

MANTENIMIENTO PREVENTIVO BÁSICO DE UN DESFIBRILADOR MONOFÁSICO
MEDIANTE LOS MÉTODOS DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS MEJORADO Y
COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS

ELKIN HORACIO PETRO ARAQUE
RAFAEL RICARDO FUENTES FORERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013

MANTENIMIENTO PREVENTIVO BÁSICO DE UN DESFIBRILADOR MONOFÁSICO
MEDIANTE LOS MÉTODOS DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS MEJORADO Y
COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero electrónico

ELKIN HORACIO PETRO ARAQUE
RAFAEL RICARDO FUENTES FORERO

Director:
DR. CARLOS RODRIGO CORREA CELY

CO-DIRECTOR:
ING. IVÁN MAURICIO AMAYA CONTRERAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación es fruto de lo aprendido en el trayecto de mi vida universitaria, dedico este proyecto a mis padres Horacio Petro y Cecilia Araque, que colaboraron directamente con mi educación, a mi director y codirector Rodrigo Correa e Iván Amaya por sus aportes en mi formación profesional y crecimiento personal, y a todas las personas que indirectamente realizaron su aporte en este proyecto.

Elkin Horacio Petro Araque

Dedico la culminación de este trabajo de grado a mis padres y a toda mi familia por su apoyo emocional y económico, ya que sin ellos en primer lugar yo no estaría aquí, ni sería la persona que soy.

Rafael Ricardo Fuentes Forero

AGRADECIMIENTOS

En el transcurso de la vida estudiantil y universitaria, se encuentran personas que se hacen partícipes de la formación que se inicia en el hogar con los padres, a ellos Horacio Petro y Cecilia Araque, agradezco toda la paciencia, dedicación y empeño en su primera labor como formadores. A mis profesores por fortalecer las bases que me dieron mis padres, por potenciar las habilidades y capacidades intelectuales, todo esto me permitió crecer profesional y personalmente.

A las amistades que hice en el camino, gracias por los momentos compartidos y por las experiencias vividas, sin olvidar sus aportes a este trabajo y a mi crecimiento como persona.

A todos gracias,
Elkin Horacio Petro Araque

Les agradezco a los Señores Rodrigo Correa e Iván Amaya por su infinita paciencia, sabiduría y guía en la realización de este trabajo de grado, sin su ayuda no lo hubiésemos logrado.

Gracias,
Rafael Ricardo Fuentes Forero

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción.....	18
1. Descripción de la investigación.....	20
1.1 Formulación del problema.....	20
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Objetivo general.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Justificación.....	21
1.4 Antecedentes.....	21
2. Conceptos preliminares.....	22
2.1 Introducción.....	22
2.2 Algoritmo de optimización por enjambre de partículas mejorado (ipso).....	23
2.2.1 Descripción del algoritmo.....	23
2.2.2 Pseudocódigo ipso.....	25
2.3 Algoritmo de optimización por colonia de abejas (abc).....	26
2.3.1 Descripción del algoritmo.....	26
2.3.2 Pseudocódigo abc.....	28
2.4 Modificación de los algoritmos para la identificación paramétrica de sistemas.....	29
3. Prueba de benchmark para los algoritmos.....	31
3.1 Introducción.....	31
3.2 Funciones de prueba.....	31
3.3 Resultados y análisis.....	34
4. Descripción del problema.....	36
4.1 Identificación paramétrica de sistema de pruebas.....	36
4.1.1 Introducción.....	36
4.1.2 Primera prueba.....	36
4.1.3 Segunda prueba.....	39
4.2 Problema propuesto.....	40

4.2.1 Descripción del problema.....	40
4.2.2 Formulación del problema.....	46
4.2.3 Identificación paramétrica del sistema	47
Conclusiones.....	53
Recomendaciones.....	54
Referencias	55
Anexos	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Pseudocódigo IPSO implementado [Autores].....	25
FIGURA 2. Pseudocódigo ABC implementado [Autores].....	28
FIGURA 3. Función Rastrigin.....	32
FIGURA 4. Variación del error con respecto a las iteraciones.	32
FIGURA 5. Variación del error con respecto al número de partículas.....	33
FIGURA 6. Variación del error con respecto al cambio de $c1$, $c2$	34
FIGURA 7. Resultados de la identificación del sistema para 30 muestras.....	37
FIGURA 8. Resultados de la identificación del sistema para 100 muestras.....	38
FIGURA 9. Resultados de la identificación para gauss3.....	39
FIGURA 10. Diferencia entre onda monofásica y onda bifásica.....	41
FIGURA 11. Circuito simplificado del desfibrilador monofásico.....	42
FIGURA 12. Parámetros de desfibrilación.....	44
FIGURA 13. Supervivencia vs. Tiempo [14].....	45
FIGURA 14. Corriente vs tiempo para $R_p=75 \Omega$	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Sub-modelos	30
TABLA 2. Prueba de la función rastrigin con ipso y abc.....	35
TABLA 3. Prueba de la función ackley con ipso y abc.	35
TABLA 4. Prueba de la función sphere con ipso y abc.....	35
TABLA 5. Prueba de la función sum squares con ipso y abc.	35
TABLA 6. resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc (30 muestras).	37
TABLA 7. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc (100 muestras).	38
TABLA 8. Resultados de la identificación paramétrica para gauss3.	39
TABLA 9. Ecuaciones de parámetros de desfibrilación.....	43
TABLA 10. Resultados de error para ipso y abc en 10 experimentos.	47
TABLA 11. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc para $r_p=25 \Omega$	49
TABLA 12. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc para $r_p=50 \Omega$	49
TABLA 13. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc para $r_p=75 \Omega$	49
TABLA 14. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc para $r_p=100 \Omega$	49
TABLA 15. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc para $r_p=125 \Omega$	50
TABLA 16. Influencia de la capacitancia en los demás parámetros*.	50
TABLA 17. Prueba de la función sphere con ipso.	57
TABLA 18. Prueba de la función sphere con abc.....	58
TABLA 19. Prueba de la función sum squares con ipso.....	59

TABLA 20. Prueba de la función sum squares con abc.	60
TABLA 21. Prueba de la función ackley con ipso.	61
TABLA 22. Prueba de la función ackley con abc.	62
TABLA 23. Prueba de la función rastrigin con ipso.	63
TABLA 24. Prueba de la función rastrigin con abc.	64
TABLA 25. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc (30 muestras).	65
TABLA 26. Resultados de la identificación paramétrica usando ipso y abc (100 muestras).	66
TABLA 27. Resultados de error para gauss3.	67
TABLA 28. Resultados de error para ipso y abc en 30 experimentos.	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Prueba de las funciones Benchmark.....	57
ANEXO B. Resultados del error de la identificación paramétrica prueba 1 usando IPSO y ABC.....	65
ANEXO C. Resultados del error de la identificación paramétrica prueba 2 usando IPSO y ABC.....	67
ANEXO D. Resultados del error de la identificación paramétrica desfibrilador monofásico usando IPSO y ABC.....	68

ABREVIATURAS

- ABC: Colonia artificial de abejas.
- ACO: Optimización por colonia de hormigas.
- CPU: Unidad central de procesamiento.
- GA: Algoritmo genético.
- GPU: Unidad de procesamiento gráfico.
- IPSO: Optimización por enjambre de partículas mejorado.
- MSE: Error medio cuadrático.
- PSO: Optimización por enjambre de partículas
- RAM: Memoria de acceso aleatorio.
- SISO: Sistema de una entrada una salida.
- VRAM: Memoria gráfica de acceso aleatorio.

RESÚMEN

TÍTULO: Mantenimiento preventivo básico de un desfibrilador monofásico mediante los métodos de enjambre de partículas mejorado y colonia artificial de abejas *

AUTORES: Elkin Horacio Petro Araque – Rafael Ricardo Fuentes Forero**

PALABRAS CLAVES: IPSO, ABC, desfibrilador, optimización, heurístico.

CONTENIDO:

La identificación paramétrica de sistemas es importante, ya que si se conoce la forma matemática que modela un sistema, éste puede ser analizado para los fines deseados. No obstante, para lograrlo, esta aplicación requiere de variedad de modelos matemáticos para brindar mejor ajuste a los datos. Se considera que el uso de los algoritmos metaheurísticos IPSO y ABC, a través de la definición de una función objetivo facilite la identificación paramétrica de sistemas.

En el presente documento se presenta la identificación paramétrica de un desfibrilador monofásico en condiciones simuladas para un paciente; para tal fin se hace una contextualización en la primera parte a fin de manejar los conceptos importantes referentes a la aplicación, así como los aspectos de las técnicas metaheurísticas IPSO y ABC.

Se presentan los aspectos del desarrollo de los algoritmos, desde el punto de vista del banco de modelos a implementar para la identificación paramétrica, y el desarrollo de cada uno de los algoritmos. En la tercera parte del documento, se presentan los resultados obtenidos, así como las diferentes pruebas realizadas a los algoritmos IPSO y ABC con el propósito de verificar el buen funcionamiento de los mismos. Finalmente, las conclusiones producto de los resultados presentados en los anexos, en donde se resalta la importancia del uso de estos métodos para cualquier sistema que se desea representar, así como su uso para el mantenimiento preventivo de un desfibrilador monofásico.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director Dr. Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector Ing. Iván Mauricio Amaya Contreras.

ABSTRACT

TITLE: Basic preventive maintenance of a single-phase defibrillator using the improved particle swarm optimization and artificial bee colony methods*

AUTHORS: Elkin Horacio Petro Araque – Rafael Ricardo Fuentes Forero**

KEYWORDS: IPSO, ABC, defibrillator, optimization, heuristic.

CONTENT:

Parametric system identification is important, because if the mathematical modeling of system is known, this can be analyzed for the desired purposes. However, to achieve this, some applications require a variety of mathematical models to best fit the data. It is considered that algorithms using metaheuristic IPSO and ABC, through the definition of an objective function facilitate the parametric system identification.

This document presents parametric identification of a single-phase defibrillator under simulated conditions to a patient; for this purpose a contextualization in the first part is done in order to manage the important concepts concerning the application, as well as aspects of the metaheuristic techniques IPSO and ABC.

Aspects of the development of algorithms, from the point of view of the bank of models to implement parametric identification, and the development of each of the algorithms are presented. In the third part of the document, the results obtained, as well as different tests to IPSO and ABC algorithms in order to check the proper operation thereof are presented. Finally, the conclusions product of the results presented in the annexes highlights the importance of the use of these methods for any system that you want to represent, as well as its use for preventive maintenance of a single-phase defibrillator.

* Degree work.

** Faculty of physical-mechanical engineering. School of electrical, electronic and communications engineering. Director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely. Co-Director Eng. Iván Mauricio Amaya Contreras.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de optimización permiten encontrar la mejor respuesta entre un conjunto de posibilidades. En algunos casos, la cantidad de resultados es grande y puede llevar a que el tiempo de cómputo sea elevado, especialmente si no se elige el método adecuado. Estos algoritmos evalúan múltiples soluciones simultáneamente, dado que la mayoría trabaja con poblaciones de elementos (o partículas).

El método de colonia artificial de abejas (ABC) es un algoritmo de optimización que se basa en la representación de soluciones como fuentes de alimento. La tarea de cada abeja artificial es moverse para encontrar la fuente con más néctar dependiendo de su experiencia o la de sus compañeras.

Por otra parte, el algoritmo de enjambre de partículas (PSO) es un método de optimización que se basa en el comportamiento de aves o peces. PSO optimiza un problema al iterar una serie de posibles soluciones que viajan a través del espacio de búsqueda, variando su velocidad y su posición de acuerdo a la información de todo el enjambre. Dentro de la literatura se reportan múltiples variaciones al algoritmo original, pero durante esta investigación se trabajó con IPSO, que corresponde al algoritmo de optimización por enjambre de partículas mejorado.

Este informe de investigación contiene la información relacionada con los métodos IPSO Y ABC, siendo estos el eje central de la información, donde por medio del análisis y la comparación de los mismos se identificarán los parámetros de sistemas no-lineales de entrada y salida sencillas (SISO). Aunque el comportamiento del sistema pueda ser lineal, el objetivo que se indaga en el proceso de búsqueda de la solución para determinar los parámetros es de tipo no-lineal. Los resultados del proceso de

identificación se compararon para conocer que algoritmo de identificación es mejor con base en parámetros como: rendimiento, tiempo de cómputo y calidad de la respuesta.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN¹

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el contexto de la matemática aplicada el ser humano está en la búsqueda constante de respuestas a los interrogantes que se plantea y que surgen del medio en el que se desenvuelve. En el caso particular de la identificación de sistemas existen complicaciones para conocer con gran exactitud y precisión el modelo matemático que representa el sistema, cuando éste es no lineal, por lo que deben buscarse soluciones alternativas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Medir la eficiencia del método de enjambre de partículas y el método colonia artificial de abejas cuando se usan en la identificación de sistemas no lineales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Implementar el método de colonia artificial de abejas (ABC) en la plataforma MATLAB.

¹ Esto constituye un aporte intelectual consensuado de los estudiantes Elkin Petro y Rafael Fuentes junto con el profesor Rodrigo Correa y el Ingeniero Iván Amaya.

- Definir un problema de identificación de sistemas no lineales (SISO).
- Identificar los parámetros del modelo no lineal seleccionado, utilizando los algoritmos de optimización mencionados y medir la eficiencia.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Dada la dificultad que puede presentarse para encontrar el modelo matemático de un sistema en particular, y la importancia de dicho modelo para aplicaciones posteriores (por ejemplo en el área de control), es necesario contar con alternativas que permitan reconstruirlo a partir de información dada por sus entradas y salidas. Por tanto es necesario analizar diferentes metaheurísticas y compararlas, buscando las ventajas y desventajas de cada una.

1.4 ANTECEDENTES

El presente proyecto se fundamenta en un trabajo de investigación de la Universidad Tecnológica de Guangdong [1], donde transforman el problema de identificación de sistemas no lineales en un problema de optimización combinatorial usando los métodos PSO e IPSO, en el que se evalúan los resultados mediante simulación para comprobar la efectividad de los métodos.

2. CONCEPTOS PRELIMINARES

2.1 INTRODUCCIÓN

Con los avances de la tecnología de hoy en día, se requiere obtener resultados de modelos matemáticos que se asemejen al comportamiento real de algún sistema. Sin embargo, hay muchos factores que actúan sobre éste, lo que complica el modelo. Por tanto los métodos tradicionales no son viables, en el sentido que puede ser muy difícil, o casi imposible, seleccionar un punto de inicio adecuado y debido a que pueden caer en mínimos locales. Es así que se buscan otras alternativas, como los métodos metaheurísticos, que están inspirados en la naturaleza, y en esta sección se describen las dos estrategias implementadas durante la investigación.

Por otra parte, la arritmia cardiaca es una de las principales causas de muerte súbita en el mundo, y consiste en que el corazón no expulsa sangre a las arterias. En la actualidad el único tratamiento es la desfibrilación, que consiste en hacer pasar corriente a través del corazón con el objetivo de despolarizar las células cardiacas y permitir que el corazón retome su ritmo normal [2], [3]. Dada la importancia de este dispositivo, se debe asegurar que siempre funcione correctamente, por lo que en esta investigación se implementó una nueva forma de identificar los parámetros circuitales del dispositivo en mención.

2.2 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS MEJORADO (IPSO)

2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Inicialmente, PSO (Particle Swarm Optimization) fue pensado para simular el comportamiento social del movimiento de los organismos, como por ejemplo pájaros o peces, y fue propuesto por James Kennedy y Russel Eberhart en 1995 [4].

El algoritmo consiste en un enjambre de partículas cuya posición y velocidad inicial está definida por un valor aleatorio, dentro de un intervalo de valores en los cuales se desea evaluar la función objetivo; este intervalo también es conocido como espacio de búsqueda, y puede ser diferente para cada variable independiente involucrada con la función objetivo [5].

Luego de la inicialización de velocidades y posiciones para cada partícula, el algoritmo define la dinámica de las mismas por medio de dos ecuaciones, la de velocidad -ecuación (1)- y la de posición –ecuación (2)-, buscando que la primera se vea influenciada por la mejor ubicación local y global en cada iteración. En este punto es importante resaltar que $v_{ij}(t)$ representa la componente de la dimensión j del vector velocidad de la partícula i en el tiempo t , $x_{ij}(t)$ representa la componente de la dimensión j del vector posición de la partícula i en el tiempo t , p_{ij} representa al mejor local de la partícula i en un tiempo t , g_j representa al mejor global de la partícula i en un tiempo t , r_1 y r_2 son números aleatorios entre 0 y 1, c_1 , c_2 representan coeficientes cognitivos.

En cada iteración, una partícula encuentra una posible solución para el problema a minimizar, y esta información es compartida con sus partículas vecinas, de tal forma que se genera un proceso colaborativo y que se puede definir la mejor posición que cada partícula ha encontrado en todo su recorrido (mejor local) y la de todo el enjambre (mejor global).

$$v_{ij}(t + 1) = w * v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (g_j - x_{ij}(t)) \quad (1)$$

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad (2)$$

Inercia o peso (w):

Un elemento diferenciador respecto al PSO original, es que IPSO presenta una inercia o peso en la ecuación de velocidad. Este cambio agrega un impulso adicional en la partícula y logra una exploración de nuevas posiciones en el área de búsqueda. Sin embargo, dicho elemento adicional debe ser eliminado a medida que aumenta el tiempo, por lo que w tiene ciertas condiciones que debe cumplir -ver ecuación (3) -, donde $\alpha_1=0.3$, $\alpha_2=0.2$, r es un número aleatorio entre $[0,1]$, y k está dada por la ecuación (4), donde N es el número de partículas y D es el número de dimensiones [1].

$$w = \begin{cases} (\alpha_1 + \frac{|r|}{2}) |\ln k|, & |k| > 1 \\ (\alpha_1 \alpha_2 + \frac{|r|}{2}) |\ln k|, & 0.05 \leq |k| \leq 1 \\ (\alpha_2 + \frac{|r|}{2}) |\ln k|, & |k| < 0.05 \end{cases} \quad (3)$$

$$k = \frac{MaxDist - MeanDist}{MaxDist} \quad (4)$$

$$MeanDist = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^D (g_j - p_{ij})^2}}{N} \quad MaxDist = \max_{i=1,2,\dots,N} \sqrt{\sum_{j=1}^D (g_j - p_{ij})^2}$$

2.2.2 PSEUDOCÓDIGO IPSO

```

Proceso IPSO
//inicializar todas las partículas
Inicializar
Repetir
  Repetir
    Repetir
      V(i,j)=W*V(i,d)+c1*rand(0,1)*[Pbest(i,d)-X(i,d)]+c2*rand(0,1)*[Gbest(i,d)-X(i,d)]
      X(i,j)=X(i,d)+V(i,d)
      Hasta Que recorra todas las dimensiones
      Hasta Que recorra todas las partículas
      //estableciendo mejor local y mejor global
      Repetir
        //actualizando las partículas a la mejor posición
        Si F(X(i)) < F(Pbest(i)) Entonces
          Pbest(i)=X(i)
      Final
      //actualizando la mejor posición global
      Si F(Pbest(i)) < F(Gbest) Entonces
        Gbest=Pbest(i)
    Final
  Final
  iter=iter+1
  Hasta Que cumpla máximo de iteraciones o tolerancia
Fin Proceso

```

Figura 1. Pseudocódigo IPSO implementado [Autores].

2.3 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE ABEJAS (ABC)

2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

ABC (Artificial Bee Colony) es un algoritmo de optimización propuesto por Dervis Karaboga, basado en el comportamiento de la alimentación de una colonia de abejas [6].

En el algoritmo, el espacio de búsqueda representa un entorno y cada punto en el espacio de búsqueda corresponde a una fuente de alimento (posible solución) que las abejas artificiales pueden aprovechar. La cantidad de néctar de una fuente de alimento representa que tan apta es la solución, y dentro de la colonia pueden existir tres tipos de abejas:

- Abejas Empleadas: Aprovechan las fuentes específicas de alimento que han explorado antes y comparten la información de que tan apta es la fuente de alimento con las abejas que esperan fuera de la colmena (abejas en espera).
- Abejas en espera: Estas reciben la información acerca de las fuentes de alimento y eligen una de acuerdo a la información de calidad. Es decir, la fuente de alimento que contenga más néctar es probablemente la que las abejas en espera elijan.
- Abejas exploradoras: Una abeja empleada cuya fuente de alimento ha sido abandonada por ella, se convierte en una abeja exploradora. Estas abejas buscan fuentes de alimento en todo el entorno aleatoriamente

En el algoritmo ABC, cada ciclo de búsqueda consiste en tres pasos: el envío de las abejas empleadas a las fuentes de alimento para medir sus cantidades de néctar (calidad); la selección de las fuentes de alimento por las abejas en espera después de compartir la información de las abejas empleadas y determinar la cantidad de néctar de

las fuentes; y la fijación de las abejas exploradoras para luego enviarlas a posibles fuentes de alimento [7], [8].

El algoritmo ABC crea una población inicial distribuida aleatoriamente de i soluciones ($i = 1, 2, \dots, E_b$), donde i representa el tamaño de la población y E_b es el número de abejas empleadas, cada solución x_i es una solución D-dimensional, donde D es el número de parámetros a ser optimizados. En cada ciclo del algoritmo, cada una de las abejas empleadas determina una nueva fuente de alimento vecina a su fuente actual y calcula la cantidad de néctar de esta nueva fuente de alimento mediante la ecuación:

$$v_{ij} = x_{ij} + \theta_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5)$$

donde θ_{ij} es un número aleatorio entre $[-1, 1]$, $k \neq i$ y ambos valores $\in \{1, 2, \dots, D\}$, x_{ij} es el parámetro j -ésimo de una solución x_i que fue seleccionada para ser modificada; si la cantidad de néctar de esta nueva fuente de alimento es mayor que la actual, la abeja empleada se mueve a su nueva fuente de alimento, de lo contrario se mantiene. Después de que todas las abejas empleadas completan la búsqueda, comparten la información con las abejas en espera. Con ella, las abejas en espera eligen una fuente de alimento en relación con su cantidad de néctar de la siguiente manera:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (6)$$

donde fit_i es el valor de aptitud de la solución i que es proporcional a la cantidad de néctar de la fuente de alimento en la posición i y SN es el número de fuentes de alimento o lo que es igual al número de abejas empleadas.

Una vez las abejas en espera han seleccionado sus fuentes de alimento, cada una de ellas determina una nueva fuente de alimento vecina a la actual, y calcula la cantidad de néctar. Si es mejor a la actual, memorizan la nueva posición, de lo contrario se mantiene la ya existente. A la fuente de alimentación que fue olvidada se le denomina abandonada, y si transcurren muchas iteraciones sin que se mejore, la abeja empleada de esa fuente se convierte en una abeja exploradora. En esta posición, una nueva solución se genera aleatoriamente para la exploradora, y está dada por:

$$x_i^j = x_{min}^j + u(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad (7)$$

donde j se determina de manera aleatoria y debe ser diferente de i y u es un número aleatorio entre $[-1,1]$.

2.3.2 PSEUDOCÓDIGO ABC

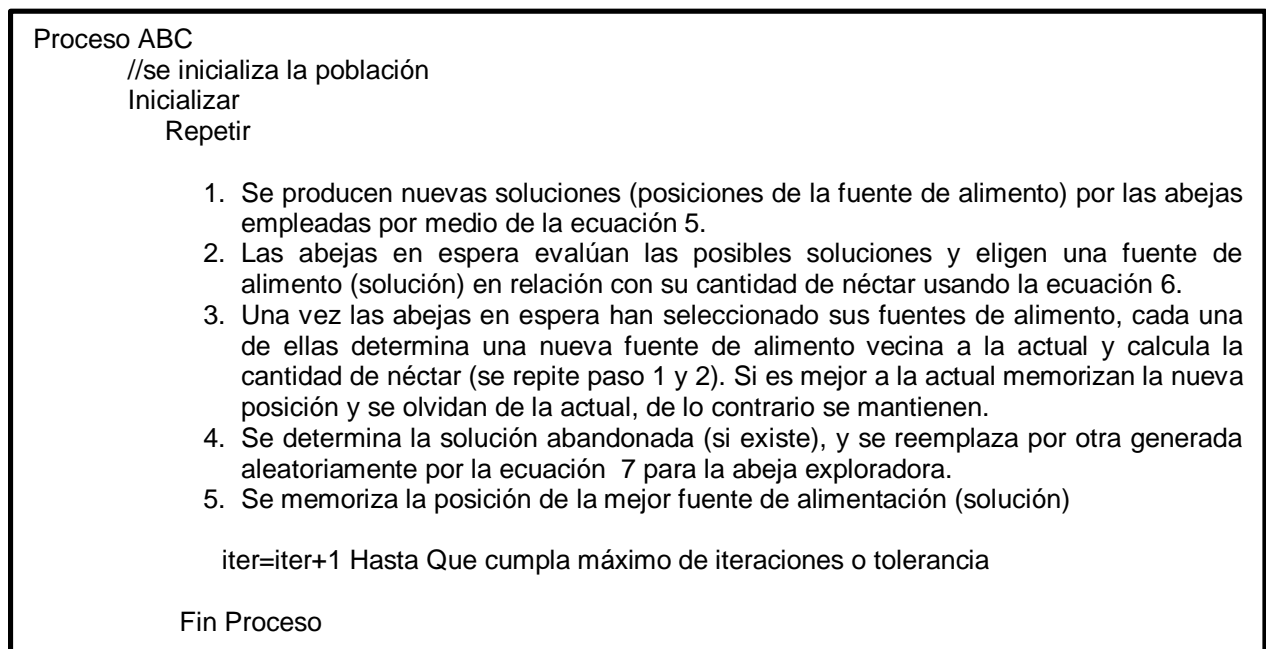


Figura 2. Pseudocódigo ABC implementado [Autores].

2.4 MODIFICACIÓN DE LOS ALGORITMOS PARA LA IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DE SISTEMAS

Utilizando un banco de funciones, se pretende identificar un sistema a partir de muestras entrada-salida, a través de los algoritmos anteriormente explicados. Para ello, se deben tener en cuenta ciertos criterios:

- Para hallar un determinado número de parámetros se deben tener al menos 30 muestras de la función, ya que en la tabla de sub-modelos hay cerca de 30 parámetros en total (para el caso donde se requiera de cada función de la Tabla 1).
- Durante las pruebas ejecutadas en esta investigación, solamente se tendrán en cuenta sistemas modelados con los diferentes tipos de funciones disponibles en el banco registrado en la Tabla 1.
- El algoritmo toma N submodelos, y crea un metamodelo siguiendo la ecuación (8), donde m corresponde al número de muestras, $f_k(x_i)$ corresponde al valor que toma la función objetivo para cada muestra y a_0 es un término independiente.
- La función objetivo se define de la forma mostrada en la ecuación (9), donde y_{mk} son las muestras obtenidas a la salida, y_k es el resultado del meta-modelo evaluado con los parámetros y la muestra de la entrada. Por tanto, la identificación del sistema se convierte en un problema de minimización.

$$y_k = a_0 + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m f_k(x_i) \quad (8)$$

$$f_{obj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{mk} - y_k)^2} \quad (9)$$

NOMBRE	SUB-MODELO	PARÁMETROS
Lineal	$y = bx$	1
Exponencial	$y = ae^{bx}$	2
Exponencial negativa	$y = ae^{-\frac{b}{x}}$	2
Potencial	$y = ax^b$	2
Logarítmica	$y = a * \ln(b + x)$	2
Gompertz	$y = ka^{b^x}$	3
Periódica	$y = a \sin(b + cx)$	3
Hipérbola	$y = \frac{a}{b + x}$	2
S pattern	$y = \frac{1}{a + be^{-cx}}$	3
Logística	$y = \frac{1}{a + bc^x}$	3
Exponencial truncado	$y = ae^{bx} \sin(c + dx)$	4
Gauss	$y = ae^{-(bx-c)^2}$	3

Tabla 1. Sub-modelos

3. PRUEBA DE BENCHMARK PARA LOS ALGORITMOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección se muestran los resultados con diferentes funciones de prueba, las cuales pueden ser multimodales, para verificar si el algoritmo queda atrapado en algún óptimo local. Todas las pruebas fueron realizadas en MATLAB 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2, 2005 y las especificaciones del computador son:

- CPU: Pentium(R) Dual-Core CPU T4200 @ 2.00GHz x 2 (2.00Ghz)
- RAM: 2.0 GB
- GPU: Mobile Intel(R) 4 Series Express Chipset Family (PS4.0/VS4.0)
- VRAM: 64 MB

3.2 FUNCIONES DE PRUEBA

Para comprobar que tanto IPSO como ABC funcionan correctamente, se realizaron pruebas con distintos tipos de funciones. En este caso, se tomó, la función Ackley, Rastrigin, Sphere y Sum Squares [9], comparando las respuestas contra los valores teóricos [10]. Además se variaron las dimensiones para notar que los algoritmos trabajan con N dimensiones y se variaron los parámetros de entrada (iteraciones y partículas). Adicionalmente, para IPSO se variaron las constantes c_1 , c_2 .

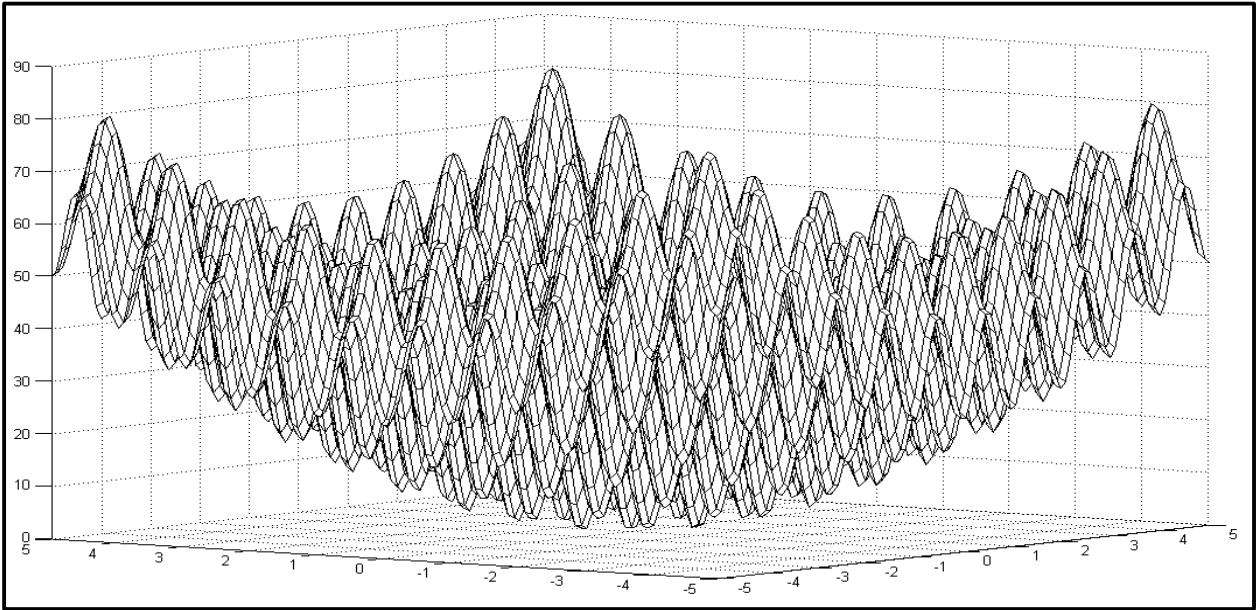


Figura 3. Función Rastrigin.

Como primera medida, se eligió la función de Rastrigin (en 3 dimensiones) que se muestra en la Figura 3 y se ejecutaron 10000 iteraciones (Figura 4), observando que el error fue inferior a $10E-8$ entre 200 - 250 iteraciones, por lo que se modificaron los algoritmos para que se ejecutaran con un mínimo de 250 iteraciones.

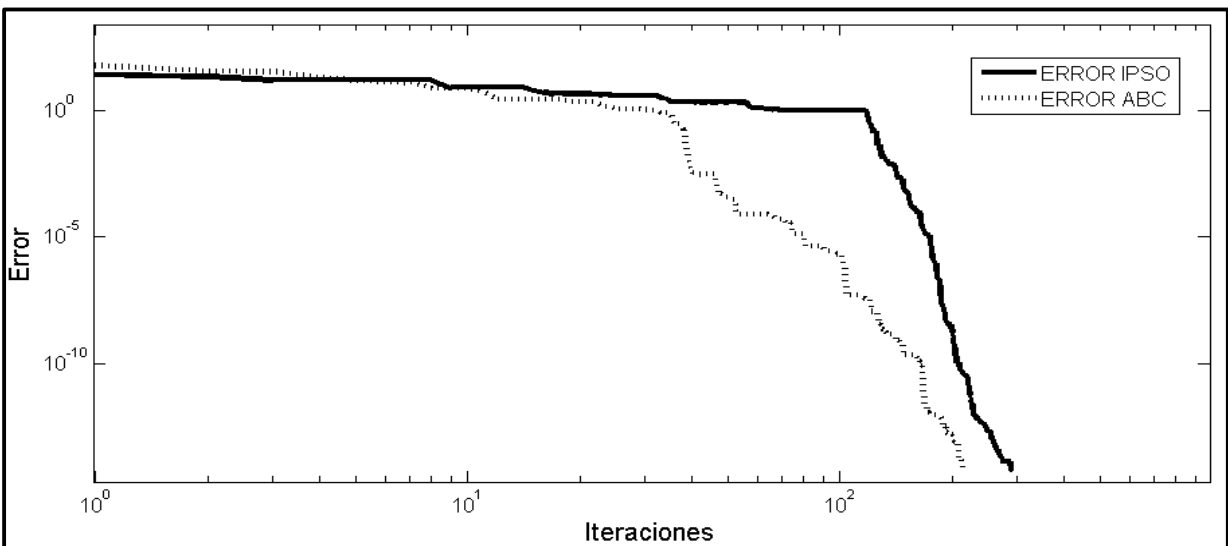


Figura 4. Variación del error con respecto a las iteraciones.

Conociendo las iteraciones mínimas, se procede a variar el número de partículas desde 50 hasta 500 con el fin de saber que tanto fluctúa el error.

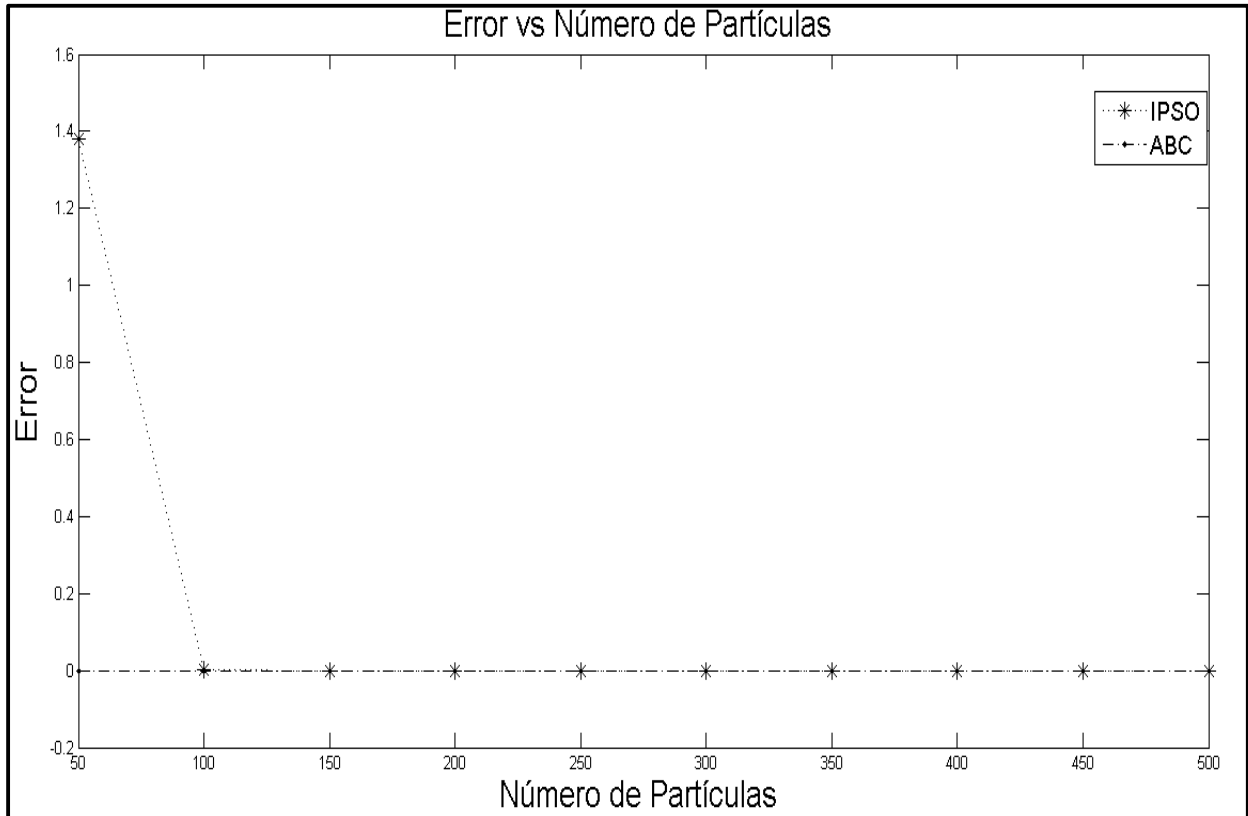


Figura 5. Variación del error con respecto al número de partículas.

Se observa en la Figura 5 que en el caso de ABC se requiere un menor número de partículas para llegar a una solución óptima en comparación a IPSO, lo que demuestra ser más eficiente. Variando c_1 , c_2 en IPSO se obtiene:

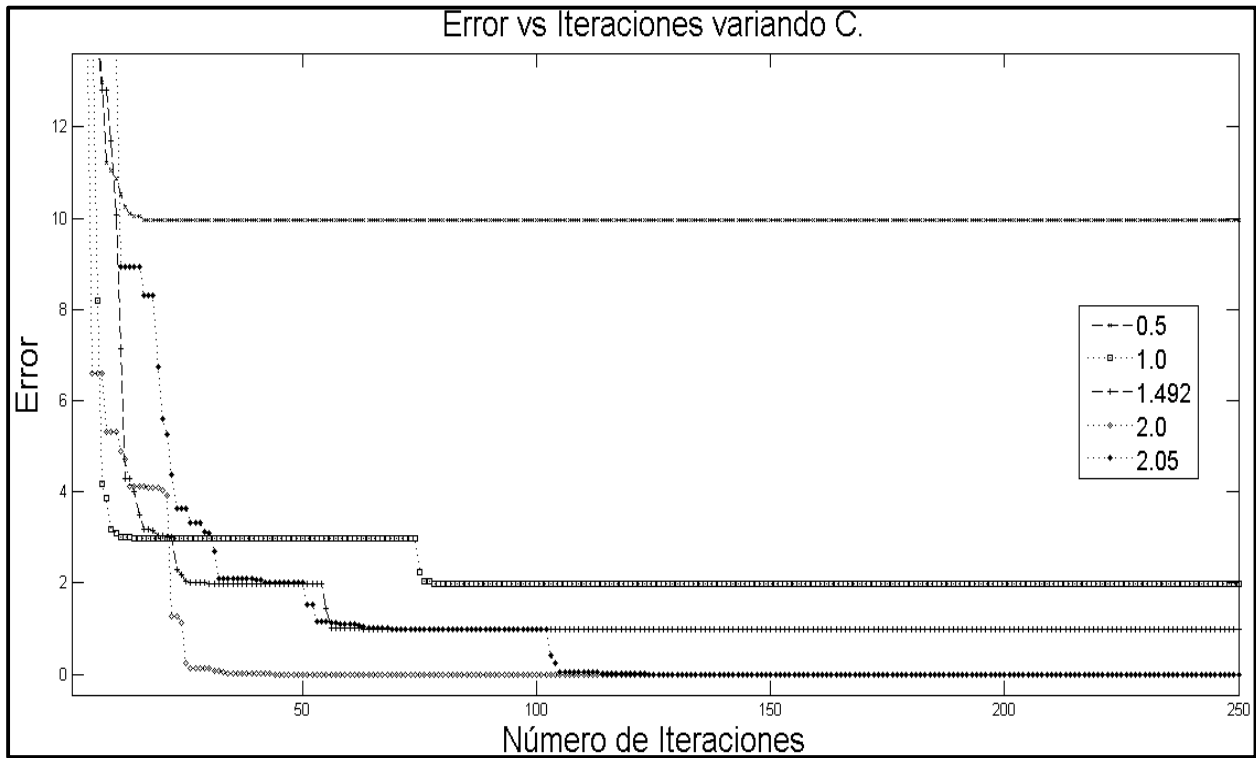


Figura 6. Variación del error con respecto al cambio de c_1 , c_2 .

De la gráfica se concluye que el valor óptimo para c_1 y c_2 es dos, ya que es la que más rápido converge en menos iteraciones comparada con los otros valores de c .

De igual manera este procedimiento se llevó a cabo con las demás funciones y se encontraron resultados similares a los presentados para la función Rastrigin.

3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de todas las pruebas se encuentran en el anexo A. Como se puede observar de la Tabla 2 a la 5, los valores mínimos obtenidos son muy cercanos a los teóricos (menores a $10E-8$). Variando el número de dimensiones con el fin de verificar su convergencia, se observó que los valores obtenidos tienden a alejarse del valor

teórico, esto debido a que entre más dimensiones es más complejo para los algoritmos encontrar todas las posibles soluciones; no obstante ambos convergen. Cabe aclarar que todas las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones* para cada dimensión en cuanto a población, constantes e iteraciones, por lo tanto se concluye que los algoritmos de optimización IPSO y ABC funcionan correctamente.

Rastrigin	3 dim	5 dim	10 dim	20 dim	30 dim	50 dim
Resultado	0	0	0	0	0	0
IPSO	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.41E-15	7.61E-08	9.90E-02
ABC	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.18E-12

Tabla 2. Prueba de la función Rastrigin con IPSO y ABC.

Ackley	3 dim	5 dim	10 dim	20 dim	30 dim	50 dim
Resultado	0	0	0	0	0	0
IPSO	8.88E-16	8.88E-16	3.39E-16	4.44E-15	4.44E-15	8.63E-07
ABC	8.88E-16	8.88E-16	4.44E-15	1.51E-15	6.48E-14	1.41E-08

Tabla 3. Prueba de la función Ackley con IPSO y ABC.

Sphere	3 dim	5 dim	10 dim	20 dim	30 dim	50 dim
Resultado	0	0	0	0	0	0
IPSO	4.01E-69	3.21E-46	8.27E-36	4.57E-37	3.22E-19	5.54E-09
ABC	5.29E-19	1.85E-17	7.40E-17	2.18E-16	4.26E-16	1.52E-15

Tabla 4. Prueba de la función Sphere con IPSO y ABC.

Sum Squares	3 dim	5 dim	10 dim	20 dim	30 dim	50 dim
Resultado	0	0	0	0	0	0
IPSO	1.86E-63	1.74E-57	1.20E-42	4.14E-35	6.35E-27	1.87E-15
ABC	5.52E-18	3.66E-17	7.27E-17	1.96E-16	4.55E-16	3.39E-14

Tabla 5. Prueba de la función Sum Squares con IPSO y ABC.

* Para menores a 20 dimensiones las condiciones son: iteraciones en IPSO (300), iteraciones en ABC (300), partículas en ABC e IPSO (200), c_1 , c_2 (2.0).

Para mayores a 20 dimensiones las condiciones son: iteraciones en IPSO (5000), iteraciones en ABC (2000), partículas en ABC e IPSO (200), c_1 , c_2 (2.0).

4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

4.1 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DE SISTEMA DE PRUEBAS

4.1.1 INTRODUCCIÓN

Con la certeza que los algoritmos funcionan adecuadamente, se procede a verificar su viabilidad en la identificación paramétrica. Para cada una de las siguientes pruebas se ejecutaron treinta veces los algoritmos (bajo las mismas condiciones*) y se eligieron los mejores resultados para verificar la variación de las respuestas en cada ejecución. Estos resultados serán resaltados en las Tablas 6 a 7, en donde estará el mejor resultado en términos del error y tiempo de ejecución. Todas las pruebas se realizaron bajo las mismas especificaciones de la sección 3.1.

4.1.2 PRIMERA PRUEBA

Se parte del ejemplo presentado en [11], considerando que se conocen los valores que deben obtener. Dada la ecuación (10), la cual contiene diez parámetros incluyendo un armónico (aumenta la complejidad), se toman 30 muestras, y se ejecuta el algoritmo. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos, donde se observa que la mayoría de parámetros son cercanos a los teóricos (especialmente ABC). La forma de la solución asumida por los algoritmos se muestra en la ecuación (11).

$$y = 25 + \frac{1}{0.02 + 10e^{-0.25x}} + 5 \sin(3 + 0.5x) + 2 \sin(1.5 + x) \quad (10)$$

* Iteraciones en IPSO (2000), iteraciones en ABC (1000), partículas en ABC e IPSO (200), c_1, c_2 (2.0).

Las pruebas realizadas se encuentran en el anexo B.

	Tiempo (s)	Error	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Ecuacion (10)	-	-	25.0000	5.0000	3.0000	0.5000	2.0000	1.5000	1.0000	0.0200	10.0000	0.2500
IPSO	155.3	7.6485	25.0000	5.0000	2.9647	0.5003	0.0000	5.0000	4.9923	0.0210	10.8966	0.2555
ABC	106.5644	0.9042	25.1909	4.9376	3.0024	0.5011	1.9871	1.4732	1.0032	0.0213	14.8970	0.2692

Tabla 6. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC (30 muestras).

$$y = A1 + \frac{1}{A8 + A9e^{-A10x}} + A2 \sin(A3 + A4x) + A5 \sin(A6 + A7x) \quad (11)$$

La asignación de las variables depende del orden en que fueron usados los submodelos (Tabla 1).

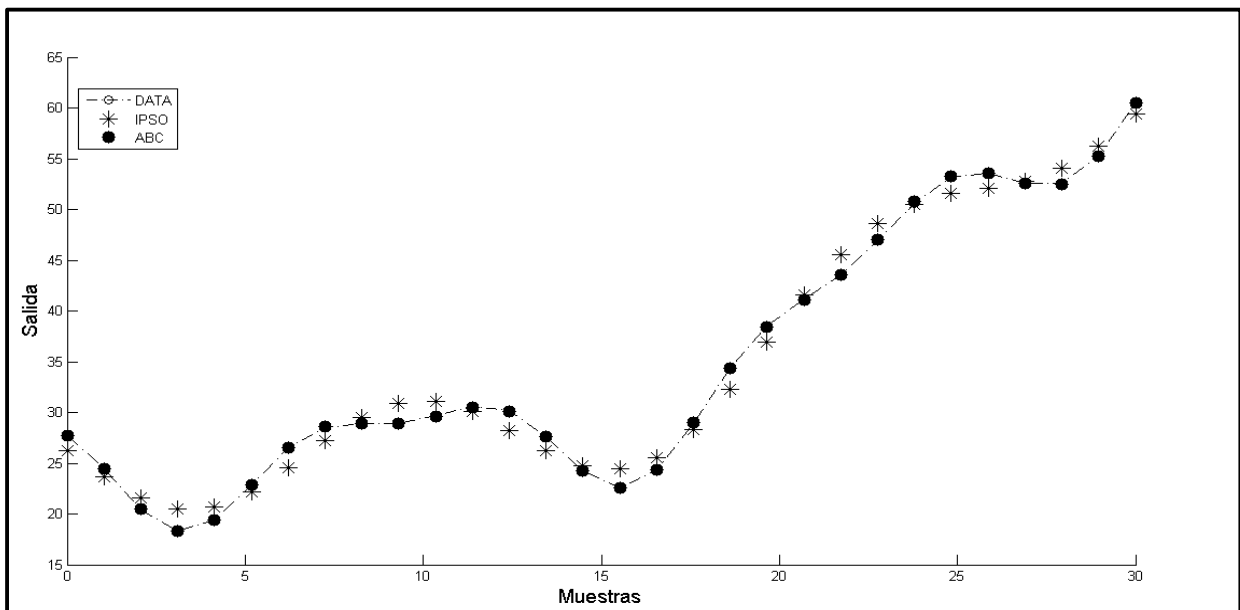


Figura 7. Resultados de la identificación del sistema para 30 muestras.

La Figura 7 muestra que la ecuación 10 (-o-) es muy similar a la encontrada por ABC para la ecuación 11 (•). Por tanto, el modelo hallado se ajusta al modelo real. En cuanto al modelo hallado con IPSO (*), se observa que está ligeramente desajustado (ya que la amplitud A5 es igual a cero, y por lo tanto anula un término de la ecuación), aún cuando sigue teniendo una forma similar a la original.

Con el interés de conocer qué tanto afecta al resultado el número de muestras, se incrementaron hasta 100, y los resultados se consignan en la Tabla 7. De allí se observa que para el caso de IPSO el error disminuyó significativamente. Esto quiere decir que entre más información (muestras) se tenga de la función, más exacto va a ser el resultado, aunque el tiempo de ejecución de los algoritmos aumentó, ya que la cantidad de datos a procesar es mayor. En este caso, las tres curvas se superponen, y por tanto los modelos son válidos. En conclusión, y para este ejemplo, el método ABC es más eficiente que IPSO, ya que encontró soluciones más precisas en menor tiempo y a su vez usó menos recursos computacionales. Además, un incremento en el número de muestras puede mejorar significativamente la precisión de los resultados.

	Tiempo (s)	Error	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Ecuacion (10)	-	-	25.0000	5.0000	3.0000	0.5000	2.0000	1.5000	1.0000	0.0200	10.0000	0.2500
IPSO	1,033.2923	1.3239	25.2057	4.9595	2.9791	0.5027	1.9920	1.5298	0.9990	0.0213	15.0000	0.2693
ABC	593.6816	0.7942	25.0422	5.0000	3.0170	0.4990	2.0136	1.5146	0.9987	0.0196	9.8702	0.2483

Tabla 7. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC (100 muestras).

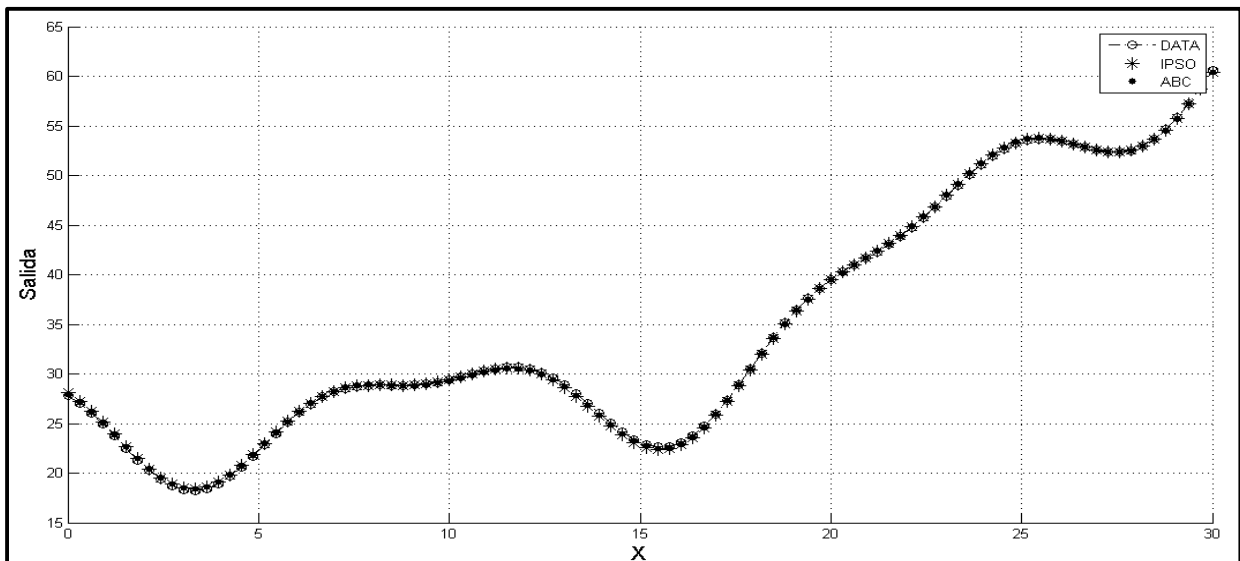


Figura 8. Resultados de la identificación del sistema para 100 muestras.

4.1.3 SEGUNDA PRUEBA

Para la segunda prueba se tomaron las muestras precargadas en MATLAB con el comando “load gauss3”, este ejemplo se caracteriza por tener 250 datos entrada-salida los cuales están dispersos; gauss3 es usada comúnmente para identificación paramétrica para modelos no lineales por la herramienta *curve fitting*, en donde se ingresan los datos y evalúa los posibles modelos que se ajustan a la función [12].

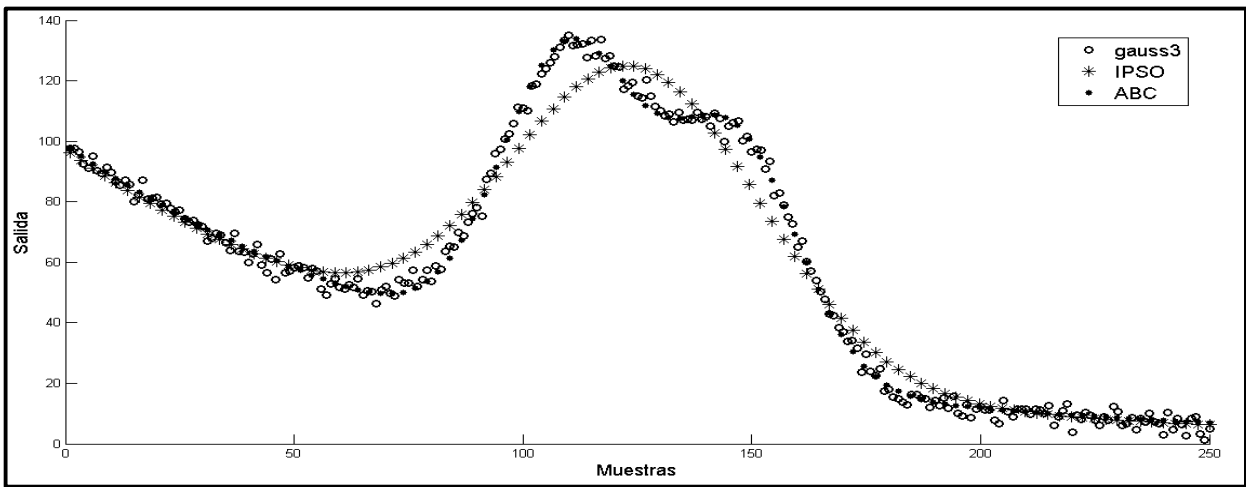


Figura 9. Resultados de la identificación para gauss3.

Como no se posee modelo matemático de estas muestras, solo se puede hacer una aproximación gráfica y del error. En la Figura 9 se observa la identificación paramétrica con cada uno de los métodos en comparación a las muestras originales (los parámetros de la Tabla 8 fueron hallados con el error más bajo para cada método, las pruebas realizadas se encuentran en el anexo C), donde ABC encontró la mejor aproximación en comparación a IPSO.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Tiempo (s)	ERROR
IPSO	97.3384	-0.011	150	-2.4568	10	100	0.0257	3.2061	586.9073	103.2371
ABC	98.5588	-0.0106	79.2252	0.0504	7.36	100	0.0472	5.2142	294.3957	32.05713

Tabla 8. Resultados de la identificación paramétrica para gauss3.

Como se aprecia en la Tabla 8, le tomó menos tiempo a ABC encontrar los parámetros en comparación con IPSO, además es más preciso. Aunque como se ha venido presenciando en algunos años este tiempo se reducirá significativamente puesto que los procesadores van a ser mejores que los actuales y el tiempo de cómputo depende de las especificaciones del ordenador usado, mientras que la precisión está dada por la estructura de los algoritmos por lo que convierte a ABC en una herramienta confiable y eficaz. Con los parámetros hallados el modelo que mejor se ajustó fue:

$$y = A_1 e^{A_2 x} + A_3 e^{-(A_4 x - A_5)^2} + A_6 e^{-(A_7 x - A_8)^2} \quad (12)$$

Nótese que el MSE para ABC es de 32.05713, esto no quiere decir que el modelo no se ajusta a las muestras, sino que el error mide que tan distantes se encuentran las muestras del valor obtenido; y como los datos están dispersos, los algoritmos encuentran una distancia promedio que se ajuste a estos.

4.2 PROBLEMA PROPUESTO

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las principales averías de dispositivos electrónicos se deben al uso inadecuado, al desgaste natural, a factores ambientales y eléctricos, y a fallas en la fabricación.

En este caso, los instrumentos médicos deben estar en continuo seguimiento y revisión, para minimizar las paradas no programadas.

Con el fin de establecer si estos dispositivos están operando correctamente, se implementa la identificación paramétrica enfocada al mantenimiento preventivo y correctivo realizado por personal calificado. Al usar la identificación no sólo se halla el modelo matemático del dispositivo sino también los valores de los componentes que

modelan la descarga de un desfibrilador, como son las resistencias, la bobina y el capacitor.

Existen dos tipos de desfibriladores, el monofásico y el bifásico. En el primero la corriente fluye en un solo sentido y generalmente se emplean hasta 360 [J] para cada una de las descargas. En el segundo la corriente es conmutada, es decir fluye en dos direcciones, y usualmente se disponen de hasta 200 [J] para cada descarga.

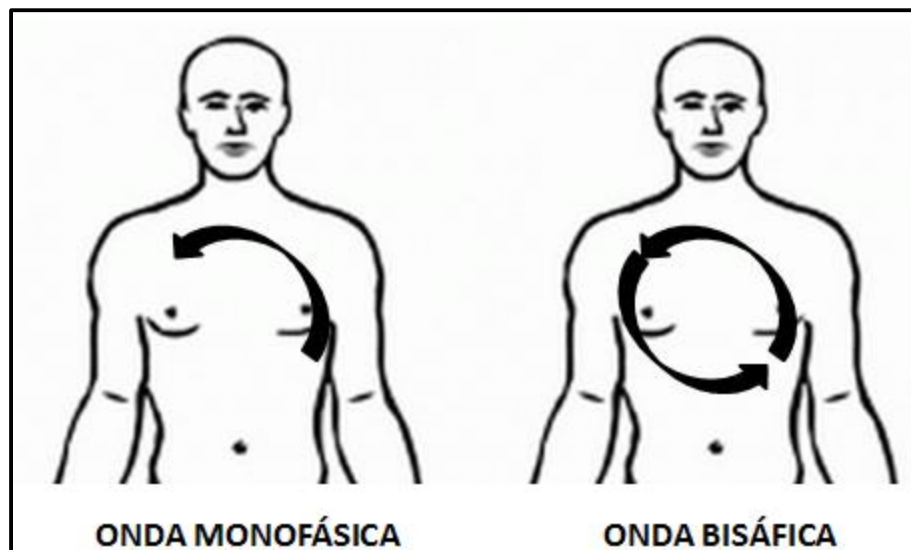


Figura 10. Diferencia entre onda monofásica y onda bifásica

La desfibrilación está definida como la transmisión de corriente eléctrica al músculo cardíaco, ya sea directamente (a través del tórax abierto), o indirectamente (a través de la pared torácica), con el fin de devolver el ritmo a su estado normal. Este documento se enfoca en el desfibrilador monofásico.

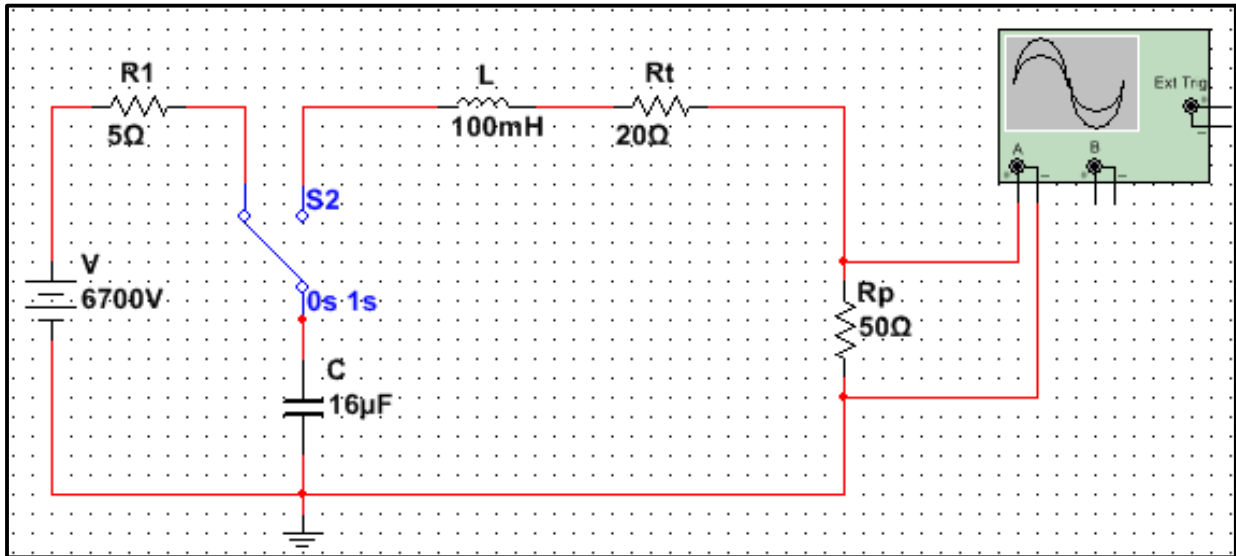


Figura 11. Circuito simplificado del desfibrilador monofásico.

En la Figura 11 se observa el circuito de un desfibrilador monofásico, en donde se usa un transformador y un rectificador de media onda para cargar el condensador C, la resistencia en serie R_s que limita la corriente protegiendo el circuito. Cuando se cierra el interruptor, el condensador se descarga por medio de la inductancia L y la resistencia R_L . La onda de la descarga es de la forma en RLC serie, por lo que pueden tener tres posibles configuraciones dependiendo de la forma de los polos en la ecuación (13), amortiguamiento crítico, sub-amortiguada o sobre amortiguada. Estos datos son tomados del documento [13] para una onda sub-amortiguada.

$$p_{1,2} = \frac{-R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (13)$$

La forma de onda será sobre-amortiguada si p_1 y p_2 son reales y diferentes, amortiguamiento crítico si son reales e iguales, o sub-amortiguada si son complejos conjugados y la corriente en el dominio de la frecuencia compleja está dada por:

$$I(s) = \frac{V_m}{L} * \frac{1}{(s - p_1)(s - p_1)} \quad (14)$$

La corriente para la onda sub-amortiguada en el dominio del tiempo será:

$$I(t) = \frac{V_m}{\omega L} * e^{-\beta t} \text{sen}(\omega t) \quad (15)$$

dónde:

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (16)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (17)$$

En la Figura 11 se presentan los parámetros de desfibrilación, donde:

Energía almacenada	$E_A = \frac{1}{2} C V_m^2$	(18)
Energía entregada al tórax	$E_T = \frac{R_T}{R} E_a$	(19)
Tiempo en donde la corriente alcanza su máximo valor	$T_p = \frac{\tan^{-1}(\omega/\beta)}{\omega}$	(20)
Valor máximo de la corriente desfibriladora	$I_p = I(T_p)$	(21)
Tiempo que demora en descargarse el condensador	$T_d = \frac{5}{\beta}$	(22)

Tabla 9. Ecuaciones de parámetros de desfibrilación.

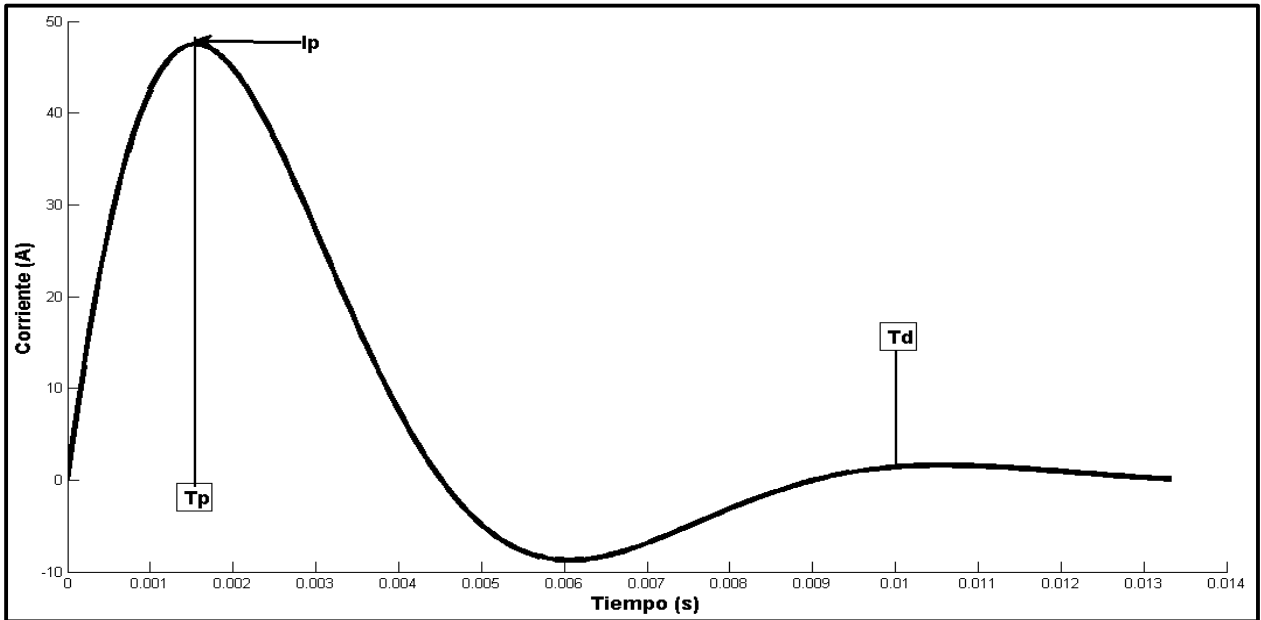


Figura 12. Parámetros de desfibrilación.

Por ser un circuito que trabaja con altas tensiones y corrientes, se debe tener un protocolo de seguridad muy riguroso tanto para el paciente como para el auxiliar, no solo al instante de usar el dispositivo sino al hacer mantenimiento del mismo.

La desventaja de usar desfibriladores portátiles es que estos usan baterías, las cuales pueden estar en mal estado por mantener la energía almacenada durante mucho tiempo. Adicionalmente por cada minuto que pase la probabilidad de que el corazón vuelva a latir se reduce de 7 a 10% como se observa en la Figura 13, después de 10 minutos se considera que el corazón ya no puede ser reanimado y se declara al paciente fallecido.

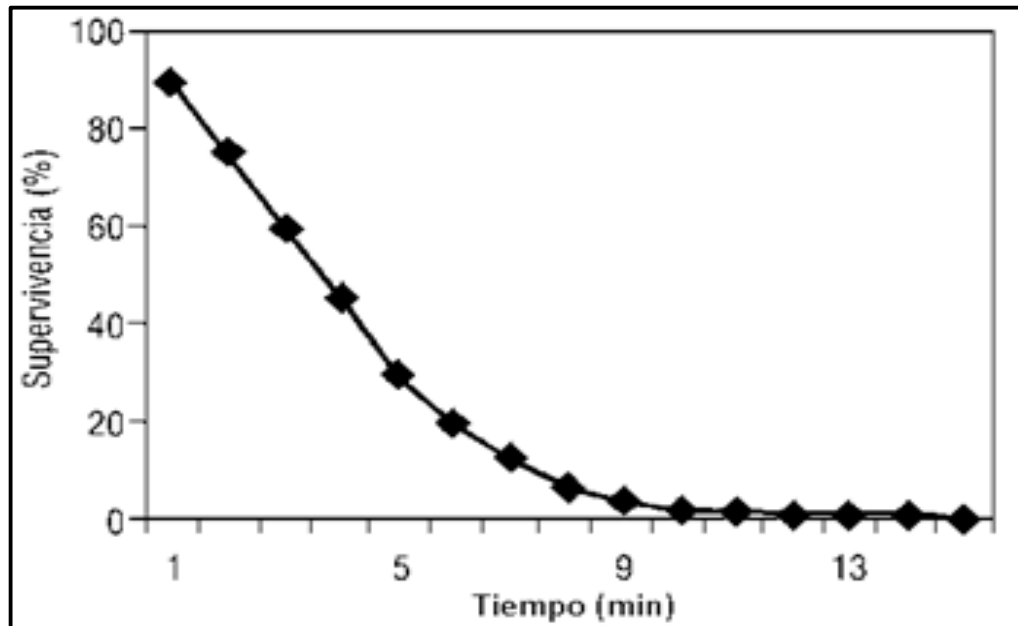


Figura 13. Supervivencia vs. tiempo [14]

El elemento que más se puede ver afectado en un desfibrilador es el capacitor, ya que es el encargado de entregar la energía por medio de la conmutación que hay entre el autotransformador y las paletas. Las causas más comunes de daños en un capacitor son:

- El capacitor se deforma internamente, cuando este no es usado en un periodo muy largo (mayor a 10 años), ya que la capa de óxido se reduce por si misma si el capacitor no es conectado a una fuente de tensión y tiende a disminuir su capacitancia.
- Cuando el capacitor está sujeto a tensiones significativamente menores a su tensión nominal de trabajo, este tiende a permanecer sin polarización y la capa de óxido se irá reduciendo.

Otro factor que afecta a los capacitores se encuentra en la soldadura con los circuitos impresos, debido a que cuando está en uso, la unión tiende a calentarse y por lo tanto a

dilatarse; por otro lado cuando el condensador se deja de usar, la unión se enfría y se contrae. Estos cambios constantes debilitan las uniones en los terminales causando que los condensadores puedan quedar en circuito abierto o intermitentes.

4.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con base en lo anterior, el trabajo se enfoca en obtener los valores de los elementos involucrados que modelan al desfibrilador al momento de aplicar una descarga. Los pasos que llevan a esto son:

- Obtener muestras de salida de un desfibrilador al momento de aplicar una descarga teniendo como referencia los valores que modelan el circuito de la Figura 11.
- Implementando los algoritmos se obtienen los valores ω , β y amplitud que modelan la respuesta del circuito al instante de cerrar el conmutador.
- Los valores de ω , β y amplitud, son reemplazados en las ecuaciones (16, 17, 18) que modelan a cada elemento del circuito interno para obtener los valores de los mismos.
- Los valores de los elementos encontrados son comparados y analizados con los valores de referencia del circuito y de esta forma se conoce la condición en que se encuentra el dispositivo.

4.2.3 IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL SISTEMA

Para conocer como han variado los elementos en un desfibrilador, se realiza una descarga de prueba y se toman muestras de la variación de la corriente. Se compara no solo la energía recibida sino el valor real de los elementos que componen el circuito interno del desfibrilador. Todas las pruebas fueron simuladas y por lo tanto no se tuvo en cuenta la temperatura del desfibrilador, ni factores externos que lo pudieran afectar. Además, se usó el mismo equipo de cómputo de los casos anteriores (ver sección 3.1).

Se realizaron treinta pruebas* con cada algoritmo, pero solo se presentan diez (por motivos de espacio). Los resultados completos se encuentran en el anexo D.

Experimentos											Tiempo Promedio [s]
Error	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ABC	0.1203	0.019	0.9345	1.354	0.0005	0.4992	0.0002	0.702	0.0004	0.672	18.2218
IPSO	1.7861	1.7531	3.7846	2.5309	1.6597	3.2467	1.9941	3.1191	2.2467	1.8647	72.4416

Tabla 10. Resultados de error para IPSO y ABC en 10 experimentos.

En la Tabla 10 se observa para ABC que la variación del error es bajo entre cada experimento en comparación a IPSO. Además el tiempo empleado por ABC para obtener la respuesta es menor. Nótese que el factor más importante en un algoritmo heurístico es su precisión, puesto que está regido por movimientos aleatorios. Sin embargo el tiempo también se considera importante, ya que un tiempo de ejecución alto conlleva a que no sea viable implementar el algoritmo. En resumen el algoritmo de optimización ABC es más eficiente y estable que IPSO. Los valores hallados con ABC son:

* Las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones: cantidad de muestras (200), iteraciones en IPSO (2000), iteraciones en ABC (200), partículas en ABC e IPSO (200), c_1, c_2 (2.0).

$$I(t) = 96.3863 * e^{-375t} * \text{sen}(695.97 * t) \quad (23)$$

En la Figura 14 se observa la onda de la corriente cuando el desfibrilador monofásico se descarga y tiene la forma de onda sub-amortiguada (ecuación 23).

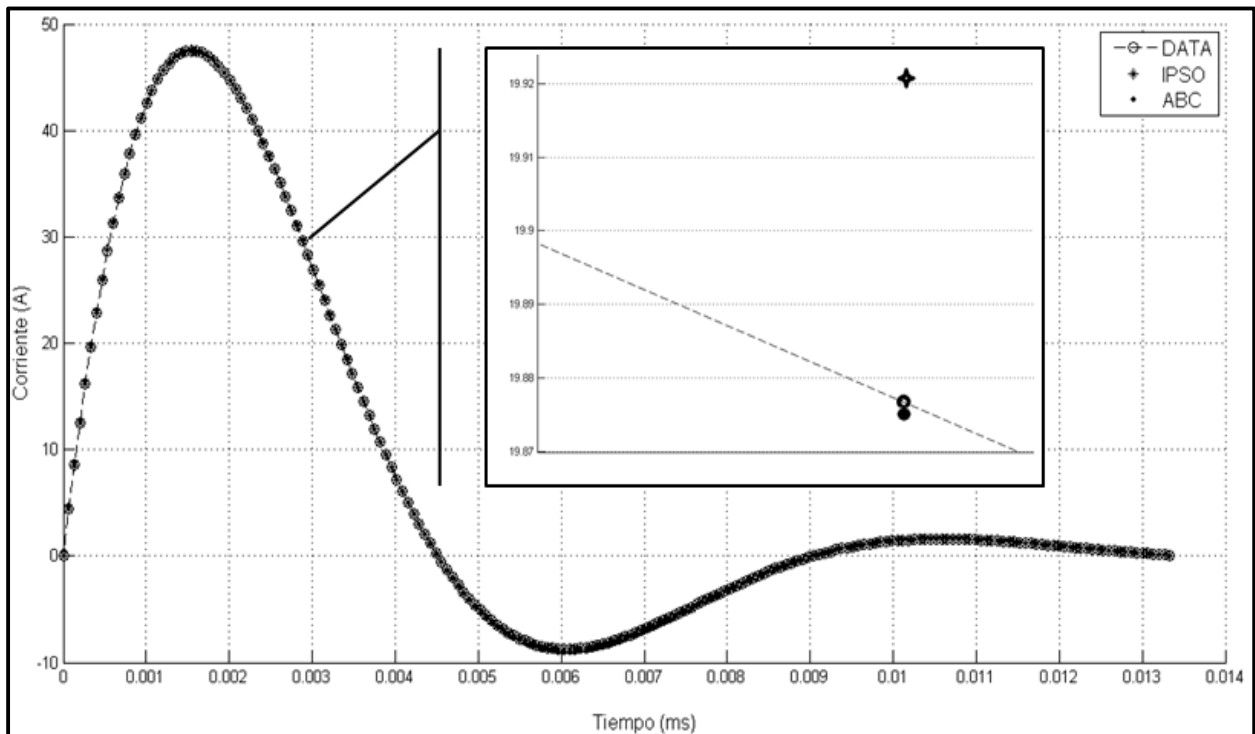


Figura 14. Corriente vs. tiempo para $R_p=75 \Omega$

Se realizaron pruebas de las posibles variaciones de la resistencia que puede tener un paciente en el tórax, teniendo en cuenta que este valor no es fijo. Las pruebas consisten en hallar los parámetros (R, L, C) del desfibrilador usando las ecuaciones (16 a 18) y los valores hallados por los algoritmos IPSO y ABC. Los resultados se muestran de la Tabla 11 a la 15. Como la forma de la ecuación se conoce con anterioridad, se estableció esta ecuación como función destino en el algoritmo; por lo que el tiempo de ejecución se reduce.

	Ea (J)	Rp (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Vm (kV)	Ip (A)	Tp (ms)	Td (ms)	Et (J)	Tiempo (s)	Mean Error
Circuito	360	25	100	16	6.7082	67.6816	1.8	40	288	X	X
IPSO	360	25.0001	100	16	6.7082	67.6816	1.8	40	287.9992	67.0665	0.8167
ABC	360	25	100	16	6.7082	67.6816	1.8	40	288	18.97	0.4752

Tabla 11. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC para $R_p=25 \Omega$.

	Ea (J)	Rp (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Vm (kV)	Ip (A)	Tp (ms)	Td (ms)	Et (J)	Tiempo (s)	Mean Error
Circuito	360	50	100	16	6.7082	55.9562	1.7	20	144	X	X
IPSO	360	50.0585	100.1	15.981	6.7121	55.9239	1.7	20	143.8316	67,6186	0.5399
ABC	360	50.0578	100.1	15.982	6.7121	55.9239	1.7	20	143.8337	18.17	0.0331

Tabla 12. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC para $R_p=50 \Omega$.

	Ea (J)	Rp (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Vm (kV)	Ip (A)	Tp (ms)	Td (ms)	Et (J)	Tiempo (s)	Mean Error
Circuito	360	75	100	16	6.7082	47.5052	1.5	13	96	X	X
IPSO	360	75.0195	100	15.997	6.7088	47.5047	1.5	13.3	95.9751	75.28	1.3643
ABC	360	75.0016	100	16	6.7083	47.5047	1.5	13.3	95.998	22.8756	0.002

Tabla 13. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC para $R_p=75 \Omega$.

	Ea (J)	Rp (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Vm (kV)	Ip (A)	Tp (ms)	Td (ms)	Et (J)	Tiempo (s)	Mean Error
Circuito	360	100	100	16	6.7082	41.1589	1.4	10	72	X	X
IPSO	360	100.0402	99.9222	15.9997	6.7083	41.1575	1.44	9.9	71.9711	81.4929	1.6187
ABC	360	100.0066	100.0066	15.9989	6.7084	41.1575	1.44	10	71.9952	23.1908	0.5472

Tabla 14. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC para $R_p=100 \Omega$.

	Ea (J)	Rp (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Vm (kV)	Ip (A)	Tp (ms)	Td (ms)	Et (J)	Tiempo (s)	Mean Error
Circuito	360	125	100	16	6.7082	36.2369	1.4	8	57.6	X	X
IPSO	360	125.0566	99.6195	16.0263	6.7027	36.2366	1.36	7.96	57.5739	79.4621	6.0576
ABC	360	124.9831	100.053	15.9992	6.7084	36.2366	1.39	8	57.6078	23.17	2.2774

Tabla 15. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC para $R_p=125 \Omega$.

En las Tablas (11 a la 15) se observa que ABC e IPSO hallaron los valores de los elementos del circuito para cada una de las diferentes resistencias del paciente. Por lo tanto los parámetros hallados son los correctos y se afirma que el desfibrilador se encuentra en buen estado.

A su vez se realizaron pruebas simuladas donde se disminuyó el valor de la capacitancia en un 10%, 30%, 50%, para verificar cómo afecta la onda de salida y la energía entregada al paciente. Al ejecutar el algoritmo, este obtuvo los valores de condensador con su capacitancia alterada; es decir el algoritmo es capaz de detectar si algún elemento interno ha cambiado sus características físicas sin tener que desarmar el dispositivo.

		C [μ F]	Amplitud	beta	omega	Ea [J]	Vm [Kv]	Ip [A]	Et [J]	Tp [ms]	Td [ms]	Error	Tiempo promedio [s]
100%	Circuito	16	96.3863	375	695.9705	360	6.7082	47.5052	96	1.5469	13.3333	-	-
	IPSO	15.9518	95.6691	372.5536	696.3644	360.547	6.7183	47.5047	96.1416	1.5503	13.4209	1.0053	74.607
	ABC	15.9996	96.3846	374.9937	695.9702	360.0074	6.7083	47.5047	95.9985	1.5469	13.3336	0.0019	20.741
90%	Circuito	14.4	90.141	375	744.1905	324	6.7082	46.1507	86.4	1.4835	13.3333	-	-
	IPSO	14.4254	88.7514	369.8519	742.2389	323.7197	6.7023	46.1493	86.9061	1.4935	13.5189	1.798	66.699
	ABC	14.3991	90.141	375	744.1905	324.0154	6.7084	46.1493	86.3946	1.4835	13.3333	5.01E-06	19.964
70%	Circuito	11.2	77.3447	375	867.3132	252	6.7082	42.9426	67.2	1.3406	13.3333	-	-
	IPSO	11.2087	77.7345	376.5699	867.6017	251.9039	6.7056	42.9426	67.0978	1.3385	13.2777	0.5481	66.27
	ABC	11.2	77.3447	375	867.3132	252.0016	6.7082	42.9426	67.2	1.3406	13.3333	7.23E-08	18.161
50%	Circuito	8	63.6894	375	1053.269	180	6.7082	38.7397	48	1.1666	13.3333	-	-
	IPSO	8.0129	63.67	375.1	1052.2	179.77	6.7028	38.7212	47.9812	1.1674	13.3298	0.6022	63.65
	ABC	7.9918	63.68	375	1053.3	180.0081	6.7117	38.7212	47.9531	1.1666	13.3333	0.0072	18.215

Tabla 16. Influencia de la capacitancia en los demás parámetros*.

* Los valores de R y L no son tomados en cuenta en la tabla 15 ya que permanecen constantes ante la variación de C.

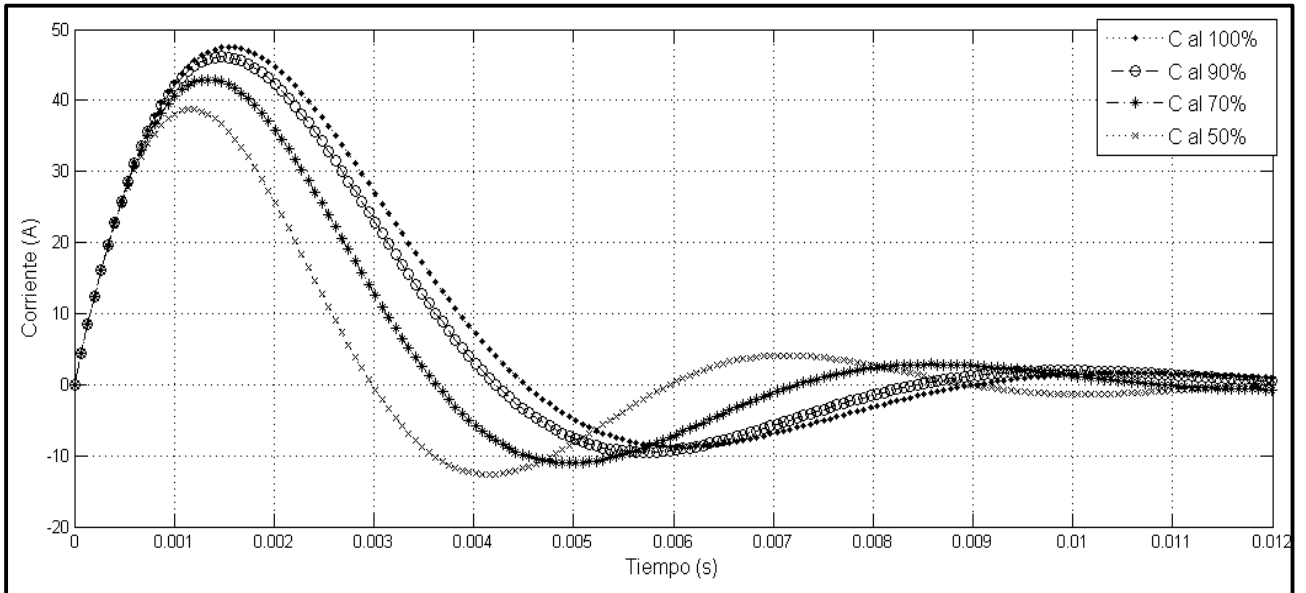


Figura 15. Corriente vs. tiempo para las diferentes variaciones de capacitancia.

Si se presenta algún daño en el condensador, este no será capaz de entregar la energía necesaria para restablecer el ritmo normal del corazón, y se requerirían más descargas. Como son descargas de alta tensión, podrían generar daños irreparables en el musculo cardiaco como la necrosis, en donde a una porción de células no le es posible regenerarse debido a la gravedad de la lesión. También aumentaría el daño en la piel donde es aplicada la descarga, causando quemaduras.

Al tener una variación de la capacitancia, los parámetros que son afectados son la corriente I_p y el tiempo T_p . La corriente recibida por el tórax debe tener un tiempo pico cercano de 1.5 [ms], para que esta decaezca en un tiempo aproximado de 5 [ms], este tiempo es necesario para que el tórax reciba la cantidad de energía suficiente de modo que el corazón vuelva a latir.

Si los valores hallados por lo métodos son diferentes a los del circuito simplificado, se afirma que el desfibrilador se encuentra descalibrado por lo que es necesario su mantenimiento correctivo.

Teniendo como punto de referencia los resultados del proceso investigativo se plantea la viabilidad de crear un dispositivo electrónico que se base en las pruebas realizadas con el fin de implementar el algoritmo ABC como medio de identificación paramétrica de un desfibrilador. Siendo este un aporte al campo biomédico.

CONCLUSIONES

- ✓ Se cumplieron satisfactoriamente los objetivos propuestos y aprobados en el plan de trabajo.
- ✓ El problema de identificación de sistema se convierte en un problema de optimización combinatoria usando como base los sub-modelos, que pueden ajustarse de forma óptima a las muestras suministradas.
- ✓ Tanto IPSO como ABC fueron implementados para hallar los parámetros del sistema y se ajustaron adecuadamente los algoritmos para que tuvieran un enfoque específico hacia el problema a tratar.
- ✓ La identificación paramétrica mediante los métodos de optimización ABC e IPSO, establecen una nueva forma de verificación del estado de los componentes internos de un desfibrilador sin necesidad de destapararlo, gracias a esto se tendrá un punto de partida para determinar si se requiere de mantenimiento o no. Además es una opción más económica, ya que no se requiere del uso de otro tipo de dispositivos.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos no solo en las pruebas sino en la aplicación final al identificar sistemas se observa una mejor precisión por el algoritmo ABC. Además el algoritmo ABC es más simple de configurar, puesto que cuenta con dos coeficientes y no cuatro como el IPSO. Al ser aplicado este método resulta ser una herramienta muy eficaz para identificar parámetros, presentando una convergencia rápida satisfaciendo la eficiencia.

RECOMENDACIONES

- ✓ Como complemento de este trabajo se propone realizar el análisis para un desfibrilador bifásico, con el fin de obtener los valores de los elementos involucrados que modelan al desfibrilador. Además utilizar otros métodos de optimización teniendo como propósito validar los resultados y comparar la precisión de los mismos.
- ✓ Impulsar la utilización de los métodos heurísticos para la identificación paramétrica, no solo enfocado al área de mantenimiento preventivo, sino a otro tipo de sistemas, donde se tenga un propósito específico.
- ✓ Este trabajo puede ser tomado como base para incluir estos métodos heurísticos en dispositivos ya existentes [17], con el fin de obtener un análisis más completo de un desfibrilador.

REFERENCIAS

- [1] X. Deng, "System Identification Based on Particle Swarm Optimization Algorithm," *2009 Int. Conf. Comput. Intell. Secur.*, pp. 259–263, 2009.
- [2] H. Matiz, O. Gutierrez, M. Duque, A. Gomez, "Guías de práctica clínica basadas en la evidencia", pag: 31-32.
- [3] D. Lindberg, "Fibrilación ventricular", [en línea]. [2 de octubre de 2013]. Disponible en la página web: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/007200.htm>
- [4] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [5] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, *Particle Swarm Optimization and Intelligence*. IGI Global, 2010.
- [6] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department 2005.
- [7] F. S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary, "Overview of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm and its applications," *2012 IEEE Int. Syst. Conf. SysCon 2012*, pp. 1–6, Mar. 2012.
- [8] X. Yan, Y. Zhu, and W. Zou, "A Hybrid Artificial Bee Colony algorithm for numerical function optimization," *2011 11th Int. Conf. Hybrid Intell. Syst.*, pp. 127–132, Dec. 2011.
- [9] H. Abdel-Rahman. "Test Functions for unconstrained global optimization", [en línea]. [28 de agosto de 2013]. Disponible en la página Web: <http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/>
- [10] M. Molga and C. Smutnicki, "Test functions for optimization needs," no. c, pp. 1–43, 2005.

- [11] S. A. Liu, F. Tang, "Study on system identification method based on genetic algorithms[J] ". System Engineering Theory and Practice, 2007,16(3):134-139.
- [12] MathWorks. "Curve Fitting Toolbox User's Guide", Primera versión [Julio de 2001].
- [13] J. Quintero, "Desfibrilación Externa", capítulo 13. [En línea]. [18 de septiembre de 2013]. Disponible en la página web: <https://www.sites.google.com/site/ingmedicina/>
- [14] N. Perales, R. De Viguri, J. Luis, P. Vela, and P. Castaño, "Respuesta comunitaria a la muerte súbita: resucitación cardiopulmonar con desfibrilación temprana," pp. 21–31, 2010.
- [15] E. Velazquez, A. Martinez, C. Cancino, G. Oliver, J. Rangel, S. Arias, "Doble choque eléctrico secuencial transtorácico para la fibrilación auricular refractaria". Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. Vol. 75, 2005.
- [16] D. Karaboga, "Artificial Bee Colony (ABC) algorithm", [en línea]. [01 de septiembre de 2013]. Disponible en la página Web: <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/>
- [17] J. Huerta, "Variabilidad de la impedancia humana y protocolo de ensayo en desfibriladores". ST-Electromedicina, 2008.

ANEXOS

Anexo A. Prueba de las funciones Benchmark.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	8.45E-186	3.21E-124	9.10E-74	2.23E-36	1.23E-22	5.38E-11
2	9.32E-186	5.43E-124	1.23E-74	8.98E-36	6.04E-22	9.19E-11
3	8.09E-186	7.78E-124	4.74E-74	2.71E-36	3.84E-22	5.62E-11
4	3.23E-186	2.61E-124	1.34E-74	1.19E-36	6.71E-21	4.68E-11
5	1.46E-171	9.98E-146	9.95E-63	4.01E-37	5.32E-21	5.54E-09
6	1.41E-171	3.06E-146	2.23E-72	7.57E-37	8.39E-21	1.51E-09
7	2.72E-171	5.07E-146	5.04E-72	9.98E-36	2.20E-21	5.54E-09
8	6.45E-179	4.36E-119	2.56E-72	2.26E-36	5.32E-21	6.50E-09
9	8.15E-179	9.91E-119	3.87E-74	9.81E-36	1.17E-19	5.54E-09
10	9.90E-185	1.04E-119	6.27E-74	3.17E-36	4.39E-19	5.19E-06
11	1.34E-185	4.70E-125	7.56E-74	1.58E-36	6.19E-19	1.12E-06
12	7.61E-185	2.36E-125	4.35E-73	4.50E-36	7.48E-22	4.18E-06
13	5.72E-185	8.65E-125	6.03E-73	3.49E-35	4.39E-22	1.12E-06
14	6.83E-185	2.99E-125	4.18E-73	7.43E-35	7.18E-22	7.64E-11
15	9.24E-181	8.38E-126	5.38E-74	3.71E-35	8.56E-22	5.62E-11
16	3.12E-181	4.25E-126	1.23E-74	2.83E-36	7.98E-22	3.10E-11
17	5.61E-179	2.70E-126	2.82E-74	3.98E-36	3.60E-22	1.00E-05
18	7.92E-179	3.90E-186	1.87E-74	9.24E-36	5.63E-22	5.19E-05
19	1.04E-179	6.02E-186	9.58E-72	3.81E-36	3.18E-22	4.39E-11
20	7.03E-179	8.63E-186	2.01E-72	9.61E-36	3.45E-22	2.28E-11
21	3.80E-179	7.95E-126	7.72E-72	3.73E-36	8.19E-22	4.18E-11
22	8.57E-179	4.63E-126	2.13E-72	5.61E-36	3.73E-22	9.93E-11
23	3.19E-186	3.75E-126	5.24E-74	2.48E-36	1.65E-22	4.01E-11
24	5.38E-171	9.03E-126	1.46E-74	7.28E-36	3.01E-22	8.62E-11
25	7.01E-171	1.91E-126	9.19E-74	1.22E-36	4.58E-21	5.27E-11
26	1.56E-171	7.09E-124	2.05E-72	5.84E-36	3.93E-19	5.62E-11
27	8.81E-179	6.84E-124	7.29E-72	2.71E-36	7.28E-19	5.60E-11
28	4.20E-179	7.25E-124	3.61E-72	3.59E-37	3.94E-19	2.54E-09
29	8.51E-185	4.35E-124	1.92E-74	6.57E-37	8.71E-22	5.19E-09
30	8.70E-185	6.87E-119	9.51E-74	3.27E-37	7.98E-22	8.54E-09
31	5.35E-185	6.16E-119	5.81E-74	2.15E-36	1.38E-19	3.14E-09
32	6.27E-185	7.08E-119	8.63E-73	5.19E-36	5.42E-19	6.10E-09

Tabla 17. Prueba de la función Sphere con IPSO.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	3.92E-18	5.10E-17	3.01E-17	1.02E-16	1.81E-16	2.63E-15
2	5.72E-18	7.01E-17	7.59E-17	2.62E-16	4.57E-16	1.93E-15
3	1.45E-18	1.67E-17	1.46E-17	8.93E-16	7.03E-16	8.92E-15
4	6.72E-18	2.35E-17	9.59E-17	2.22E-16	2.18E-16	1.93E-15
5	8.23E-18	1.36E-17	3.92E-17	7.58E-16	3.75E-16	3.47E-15
6	5.76E-18	5.76E-17	5.09E-17	2.22E-16	2.18E-16	1.61E-15
7	3.87E-18	1.36E-17	1.74E-17	3.83E-16	6.38E-16	6.05E-15
8	5.76E-18	9.81E-17	5.24E-17	1.32E-21	3.32E-16	1.61E-15
9	7.16E-18	2.10E-17	6.75E-17	5.01E-21	4.69E-16	1.28E-15
10	2.22E-18	1.02E-17	3.24E-17	1.32E-21	3.32E-16	1.52E-15
11	4.87E-18	2.17E-17	6.04E-17	7.01E-21	8.38E-16	4.58E-15
12	9.22E-18	3.46E-17	7.04E-17	1.32E-21	3.32E-16	1.52E-15
13	9.16E-19	2.17E-17	8.74E-17	1.67E-16	2.04E-16	6.29E-15
14	1.45E-19	2.81E-17	3.40E-17	3.32E-16	4.26E-16	1.66E-15
15	1.66E-18	1.77E-17	8.81E-17	3.39E-16	5.71E-16	3.29E-15
16	4.89E-18	1.81E-17	5.27E-17	3.32E-16	4.26E-16	1.66E-15
17	1.66E-18	1.77E-17	6.27E-17	9.20E-16	4.40E-16	6.58E-15
18	3.28E-18	6.46E-17	6.27E-17	3.32E-16	4.26E-16	1.62E-15
19	4.13E-18	1.07E-17	4.48E-17	3.48E-16	7.29E-16	2.46E-15
20	2.93E-18	4.30E-17	8.59E-17	2.57E-16	4.39E-16	1.41E-15
21	4.13E-18	2.32E-17	4.91E-17	6.39E-16	3.59E-16	7.10E-15
22	7.75E-18	7.17E-17	1.83E-17	2.62E-16	4.78E-16	1.93E-15
23	4.13E-18	2.32E-17	4.09E-17	2.20E-16	7.05E-16	1.27E-15
24	2.86E-18	1.92E-17	9.81E-17	2.22E-16	4.78E-16	1.52E-15
25	6.72E-18	2.32E-17	6.24E-17	8.59E-16	3.84E-16	6.39E-15
26	6.23E-18	5.87E-17	3.39E-17	2.01E-16	2.18E-16	1.52E-15
27	6.91E-18	2.32E-17	6.04E-17	2.83E-16	6.59E-16	4.58E-15
28	4.76E-18	1.47E-17	5.59E-17	2.18E-16	4.26E-16	1.61E-15
29	5.91E-18	1.36E-17	8.40E-17	5.73E-16	7.83E-16	7.29E-15
30	9.76E-18	3.93E-17	3.20E-17	2.18E-16	4.26E-16	1.61E-15
31	2.45E-18	1.27E-17	8.40E-17	9.58E-16	1.47E-16	5.01E-15
32	6.22E-18	9.10E-17	1.17E-17	2.16E-16	4.26E-16	1.66E-15
33	2.01E-18	2.19E-17	8.40E-17	5.01E-16	9.27E-16	7.94E-15

Tabla 18. Prueba de la función Sphere con ABC.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	4.31E-180	3.08E-123	7.74E-71	3.96E-35	2.04E-22	2.20E-04
2	3.14E-187	2.53E-124	2.20E-72	5.82E-35	1.29E-21	1.20E-05
3	9.37E-185	4.42E-118	6.65E-70	1.00E-31	1.03E-20	5.10E-03
4	1.86E-163	1.74E-120	1.08E-42	4.14E-35	6.35E-27	8.87E-15
5	6.71E-176	1.67E-131	2.08E-76	3.16E-35	9.85E-22	3.70E-04
6	6.80E-171	4.50E-117	9.30E-73	1.94E-16	4.48E-21	7.10E-03
7	3.15E-177	7.00E-116	4.84E-71	1.08E-34	1.01E-21	9.87E-15
8	4.31E-180	3.08E-123	1.72E-74	3.96E-35	8.39E-20	2.70E-04
9	6.12E-171	6.87E-123	1.20E-72	5.82E-35	1.67E-21	4.20E-05
10	6.80E-171	2.53E-124	1.65E-70	6.98E-36	9.94E-21	6.10E-03
11	3.15E-177	4.42E-118	1.15E-70	7.82E-36	1.53E-20	5.87E-15
12	4.94E-180	1.74E-120	2.08E-76	3.96E-35	6.35E-27	9.70E-04
13	3.14E-187	1.67E-131	9.30E-73	5.82E-35	9.89E-22	1.10E-03
14	9.37E-185	4.50E-117	1.74E-71	4.14E-35	8.37E-21	3.87E-15
15	1.86E-163	7.00E-116	1.20E-72	3.16E-35	2.85E-21	1.70E-04
16	4.31E-180	3.63E-123	5.65E-70	1.94E-16	1.36E-21	4.64E-05
17	4.03E-180	3.81E-123	1.20E-42	1.08E-34	7.97E-21	7.10E-03
18	8.93E-171	2.03E-124	2.08E-76	3.02E-35	3.39E-20	6.87E-15
19	6.46E-171	2.69E-124	9.30E-73	5.82E-35	1.67E-21	0.70E-04
20	9.20E-171	4.42E-118	7.74E-71	6.46E-36	7.01E-21	7.02E-04
21	3.15E-177	1.74E-120	1.12E-74	7.82E-36	1.39E-20	8.48E-05
22	3.47E-177	1.67E-131	4.42E-74	3.75E-35	6.35E-27	3.10E-03
23	3.92E-177	4.50E-117	1.20E-72	5.82E-35	9.89E-22	9.87E-15
24	1.86E-163	7.00E-116	8.84E-70	6.18E-36	1.28E-21	6.70E-04
25	1.17E-163	3.74E-123	1.85E-70	7.53E-36	6.35E-27	1.93E-05
26	1.07E-163	3.27E-123	2.08E-76	3.96E-35	9.89E-22	8.10E-03
27	8.93E-180	2.53E-124	9.30E-73	5.82E-35	5.03E-21	3.87E-15
28	3.01E-180	4.42E-118	1.74E-71	4.14E-35	1.75E-21	6.70E-04
29	6.80E-171	3.03E-123	1.20E-72	3.16E-35	3.29E-21	4.74E-04
30	5.72E-180	3.47E-123	1.17E-70	1.94E-16	1.18E-21	7.87E-15
31	4.94E-180	4.50E-117	1.20E-42	1.08E-34	8.39E-20	9.70E-04
32	1.04E-180	3.37E-123	1.04E-70	3.96E-35	2.43E-21	2.92E-04
33	3.14E-187	4.50E-117	2.08E-76	5.82E-35	1.48E-21	1.34E-05

Tabla 19. Prueba de la función Sum Squares con IPSO.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	1.12E-18	5.19E-17	7.29E-17	7.24E-16	3.14E-16	1.28E-13
2	4.83E-20	8.22E-18	1.31E-17	2.18E-16	4.26E-16	1.09E-13
3	4.46E-18	6.64E-17	7.17E-17	1.18E-16	6.47E-16	3.96E-14
4	4.83E-20	1.27E-17	5.31E-17	1.94E-16	8.01E-16	6.50E-14
5	7.87E-18	1.97E-17	5.29E-17	6.39E-16	3.28E-16	6.38E-13
6	2.04E-18	4.37E-18	9.80E-17	2.18E-16	1.66E-16	1.80E-13
7	3.23E-19	2.24E-17	4.20E-17	4.49E-16	4.82E-16	3.27E-13
8	5.62E-18	2.60E-17	3.41E-17	1.94E-16	4.05E-16	1.16E-13
9	8.57E-18	3.56E-18	5.17E-17	9.29E-16	4.85E-16	7.06E-13
10	5.62E-18	8.22E-18	6.72E-17	2.18E-16	7.26E-16	3.39E-14
11	5.84E-18	6.12E-18	5.38E-17	2.06E-16	4.93E-16	1.85E-13
12	4.64E-18	8.22E-18	8.55E-17	1.96E-16	6.17E-16	3.39E-14
13	6.28E-18	2.67E-17	5.19E-17	5.05E-16	5.01E-16	4.38E-14
14	2.04E-18	9.27E-17	1.31E-17	2.55E-16	8.37E-16	1.69E-13
15	7.22E-19	1.09E-17	7.04E-17	9.28E-16	4.66E-16	9.19E-13
16	5.62E-18	4.37E-18	5.31E-17	2.55E-16	2.28E-16	1.16E-13
17	2.95E-18	3.04E-17	5.27E-17	2.48E-16	6.05E-16	3.38E-13
18	4.83E-20	7.60E-17	1.80E-17	1.94E-16	3.94E-16	1.09E-13
19	4.23E-18	8.37E-18	4.38E-17	5.56E-16	3.66E-16	5.85E-13
20	4.93E-20	5.27E-17	5.41E-17	2.18E-16	4.74E-16	1.09E-13
21	6.52E-18	1.80E-17	5.56E-17	7.29E-16	7.05E-16	9.18E-14
22	4.19E-20	9.37E-18	7.72E-17	1.94E-16	4.18E-16	1.09E-13
23	4.64E-18	1.43E-17	7.76E-17	5.07E-16	8.26E-16	3.39E-14
24	2.38E-18	3.88E-17	3.98E-17	2.18E-16	4.38E-16	6.50E-14
25	5.35E-19	4.38E-18	5.95E-17	6.95E-16	2.55E-16	5.49E-13
26	5.04E-18	2.33E-17	8.80E-17	2.96E-16	5.05E-16	1.16E-13
27	6.62E-18	2.95E-17	7.29E-17	1.71E-16	5.14E-16	1.73E-13
28	5.29E-18	6.22E-18	5.31E-17	9.55E-16	3.06E-16	3.39E-14
29	2.64E-18	1.19E-17	5.19E-17	2.79E-16	2.66E-16	6.04E-13
30	4.82E-18	7.88E-17	7.80E-17	2.96E-16	4.93E-16	3.39E-14
31	4.64E-18	4.47E-18	4.04E-17	1.28E-16	6.05E-16	2.72E-14
32	2.68E-18	3.37E-18	1.41E-17	7.55E-16	3.75E-16	1.69E-13
33	1.35E-19	9.19E-17	5.28E-17	2.59E-16	2.66E-16	7.04E-13

Tabla 20. Prueba de la función Sum Squares con ABC.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	5.67E-16	5.03E-16	3.56E-15	4.38E-15	4.39E-12	9.39E-04
2	7.45E-16	8.25E-16	6.04E-15	6.96E-15	6.05E-12	4.29E-04
3	4.38E-16	3.25E-16	7.38E-15	5.07E-15	7.28E-12	6.05E-04
4	7.45E-16	7.47E-15	2.28E-15	8.59E-15	2.68E-12	3.38E-04
5	1.89E-16	9.67E-15	9.48E-15	1.48E-14	5.29E-12	6.94E-06
6	7.67E-16	8.09E-15	7.29E-15	5.67E-15	5.85E-12	5.05E-06
7	4.84E-16	1.48E-15	6.05E-15	7.78E-15	7.10E-11	4.74E-06
8	6.38E-16	4.97E-15	7.47E-15	6.36E-14	5.39E-11	7.85E-06
9	9.27E-16	6.29E-15	8.07E-16	3.84E-15	8.48E-11	2.85E-06
10	8.25E-16	5.47E-15	4.38E-15	2.95E-15	6.04E-11	5.02E-05
11	3.87E-16	6.03E-15	6.28E-15	6.03E-15	4.57E-11	7.48E-05
12	6.69E-16	3.86E-16	4.38E-15	2.58E-15	6.68E-11	5.05E-05
13	4.05E-16	6.78E-16	3.06E-15	5.29E-15	2.94E-11	6.87E-05
14	6.23E-16	7.39E-16	6.49E-15	7.25E-15	1.29E-11	2.10E-05
15	5.89E-16	4.75E-16	7.39E-15	8.29E-15	6.59E-11	7.30E-05
16	3.05E-16	6.11E-16	4.19E-15	9.49E-15	7.07E-11	8.45E-05
17	6.46E-16	8.23E-16	5.95E-15	3.59E-15	4.20E-11	4.58E-05
18	7.84E-16	9.96E-16	7.38E-15	6.96E-14	5.37E-09	9.05E-03
19	9.27E-16	3.38E-16	8.39E-15	1.03E-15	3.56E-09	1.96E-04
20	9.94E-16	6.45E-15	5.28E-15	4.28E-15	7.04E-09	3.48E-05
21	4.03E-16	4.76E-15	3.58E-15	6.48E-15	3.29E-12	6.10E-05
22	6.26E-16	7.47E-16	6.06E-15	8.96E-14	6.58E-12	4.34E-05
23	1.17E-16	2.38E-16	3.06E-15	3.02E-15	2.48E-12	7.38E-05
24	2.37E-16	6.95E-16	6.38E-15	5.48E-15	8.78E-09	4.97E-04
25	6.98E-16	7.28E-16	7.18E-16	7.18E-15	9.03E-09	3.23E-04
26	8.97E-16	8.86E-16	3.47E-15	8.48E-15	4.57E-09	7.05E-04
27	9.57E-16	2.74E-16	7.39E-15	7.95E-15	6.28E-09	2.36E-04
28	4.45E-16	5.75E-16	5.96E-15	4.04E-15	4.94E-09	6.07E-04
29	3.37E-16	7.34E-16	8.95E-15	7.73E-15	3.65E-11	2.64E-04
30	6.18E-16	4.97E-16	2.27E-15	3.28E-15	6.03E-11	4.04E-03
31	4.38E-16	3.45E-16	7.47E-15	8.75E-15	2.62E-11	7.97E-03
32	2.04E-16	4.76E-16	9.45E-15	1.49E-14	7.74E-11	2.45E-04
33	1.56E-16	2.56E-16	3.99E-16	4.96E-15	1.02E-11	9.57E-04

Tabla 21. Prueba de la función Ackley con IPSO.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	7.54E-16	8.28E-16	4.04E-15	7.64E-15	6.05E-14	3.06E-08
2	8.46E-16	5.45E-16	7.95E-15	3.05E-15	8.48E-14	4.23E-08
3	5.76E-16	7.60E-16	2.34E-15	8.56E-15	4.96E-14	8.60E-09
4	9.28E-16	4.96E-16	4.24E-15	6.78E-15	6.05E-14	6.28E-09
5	3.57E-16	7.94E-16	6.76E-15	9.67E-15	5.76E-14	9.73E-09
6	7.28E-16	6.38E-16	5.57E-15	4.34E-15	9.35E-14	8.04E-08
7	6.68E-16	4.59E-16	4.47E-15	6.94E-15	3.67E-14	2.51E-08
8	5.09E-16	6.09E-16	9.34E-15	4.64E-15	7.98E-14	5.61E-08
9	7.49E-16	3.95E-16	7.67E-15	7.75E-15	2.136E-14	4.94E-08
10	2.57E-16	1.76E-16	5.93E-15	4.04E-15	9.87E-14	7.84E-08
11	5.08E-16	9.38E-16	7.67E-15	3.78E-15	1.05E-14	1.63E-08
12	7.28E-16	4.28E-16	4.45E-15	8.28E-15	9.76E-14	8.67E-08
13	5.59E-16	6.48E-16	3.90E-15	5.34E-15	4.19E-14	5.94E-08
14	6.39E-16	2.96E-16	8.28E-15	6.65E-15	6.50E-14	4.03E-08
15	8.57E-16	6.97E-16	3.50E-15	7.04E-15	3.39E-14	7.56E-08
16	4.37E-16	3.29E-16	7.48E-15	3.38E-15	7.56E-14	8.19E-08
17	8.85E-16	6.59E-16	9.69E-15	8.29E-15	1.39E-14	5.59E-08
18	7.48E-16	9.38E-16	8.46E-15	2.19E-15	9.59E-14	7.38E-08
19	2.92E-16	3.86E-16	7.27E-15	8.39E-15	5.67E-14	4.61E-08
20	6.85E-16	1.34E-16	4.37E-15	1.56E-15	4.38E-14	7.40E-08
21	4.96E-16	4.67E-16	6.46E-15	7.47E-15	6.34E-14	8.29E-08
22	2.37E-16	1.48E-16	3.94E-16	4.38E-15	3.56E-14	3.49E-08
23	6.28E-16	8.69E-16	8.54E-15	6.06E-15	8.93E-14	5.58E-08
24	8.19E-16	9.05E-16	2.94E-15	3.97E-15	3.67E-14	3.03E-08
25	3.38E-16	4.75E-16	9.66E-15	6.05E-15	7.16E-14	2.94E-08
26	7.47E-16	3.74E-16	1.94E-15	9.07E-15	4.42E-14	6.46E-08
27	5.18E-16	7.83E-16	6.65E-15	1.04E-15	7.45E-14	7.81E-09
28	8.47E-16	8.03E-16	3.04E-15	6.07E-15	8.95E-14	1.40E-09
29	4.49E-16	9.76E-16	6.95E-15	4.86E-15	9.48E-14	5.37E-09
30	9.85E-16	4.04E-16	7.04E-15	3.94E-15	4.83E-14	7.50E-09
31	1.75E-16	5.67E-16	9.06E-16	2.45E-15	7.38E-14	1.28E-08
32	3.93E-16	6.28E-16	8.74E-15	7.27E-15	6.12E-14	3.05E-08
33	5.74E-16	9.56E-16	5.67E-15	3.46E-15	5.49E-14	8.82E-08

Tabla 22. Prueba de la función Ackley con ABC.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	0	0	0	3.08E-12	0	1.93E-03
2	0	0	0	0	1.62E-06	1.36E-08
3	0	0	0	0	2.20E-07	1.48E-08
4	0	0	0	1.22E-09	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	2.44E-09
7	0	0	0	6.67E-07	0	0
8	0	0	1.99E-12	0	2.80E-07	0
9	0	0	0	0	2.98E-07	5.98E-03
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	9.31E-10	1.62E-07	0
13	0	0	0	0	3.08E-06	1.36E-08
14	0	0	0	0	0	6.74E-06
15	0	0	1.06E-12	0	2.20E-07	1.93E-03
16	0	0	0	0	2.80E-07	0
17	0	0	0	0	3.08E-06	0
18	0	0	0	0	0	1.65E-09
19	0	0	0	0	2.98E-07	0
20	0	0	0	0	1.62E-06	0
21	0	0	0	9.31E-10	2.20E-07	0
22	0	0	0	6.65E-13	2.80E-07	1.62E-05
23	0	0	1.99E-12	0	0	1.36E-08
24	0	0	0	0	0	1.02E-08
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	1.99E-12	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	2.80E-07	1.65E-09
30	0	0	0	9.31E-10	2.20E-07	1.02E-08
31	0	0	0	0	0	1.62E-05
32	0	0	1.06E-12	0	0	0
33	0	0	0	3.98E-08	0	0

Tabla 23. Prueba de la función Rastrigin con IPSO.

EXPERIMENTO	3 DIM	5 DIM	10 DIM	20 DIM	30 DIM	50 DIM
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0

Tabla 24. Prueba de la función Rastrigin con ABC

Anexo B. Resultados del error de la identificación paramétrica prueba 1 usando IPSO y ABC.

EXPERIMENTO	IPSO		ABC	
	ERROR	TIEMPO (S)	ERROR	TIEMPO (S)
1	7.62080	91.67549	0.85418	138.69512
2	7.58911	92.24574	0.88007	134.80387
3	18.91104	91.17999	0.94398	138.72293
4	7.62084	92.66113	0.57853	137.45449
5	4.23186	92.48105	0.61882	138.64492
6	7.62299	93.84599	0.96081	137.22413
7	18.91104	91.91936	0.79938	138.97170
8	18.87345	110.49363	0.97464	157.77052
9	17.79014	113.31633	1.10582	150.65177
10	7.62306	102.09632	0.94783	159.77576
11	7.62514	103.24819	0.92849	152.66751
12	17.73195	103.04485	0.84594	152.54902
13	16.37360	104.51767	0.94513	151.43978
14	17.15707	102.09342	0.98000	152.22557
15	7.62514	103.38933	0.87808	150.75592
16	17.15707	108.10163	1.19146	178.64995
17	0.75346	105.33261	0.84222	141.33932
18	17.15707	93.20635	0.96792	140.47118
19	17.15707	93.64904	1.03243	146.92667
20	17.15707	105.92326	0.86589	193.83053
21	17.15707	122.52972	0.92657	141.70979
22	7.62514	91.48156	1.18933	161.04876
23	18.90341	102.09192	1.03763	151.28065
24	17.73397	107.70678	1.49066	137.86954
25	7.62514	92.91861	0.89268	137.80154
26	7.54897	92.41173	1.00508	140.66397
27	7.62328	93.54946	0.83847	185.96870
28	7.62182	104.25025	1.42702	136.54119
29	18.88627	92.10727	0.98208	136.69679
30	7.62514	92.81195	0.91111	142.57976

Tabla 25. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC (30 muestras).

EXPERIMENTO	IPSO		ABC	
	ERROR	TIEMPO (S)	ERROR	TIEMPO (S)
1	13.8232	156.7083	1.739	108.2854
2	13.7017	156.4935	1.7839	105.8907
3	13.8154	155.6417	1.544	108.0486
4	13.811	155.4759	1.5716	105.6165
5	13.8232	155.2144	1.7863	103.6572
6	19.0579	155.8918	1.5101	107.2545
7	13.8234	155.1191	0.9042	106.5644
8	28.4621	155.3544	1.6304	106.5695
9	13.8232	154.8099	1.4088	104.4038
10	13.8095	154.8863	1.858	105.3496
11	13.8315	155.5354	1.6604	105.3901
12	34.4249	155.4513	1.7759	101.8494
13	13.8232	155.6031	1.7253	103.7313
14	13.8148	154.8308	1.7602	105.9175
15	13.8232	155.9307	1.5654	105.3142
16	13.8095	155.1055	1.4183	105.5869
17	13.7015	155.0951	1.6184	105.4857
18	7.6485	155.3000	1.0193	107.0565
19	13.8234	154.5496	1.5972	103.2285
20	13.8143	154.6158	1.4949	105.5394
21	34.4249	155.4987	1.806	101.268
22	13.8784	155.8415	1.716	105.6443
23	13.8097	154.8816	1.029	105.0709
24	61.2266	155.3118	1.9818	101.9481
25	13.9409	155.487	1.7833	105.419
26	61.2266	155.1164	1.539	103.5163
27	13.8232	155.4149	1.459	104.6199
28	13.8232	227.3004	2.4878	104.7319
29	27.2534	226.4174	1.4805	170.8165
30	34.4249	219.6512	1.6811	154.8239

Tabla 26. Resultados de la identificación paramétrica usando IPSO y ABC (100 muestras).

Anexo C. Resultados del error de la identificación paramétrica prueba 2 usando IPSO y ABC.

EXPERIMENTO	IPSO		ABC	
	ERROR	TIEMPO (S)	ERROR	TIEMPO (S)
1	103.4156	537.7504	42.1391	270.6105
2	103.4156	650.0818	39.1931	312.8268
3	540.4106	631.0093	34.9995	313.5962
4	540.4116	627.2565	43.1416	310.0189
5	103.3812	568.2668	42.0245	305.6713
6	103.4156	655.0633	39.0684	312.9779
7	103.4156	640.8878	46.4020	312.9187
8	413.934	636.3641	39.2732	313.8549
9	540.4116	631.6888	42.7145	317.6357
10	103.4156	699.5740	45.9943	304.1961
11	103.3836	547.5881	44.8978	283.4936
12	540.4116	572.9477	47.3126	279.1091
13	540.4106	556.9412	46.6013	270.8716
14	103.4158	562.4451	48.2234	279.1286
15	540.4106	556.0577	40.3853	266.8534
16	103.4156	601.2900	39.7947	276.1033
17	103.4156	558.8371	32.0571	276.0095
18	103.4156	547.7343	39.6234	269.484
19	540.4116	539.6857	38.2961	272.0874
20	111.4338	595.2532	39.5237	371.9078
21	103.3812	576.7611	45.5224	322.1262
22	103.3812	588.431	39.8143	279.3073
23	103.4156	572.4106	35.4776	288.6593
24	103.4156	575.9879	44.6022	362.217
25	539.0101	651.8109	32.9409	291.8815
26	540.4116	603.2616	40.7219	284.0136
27	540.4106	524.4373	46.0029	267.1245
28	103.3812	524.0878	46.5077	266.7556
29	103.2371	533.8888	47.9174	278.4821
30	103.4156	539.4205	46.2470	271.9493

Tabla 27. Resultados de error para gauss3.

Anexo D. Resultados del error de la identificación paramétrica desfibrilador monofásico usando IPSO y ABC.

EXPERIMENTO	IPSO		ABC	
	ERROR	TIEMPO (S)	ERROR	TIEMPO (S)
1	1.7861	61.911574	0.1203	18.154781
2	1.7531	62.041962	0.019	18.159583
3	3.7846	61.204064	0.9345	18.105009
4	2.5309	61.940202	1.354	18.182767
5	1.6597	61.626302	0.0005	18.193968
6	3.2467	61.478844	0.4992	18.141965
7	1.9941	61.526265	0.0002	18.177599
8	3.1191	61.509839	0.702	18.250176
9	2.2467	61.741998	0.0004	18.233436
10	1.8647	61.87192	0.672	18.593091
11	7.5547	61.183517	0.832	18.241754
12	3.4055	62.071135	3.89E-06	18.285084
13	7.3358	61.796201	2.3288	18.122412
14	1.7809	62.01174	0.0012	18.215228
15	2.3503	61.774416	7.96E-09	18.089329
16	2.6316	61.861466	0.1494	18.202909
17	2.6812	61.124253	1.957	18.055031
18	2.2244	62.120369	0.0086	18.167663
19	1.6597	61.29897	0.008	17.967477
20	1.084	61.980835	0.0017	18.165876
21	1.7281	62.566532	1.21433	18.455887
22	0.5112	62.253222	0.3073	18.305833
23	2.0878	62.232849	1.61E-10	18.329403
24	0.2114	62.353064	2.71E-06	18.370632
25	1.9301	62.418126	0.0852	18.196504
26	0.4536	62.20019	0.0906	18.426618
27	1.403	61.763568	0.7621	18.305503
28	1.5219	62.416695	0.0313	18.36621
29	1.4993	62.349328	1.0777	18.01993
30	1.4303	61.074945	0.3612	18.131984

Tabla 28. Resultados de error para IPSO y ABC en 30 experimentos.