-2.1317E-08	49	0.7970	Tol
3	1.71548E-16	1.29329E-08	-2.071E-09	49	0.7145	Tol
4	6.16976E-16	-1.0662E-08	-2.2434E-08	50	0.7454	Tol
5	3.70378E-16	-9.8686E-09	-1.6522E-08	52	0.7984	Tol
6	8.97869E-16	9.44512E-09	2.8437E-08	49	0.7386	Tol
7	3.32215E-17	-4.8328E-09	-3.1409E-09	51	0.7921	Tol
8	6.71776E-16	-1.8967E-08	1.7664E-08	50	0.7250	Tol
9	4.8932E-17	4.47113E-09	5.3797E-09	49	0.7528	Tol
10	3.73898E-16	1.89118E-08	4.03E-09	50	0.7698	Tol

Fuente: Autores

Tabla 17. Resultados de la primera prueba realizada para la función  $f_2$

<i>Experimento</i>	<i>Resultado</i>	<i>Fuente</i>		<i>Iteraciones</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Criterio de parada</i>
1	0.00016164	0.9929505	0.98700873	115	1.7219	Sat
2	1.6371E-06	0.99899829	0.99807719	112	1.5962	Sat
3	0.00042653	1.02025675	1.04132619	176	2.5580	Sat
4	0.00042195	1.01829671	1.03599449	270	3.9533	Sat
5	0.00136681	0.96303254	0.92738534	243	3.4136	Sat
6	0.00010065	0.99001804	0.98023629	167	2.5995	Sat
7	0.00050193	1.01485525	1.02825411	121	1.7574	Sat
8	0.00025246	0.98428403	0.96858114	141	2.0613	Sat
9	4.9839E-05	0.99919938	0.99769799	140	2.0275	Sat
10	0.00294263	1.05418151	1.11103418	130	1.9208	Sat

Fuente: Autores

Tabla 18. Resultados de la primera prueba realizada para la función  $f_3$

<i>Experimento</i>	<i>Resultado</i>	<i>Fuente</i>		<i>Iteraciones</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Criterio de parada</i>
1	0	2.9728E-10	-5.6892E-10	80	1.2357	Tol
2	0	5.9399E-10	6.5796E-10	86	1.2476	Tol
3	0	1.3505E-09	2.5744E-10	81	1.5652	Tol
4	0	9.8894E-11	-1.9748E-10	85	1.3228	Tol
5	0	3.266E-10	-1.4516E-10	79	1.1840	Tol
6	0	6.8186E-10	1.3204E-09	84	1.3136	Tol
7	0	-1.6407E-09	-2.3904E-10	86	1.2494	Tol
8	0	-1.9474E-10	1.381E-09	78	1.1866	Tol
9	0	1.1961E-09	-1.2402E-09	82	1.1723	Tol
10	0	-6.038E-11	-1.3059E-09	79	1.1333	Tol

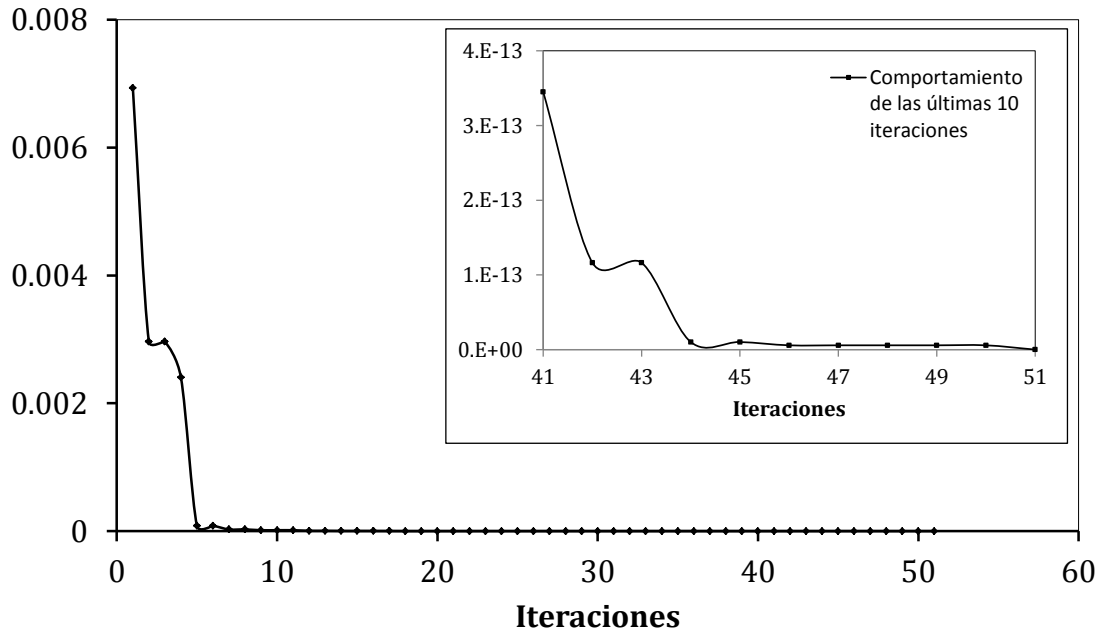
Fuente: Autores

Tabla 19. Resultados de la primera prueba realizada para la función  $f_4$

<i>Experimento</i>	<i>Resultado</i>	<i>Fuente</i>		<i>Iteraciones</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Criterio de parada</i>
1	7.7716E-16	3.5685E-08	1.5648E-08	176	2.5669	Tol
2	9.992E-16	-3.2356E-08	-4.2076E-08	200	2.9135	Tol
3	5.5511E-16	3.1761E-08	-1.1927E-08	175	2.4828	Tol
4	1.1102E-16	-1.2545E-08	1.4465E-08	196	2.8986	Tol
5	9.992E-16	2.4805E-08	5.3102E-08	190	2.8203	Tol
6	2.2204E-16	-1.9271E-08	-4.0809E-09	198	2.9133	Tol
7	2.2204E-16	1.116E-08	1.5461E-08	205	2.8897	Tol
8	2.2204E-16	2.0223E-08	1.3987E-09	218	3.2002	Tol
9	3.3307E-16	2.0688E-08	1.8455E-08	172	2.4401	Tol
10	3.3307E-16	1.3254E-08	2.9976E-08	202	3.0045	Tol

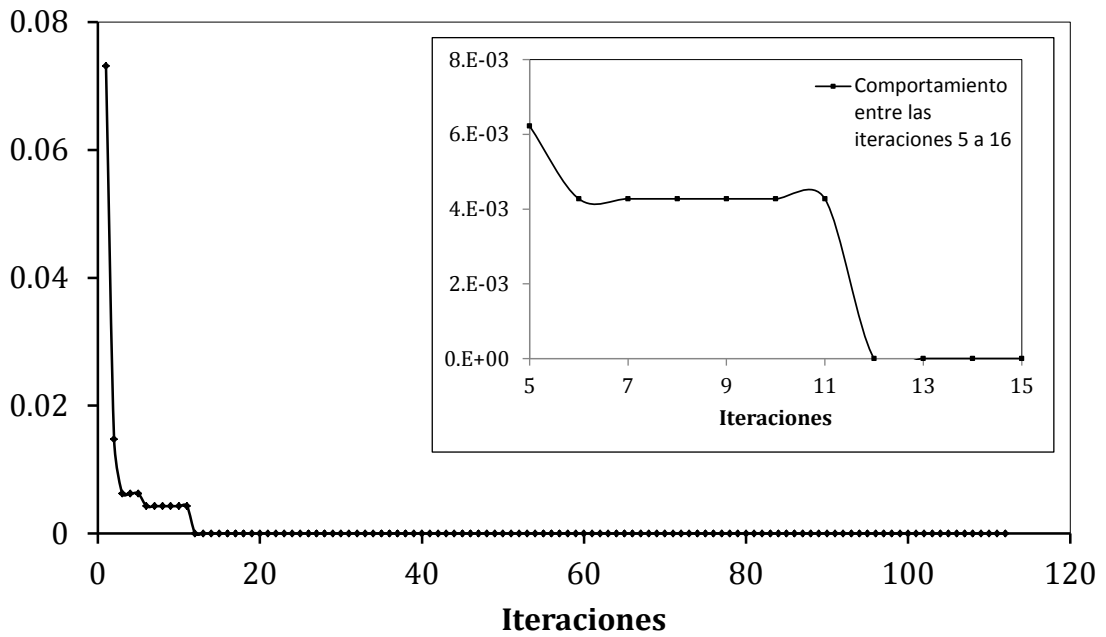
Fuente: Autores

Figura 11. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_1$



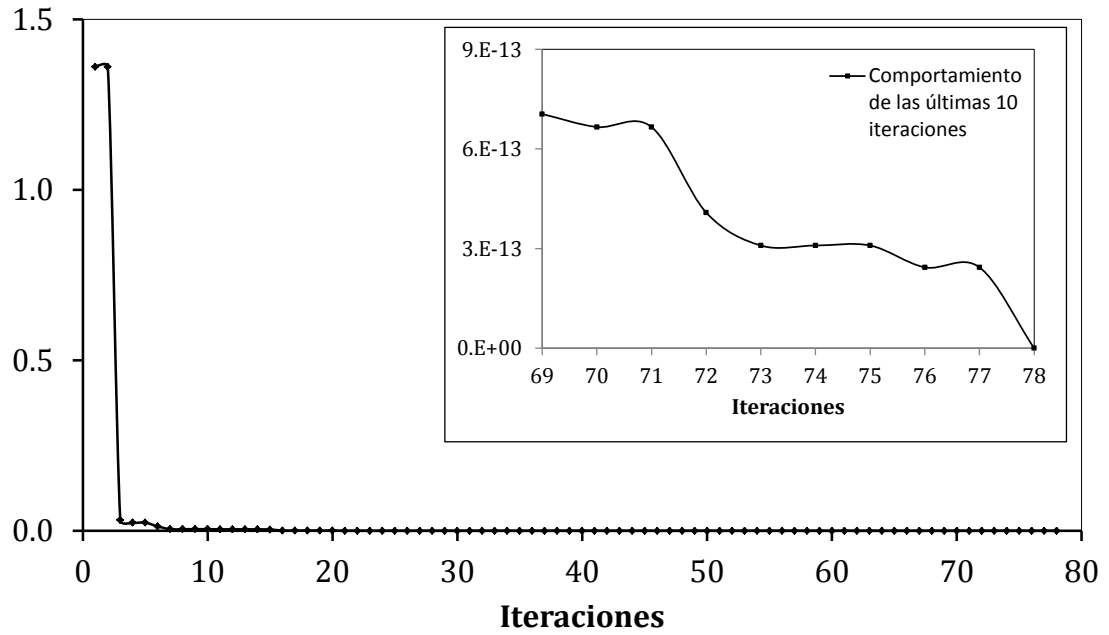
Fuente: Autores

Figura 12. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_2$



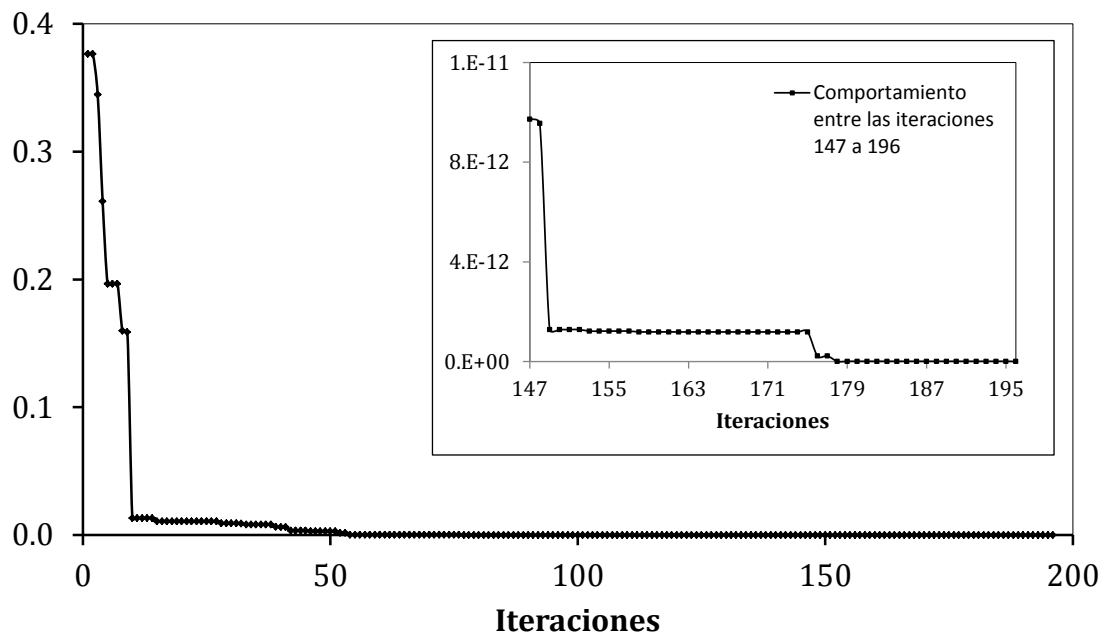
Fuente: Autores

Figura 13. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_3$



Fuente: Autores

Figura 14. Evolución de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_4$

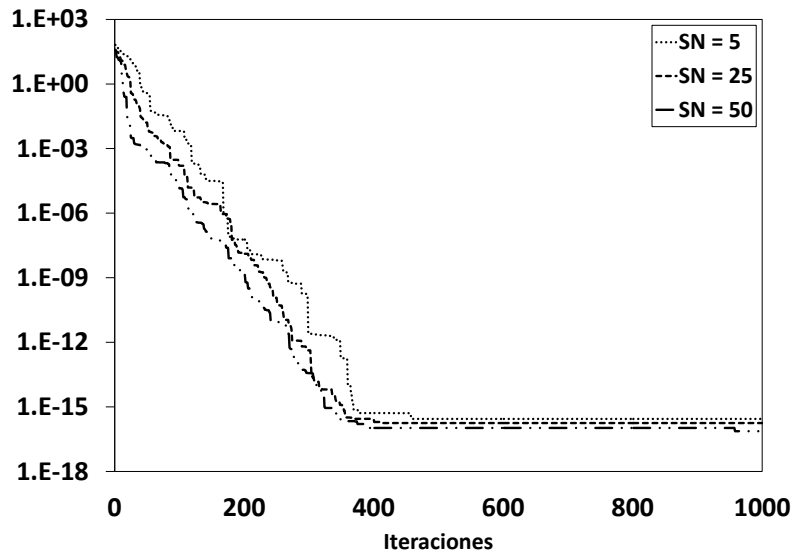


Fuente: Autores

Anexo C. Resultados de la tercera evaluación realizada al algoritmo ABC.

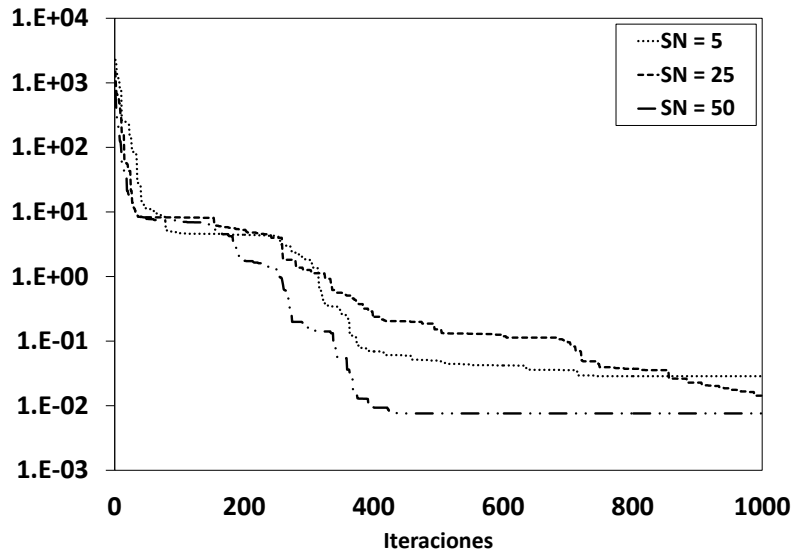
Los resultados de la tercera prueba realizada se muestran a continuación. Cada figura muestra el comportamiento de la respuesta encontrada en función del número de fuentes de alimento.

Figura 15. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_1$



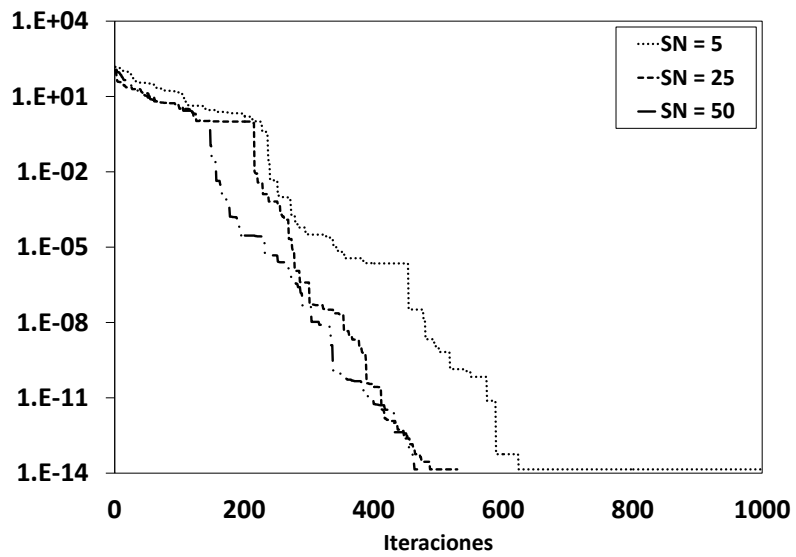
Fuente: Autores

Figura 16. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_2$



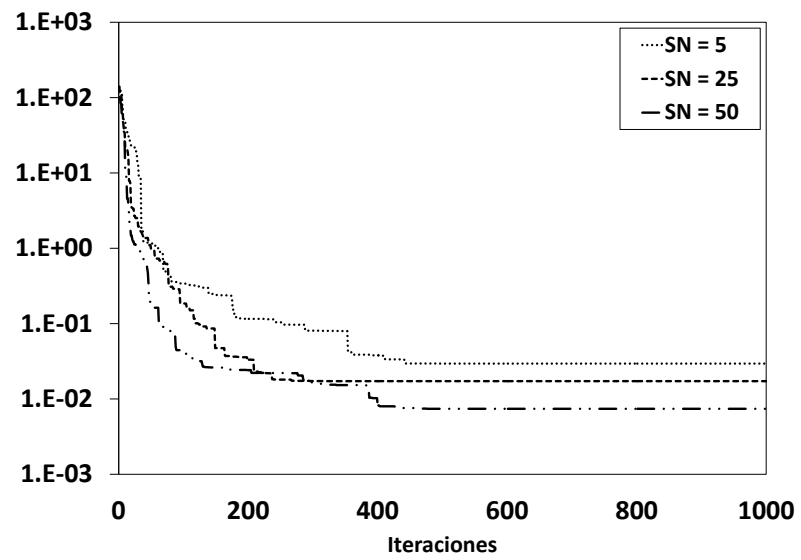
Fuente: Autores

Figura 17. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_3$



Fuente: Autores

Figura 18. Comportamiento de la respuesta encontrada por ABC para la función  $f_4$



Fuente: Autores

Anexo D. Resultados de las pruebas de optimización para el diseño de un disipador de calor de tipo placa de aletas.

A continuación se presentan los resultados de cada uno de los experimentos realizados durante la optimización del diseño de un disipador de tipo placa de aletas.

Tabla 20. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ )

Prueba	1	2	3	4	5
$N$	28.964199	28.964199	28.964201	28.964200	28.964199
$S_{gen}$	4.42160311E-03	4.42160311E-03	4.42160311E-03	4.42160311E-03	4.42160311E-03
$\theta_b$	11.9110955	11.9110955	11.9110953	11.9110954	11.9110955
$R_e$	430.6472	430.6472	430.6471	430.6472	430.6472
Iteraciones	21	24	18	25	21
Tiempo	0.4286	0.4457	0.3751	0.4639	0.4034

Fuente: Autores

Tabla 21. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ) y la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ )

Prueba	1	2	3	4	5
$N$	26.766056	26.767598	26.764806	26.770552	26.765391
$V_F$	3.263139	3.263112	3.262562	3.264603	3.262111
$S_{gen}$	3.84613620E-03	3.84613623E-03	3.84613621E-03	3.84613795E-03	3.84613627E-03
$\theta_b$	8.9538021	8.9533320	8.9551509	8.9499394	8.9556853
$R_e$	758.1724	758.1239	758.0724	758.3898	757.9515
Iteraciones	24	21	18	21	24
Tiempo	0.4775	0.4300	0.3691	0.4159	0.4570

Fuente: Autores

Tabla 22. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) y el espesor ( $d$ ) de cada aleta

Prueba	1	2	3	4	5
$N$	34.807174	34.689074	33.966979	34.716990	35.071704
$V_F$	3.462985	3.438454	3.470139	3.489314	3.451886
$d$	0.000511	0.000526	0.000535	0.000498	0.000502
$S_{gen}$	3.71831166E-03	3.71883668E-03	3.71984077E-03	3.71907016E-03	3.71825900E-03
$\theta_b$	8.6263	8.6186	8.6668	8.6641	8.6376
$R_e$	618.1281	615.9528	634.5704	624.2447	611.5217
Iteraciones	40	23	32	34	35
Tiempo	0.8973	0.5782	0.7698	0.8313	0.8210

Fuente: Autores

Tabla 23. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ) y la altura ( $a$ ) de cada aleta

Prueba	1	2	3	4	5
$N$	24.410770	24.447413	24.428036	24.432151	24.414472
$V_F$	1.704412	1.691906	1.700382	1.700300	1.705479
$a$	0.089983	0.090758	0.090334	0.090282	0.089996
$S_{gen}$	2.91000757E-03	2.91002315E-03	2.90999958E-03	2.91000103E-03	2.91000696E-03
$\theta_b$	7.04670	7.04953	7.04459	7.04476	7.04360
$R_e$	446.1533	442.2486	444.7987	444.6977	446.3644
Iteraciones	30	29	33	25	38
Tiempo	0.5803	0.5801	0.6210	2.9288E-03	2.9288E-03

Fuente: Autores

Tabla 24. Resultados de la optimización del número de aletas ( $N$ ), la velocidad de flujo refrigerante ( $V_F$ ), la altura ( $a$ ) de cada aleta y el espesor ( $d$ ) de cada aleta

Prueba	1	2	3	4	5
$N$	14.8530	14.5484	14.2602	15.0211	15.3903
$V_F$	1.2741	1.2683	1.2355	1.2857	1.2834
$a$	0.00235	0.00242	0.00250	0.00229	0.00223
$d$	0.13057	0.13272	0.13612	0.13429	0.13137
$S_{gen}$	2.78560305E-03	2.78529252E-03	2.78569261E-03	2.78611249E-03	2.78665599E-03
$\theta_b$	6.8811	6.8821	6.8872	6.8610	6.8711
$R_e$	550.1719	559.2226	555.7889	549.2122	534.8586
Iteraciones	48	52	30	42	30
Tiempo	1.2058	1.2438	0.7916	1.0016	0.7746

Fuente: Autores