

Recibido 29 de agosto de 2022. Aceptado 03 de diciembre de 2022. Publicado 23 de diciembre de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Estimación de los parámetros del circuito equivalente del transformador usando algoritmos genéticos

L. FELIPE TORRES PÉREZ<sup>1</sup>, JUAN C. OLIVARES GALVÁN<sup>1</sup>, HÉCTOR ASCENCIÓN MESTIZA<sup>2</sup>,  
DAVID GRANADOS LIEBERMAN<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, CDMX.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, Morelia, Michoacán.

<sup>3</sup> ENAP-RG, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), Irapuato, Gto., México.

\*Autor de Correspondencia: torresfelipp@gmail.com.

**RESUMEN** En este trabajo se propone la estimación de los parámetros del circuito equivalente del transformador monofásico en estado estable utilizando el Algoritmo Genético (AG). La forma de determinar los parámetros del circuito equivalente del transformador en el laboratorio se basa en las mediciones del fabricante realizadas en las pruebas de circuito abierto y cortocircuito del transformador. Para mejorar el proceso de estimación de los parámetros se incluyen un análisis independiente de los operadores de selección, cruce y mutación utilizados del AG. La validación del AG se realiza mediante la comparación de los parámetros calculados obtenidos experimentalmente. Los resultados de esta investigación resultan extremadamente útiles para determinar los parámetros del transformador cuando el cliente no tiene acceso a las pruebas de laboratorio para su cálculo.

**PALABRAS CLAVE**— Algoritmo genético, estimación, transformador monofásico, circuito equivalente.

## I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía y la integración de nuevos recursos de energía distribuida presentan nuevos retos en la continuidad y eficiencia del sistema eléctrico [1]. El transformador eléctrico en este contexto requiere de métodos de diagnóstico eficientes y rentables que brinden información de su desempeño eléctrico, así como prevenir fallas, alargando su vida útil. Así, el modelado del transformador en estado estable usando los parámetros del Circuito Equivalente del Transformador (CET) estimados con algoritmos de optimización se vuelve relevante [2,3,4].

En la literatura se presenta un número importante de métodos aplicando técnicas de optimización basados en algoritmos evolutivos para la estimación de los parámetros del CET como en [3,5] donde se implementa la optimización práctica del Algoritmo Genético (AG) y el proceso de AG junto con la optimización mediante cúmulos de partículas [3,6]. Estos algoritmos de búsqueda requieren los datos de placa del transformador y los datos de carga medida, sin desconectar el transformador del sistema eléctrico, y los resultados se validan con los obtenidos de pruebas de circuito abierto y cortocircuito para evaluar el desempeño del algoritmo. En esta misma línea se implementaron el algoritmo competitivo imperialista y el algoritmo de búsqueda gravitacional, donde se encontró una mayor

precisión en los resultados y convergencia [2]. En búsqueda de simplicidad se han implementado otros algoritmos de optimización como el algoritmo de optimización coyote [7], algoritmo optimizador de búsqueda medusa [8], mostrando buen rendimiento y estabilidad en la estimación de los parámetros del transformador. Sin embargo, la revisión de gran parte de estos algoritmos tiene que ser examinada como se demuestra el artículo [4]. Donde señala inconsistencias en los resultados publicados por algunas investigaciones mencionadas anteriormente, por otra parte, los autores implementan el algoritmo de optimización de forrajeo de mantarrayas (MRFO) y el algoritmo de estimación basado en MRFO caótico (CMRFO) [4], junto con aspectos inherentes del funcionamiento del transformador basados en normas de la IEEE, para una mejor estimación de los parámetros del circuito equivalente del transformador [4,9].

En este trabajo se implementa el AG iniciando con la caracterización del CET incluyendo las pérdidas inherentes en el funcionamiento del transformador. Así como el análisis de los operadores que componen al AG (selección, cruce y mutación). Los resultados de este trabajo se validarán con datos experimentales del circuito equivalente del transformador monofásico expuestos en los artículos [2,3,4] para comprobar la efectividad del método propuesto.

El documento está organizado de la siguiente manera. La Sección II describe el circuito equivalente del transformador y los elementos del AG. La Sección III presenta los resultados obtenidos, así como la desviación entre los parámetros obtenidos experimentalmente con los estimados mediante el AG propuesto. La Sección IV concluye el documento con las conclusiones y trabajos futuros.

## II. DESARROLLO

Para lograr replicar los fenómenos físicos del transformador real se debe conocer los 6 parámetros del CET. En este contexto la Fig. 1 muestra el CET referido al lado primario con carga y los parámetros  $R_1, X_1, R'_2, X'_2, R_c$  y  $X_m$ , representando la resistencia de la bobina primaria, la reactancia de la bobina primaria, la resistencia de la bobina secundaria referida al primario, la reactancia de la bobina secundaria referida al primario, así como la resistencia por pérdidas del núcleo y la reactancia de magnetización respectivamente [10].

Aplicando la ley de corriente de Kirchoff al circuito de la Fig. 1.

$$-V_1 + Z_1 \cdot I_1 + Z_0 \cdot (I_1 - I'_2) = 0 \quad (1)$$

$$Z_2 \cdot I'_2 + Z_l \cdot I'_2 + Z_0 \cdot (I'_2 - I_1) = 0 \quad (2)$$

Donde:

$$Z_0 = R_c \cdot X_m / R_c + X_m \quad (3)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones formado por la Ec. (1) y la Ec. (2) se obtiene la corriente primaria  $I_1$ , la corriente secundaria referida  $I'_2$  y el voltaje secundario referido  $V'_2$ .

$$I_1 = V_1 \cdot (Z_2 + Z_l + Z_0) / \Delta \quad (4)$$

$$I'_2 = V_1 \cdot Z_0 / \Delta \quad (5)$$

$$V'_2 = I'_2 \cdot Z_l \quad (6)$$

Donde:

$$\Delta = ((Z_1 + Z_0) \cdot (Z_2 + Z_l + Z_0)) - Z_0^2$$

Las pérdidas en el cobre y las pérdidas del núcleo del transformador. Se obtienen simplificando el circuito de la Fig. 1 como se muestra en la Fig. 2.

Las pérdidas en el cobre:

$$P_{cu} = (I'_2)^2 \cdot R_{eq} \quad (7)$$

Donde:

$$R_{eq} = (R_1 + R'_2) \text{ y } X_{eq} = (X_1 + X'_2)$$

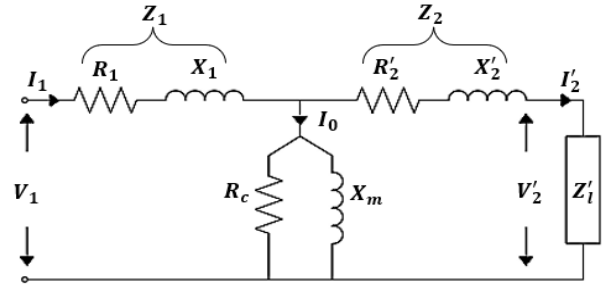


Fig. 1. Circuito equivalente del transformador monofásico referido al lado primario.

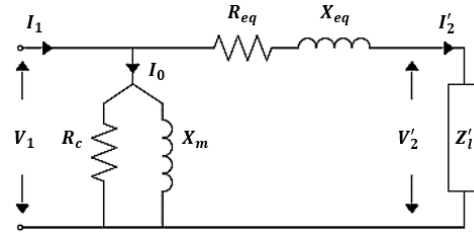


Fig. 2. Circuito equivalente simplificado del transformador monofásico referido al primario.

Las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_n = V_1^2 / R_c \quad (8)$$

Donde:

$$V_1 = V'_2 + R_{eq} \cdot I'_2 + jX_{eq} \cdot I'_2$$

La potencia de salida con carga resistiva se calcula:

$$P_{out} = I'_2 \cdot V'_2 \quad (9)$$

La potencia de entrada se determina por:

$$P_{int} = P_{out} + P_{cu} + P_n \quad (10)$$

La eficiencia está dada por:

$$\eta = (P_{out} / P_{int}) \cdot 100 \quad (11)$$

### A. FUNCIÓN OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

La función objetivo que minimiza el error cuadrático medio entre la tensión y las corrientes que se obtienen de las mediciones de los ensayos clásicos, para esto se utiliza la Ec. (12).

$$J = \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{I'_{est1}}{I'_{ms1}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{I'_{est2}}{I'_{ms2}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{V'_{est2}}{V'_{ms2}} - 1 \right)^2 \right) \quad (12)$$

Donde  $I_{ms1}$ ,  $I'_{ms2}$  y  $V'_{ms2}$  son los valores medidos en terminales del transformador e  $I'_{est1}$ ,  $I'_{est2}$  y  $V'_{est2}$  son los valores calculados con la Ec. (4) a la Ec. (6) respectivamente. Y  $n$  es el número de mediciones, cuando se cuenta con las mediciones de potencia de entrada y potencia de salida, se utiliza la siguiente función objetivo:

$$J^* = \sum_{i=1}^n \left( \begin{aligned} & \left( \frac{I_{est1}}{I_{ms1}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{I'_{est2}}{I'_{ms2}} - 1 \right)^2 \\ & + \left( \frac{V'_{est2}}{V'_{ms2}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{P_{est2}}{P_{ms2}} - 1 \right)^2 \\ & + \left( \frac{P_{est1}}{P_{ms1}} - 1 \right)^2 \end{aligned} \right) \quad (13)$$

Donde  $I_{ms1}$ ,  $I'_{ms2}$ ,  $V'_{ms2}$ ,  $P_{ms1}$ ,  $P_{ms2}$  son los valores medidos en terminales del transformador,  $I_{est1}$ ,  $I'_{est2}$ ,  $V'_{est2}$ ,  $P_{est2}$ ,  $P_{est1}$ , son los valores calculados con la Ec. (4) a la Ec. (6) y la Ec. (9), Ec. (10) respectivamente,  $n$  en este caso toma el valor de 6.

La Ec. (12) y la Ec. (13) tienen bases del estudio estadístico [11] y su uso está respaldado por investigaciones en la estimación de parámetros del circuito equivalente [2,3,4,5]. La selección de la función objetivo estará sujeta a las mediciones disponibles.

La estructura del AG inicia con una población de individuos generados aleatoriamente. Cada individuo constituye una solución potencial al problema de optimización dado [12]. En el caso del transformador cada individuo está compuesto por los parámetros del CET  $R_1, X_1, R_2, X_2, R_c, X_m$ . Cada individuo de la población se asigna un valor de aptitud mediante una función objetivo (Ec. (12) o Ec. (13)) con el valor de aptitud asignado se aplican los siguientes operadores.

1. **Selección.** El operador de selección tiene que encontrar a los mejores individuos de la población que transferirán su información genética a la siguiente generación y al mismo tiempo no entrar al problema de convergencia prematura por la falta de diversidad genética. Así la implementación en el AG propuesto es la selección por torneo determinista, que brindará diversidad en cada generación y tiene una sencilla implementación [12].
2. **Cruza.** El operador de cruza recombina los padres seleccionados generando la descendencia para el AG propuesto la cruza implementada es cruce binario simulado. La cruza intenta emular el efecto de la cruza de un punto usada con representación binaria y es ampliamente utilizada por la propiedad autoadaptativa que tiene debido a que la diferencia entre la nueva solución generada y la solución principal más cercana depende de la diferencia entre las dos soluciones principales que toma como padres [13]. Asimismo, si los límites máximos y mínimos de cada parámetro del CET son cercanos, se requiere la implementación de un operador de reparación  $f_{fix}$  el cual revisa cada una de las variables que componen a cada descendiente generado. En caso de no estar dentro de estos límites el elemento es cambiado por un valor aleatorio dentro de los límites establecidos. Por otra parte, si esto no sucede la descendencia generada pasará a la siguiente función sin ninguna modificación.

3. **Mutación.** La mutación es un operador que mantiene la diversidad en la descendencia, evitando que el AG alcance un óptimo local al impedir que los individuos sean iguales. Sin embargo, este operador tiene que manejarse con una probabilidad de mutación baja, de lo contrario hay dos escenarios, el primero es una convergencia prematura, la cual será resultado de la aleatoriedad y que difícilmente podrá repetir la solución encontrada. Por otro lado, al tener gran número de mutaciones, la descendencia puede tener mutaciones que resulten perjudiciales, obteniendo soluciones alejadas al óptimo global. En este sentido y con la finalidad de brindar sencillez en la implementación del AG, el operador de mutación utilizado es la mutación uniforme [14].

Después de aplicar los operadores de selección, cruza y mutación, se obtiene la descendencia que formará la nueva generación, esta acción se divide en tres pasos, el primer paso es evaluar a la descendencia en la función fitness, así cada nueva solución tendrá asignado su fitness, el segundo paso se ordenará la descendencia de mayor a menor según su fitness, en el último paso se integra una función de selección elitista que toma la peor solución de acuerdo con su fitness y es reemplazada por una copia de la mejor solución de acuerdo con su fitness [15]. Una vez finalizada esta acción, la nueva población resultante entrará en un ciclo hasta que la condición de paro se cumpla, en este caso el número de generaciones establecido en los parámetros de control del AG. La estimación final se toma del promedio total de ejecuciones que se establecen en cada caso de estudio. Esta metodología utilizada está basada en la búsqueda heurística inherente de los algoritmos evolutivos. El pseudocódigo implementado del AG propuesto se muestra en la Fig. 3.

```

BEGIN /*Algoritmo Genético*/
  Generar una población inicial.
  Evaluación de cada individuo de la población con OF.
  // OF función objetivo.
  FOR Número de generaciones~ DO
  BEGIN /*Ciclo reproductivo*/
    Selección por torneo determinista.
    Cruza SBX.
    Operador fix.
    // Repara al individuo si esta fuera de los límites establecidos.
    Mutación Uniforme.
    Evaluación de cada individuo de la población con OF.
    Operador selección elitista determinista.
  END
  IF La población a convergido THEN
    Terminado := TRUE
  END
END

```

Fig. 3. Pseudocódigo del algoritmo genético propuesto.

### III. RESULTADOS

En este trabajo se presentan dos casos de estudio, el transformador monofásico de 15 kVA, 2400/240 V a 50Hz y el transformador monofásico de 2 kVA, 220/110 V a 50 Hz los parámetros guía del CET se toman de [2,3,4]. Asimismo, las tensiones y corrientes medidas a plena carga de los transformadores. Para el caso de estudio 2, la potencia de entrada y la potencia de salida se obtienen utilizando el software Matlab/Simulink simulando el circuito de Fig. 1, con los parámetros guía de [4].

Caso de estudio 1: Transformador monofásico 15 kVA, 2400/240 V, 50Hz. Se realizan 20 ejecuciones con los siguientes parámetros de control del AG:

- Población de 100 individuos.
- Número de generaciones 100.
- Probabilidad de cruce 0.6.
- Probabilidad de mutación 0.001.

Los límites asignados a los parámetros del CET se muestran en la Tabla I.

La Tabla II muestra la estimación de los parámetros del transformador monofásico, obtenida del promedio de las 20 ejecuciones junto con los porcentajes de error para los seis parámetros del CET.

El análisis de los resultados muestra que el promedio del total de ejecuciones realizadas proporciona una estimación con una baja desviación con respecto a los valores guía de los seis parámetros del transformador (ver Tabla II). Asimismo, se presenta el error absoluto de los seis parámetros estimados. El cálculo se realiza mediante la diferencia absoluta entre los valores guía y estimados. En este sentido, el error promedio muestra la precisión del AG, calculado con los seis errores absolutos, siendo de 4.66 %. Se utilizan los parámetros estimados del transformador de la Tabla II para el cálculo de la tensión referida del secundario  $V'_2$ , la corriente del primario  $I_1$ , la corriente referida del secundario  $I'_2$  así como la eficiencia  $\eta$ , para ser verificados con los valores correspondientes obtenidos de los ensayos de circuito abierto y cortocircuito de [2,3], los resultados de  $V'_2$ ,  $I_1$ ,  $I'_2$  y  $\eta$  se muestran en la Tabla III, con su respectivo porcentaje de error y error promedio.

Tomando los resultados de Tabla II y Tabla III, los parámetros estimados por el AG proporcionan un error porcentual relativamente bajo con respecto a los valores guía. Este AG puede manejar límites máximos y mínimos amplios de los parámetros  $R_1, X_1, R'_2, X'_2, R_c, X_m$  sin perder efectividad, no obstante, se debe tener en cuenta que al aumentar estos límites se necesitará incrementar el número de generaciones o en base a experiencia se puede proponer incrementar la población inicial para tener más diversidad en las soluciones. Otra forma es realizando cambios en los parámetros de control como la selección, la probabilidad de cruce y la probabilidad de mutación. Sin embargo, un

problema a considerar es el tiempo que toma realizar la estimación. De acuerdo con los resultados presentados se requiere entre un rango de 15 a 30 iteraciones para lograr un error promedio menor del 5%.

Para verificar los parámetros estimados del transformador monofásico de 15 kVA, se calculó la regulación de voltaje variando la carga de 50% a 100% en incrementos de 10%, utilizando los parámetros estimados generados por el AG y se comparó con la regulación de voltaje calculada usando los parámetros guía. Tabla IV muestra la variación del voltaje secundario referido y el cálculo de su correspondiente valor de regulación de voltaje para el rango desde el 50% de carga al 100% de carga, para este cálculo se considera que el voltaje primario es constante.

La Fig. 4 muestra la desviación de la regulación de voltaje estimada por el AG propuesto y la calculada de los parámetros guía.

TABLA I. LÍMITES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS PARÁMETROS DEL CET.

$R_1^{\min}$ [ $\Omega$ ]	2	$R_1^{\max}$ [ $\Omega$ ]	15
$X_1^{\min}$ [ $\Omega$ ]	3	$X_1^{\max}$ [ $\Omega$ ]	5
$R_2^{\min}$ [ $\Omega$ ]	1.5	$R_2^{\max}$ [ $\Omega$ ]	15
$X_2^{\min}$ [ $\Omega$ ]	2	$X_2^{\max}$ [ $\Omega$ ]	5
$R_c^{\min}$ [ $\Omega$ ]	104700	$R_c^{\max}$ [ $\Omega$ ]	105200
$X_m^{\min}$ [ $\Omega$ ]	9050	$X_m^{\max}$ [ $\Omega$ ]	91500

TABLA II. PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR DE 15 kVA (PROMEDIO DE 20 EJECUCIONES).

Parámetros	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_1$ [ $\Omega$ ]	$R'_2$ [ $\Omega$ ]	$X'_2$ [ $\Omega$ ]	$R_c$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]
*Guía	2.45	3.14	2	2.2294	105,000	9106
AG	2.30	3.24	1.82	2.4496	105.025	9121
Error (%)	5.95	3.24	8.75	9.87	0.02	0.16

TABLA III. CORRIENTES, VOLTAJE Y EFICIENCIA ESTIMADOS DEL TRANSFORMADOR DE 15 kVA (PROMEDIO DE 20 EJECUCIONES).

Parámetros	$I_1$ [A]	$I'_2$ [A]	$V'_2$ [V]	$\eta$ [%]	Error Promedio
*Guía	6.2	6.2	2383.8	98.50	-----
AG	6.21	6.18	2373.3	98.57	-----
Error (%)	0.16	0.31	0.43	0.07	0.24

TABLA IV. VOLTAJE SECUNDARIO REFERIDO AL PRIMARIO Y REGULACIÓN DE VOLTAJE VARIANDO LA CARGA DEL TRANSFORMADOR DE 15 kVA.

Carga [%]	$V'_{2Guía}$ [V]	$V'_{2Est}$ [V]	$RV_{Guía}$ [%]	$RV_{Est}$ [%]
50	2385.2	2386.2	0.6187	0.5781
60	2382.4	2383.6	0.7356	0.6868
70	2379.7	2381.0	0.8528	0.7958
80	2376.9	2378.4	0.9701	0.9049
90	2374.1	2375.9	1.0876	1.0143
100	2371.4	2373.3	1.2053	1.1239

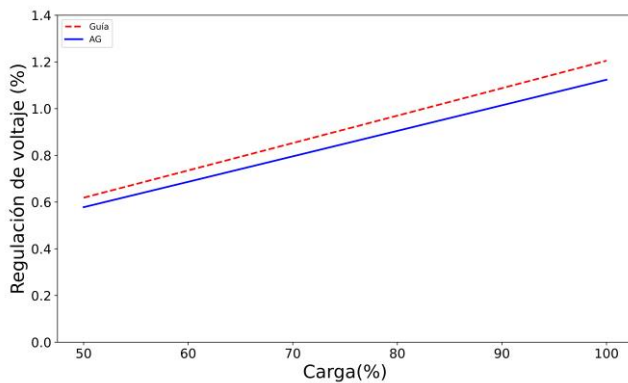


Fig. 4. Regulación de voltaje variando la carga del transformador de 15 kVA.

Los resultados del caso de estudio 1 están sujetos a los datos obtenidos de [2,3]. Sin embargo, como se ha anticipado, los valores guía presentan ciertas inconsistencias como el valor de la corriente  $I_2'$ , este valor es igual al valor de la corriente  $I_1$ , pero en el caso de una carga resistiva el ángulo de fase entre la corriente secundaria y la corriente de magnetización es inferior a  $90^\circ$ . En este sentido la corriente  $I_2'$  deberá ser siempre menor a la corriente  $I_1$ . Otro aspecto importante es la metodología utilizada para obtener la potencia de entrada y de salida necesarias para calcular la eficiencia  $\eta$ , debido a que no se toma en cuenta las pérdidas del núcleo y de magnetización, si bien las pérdidas son relativamente pequeñas y suelen ser ignoradas, son parte del funcionamiento del transformador y permiten realizar una caracterización más precisa de la estimación de los parámetros del transformador.

Por otro lado, la velocidad de convergencia del AG se puede analizar en la Fig. 5. Donde se presenta la curva de convergencia del AG logrando observar la evolución de las soluciones y encontrando estabilidad en un valor fitness menor al  $4 \times 10^{-5}$  cerca de la generación 70, a pesar de la baja velocidad de convergencia esta metodología alcanza resultados lo suficientemente cercanos a los valores guía, tomando en cuenta la ausencia de ensayo clásicos.

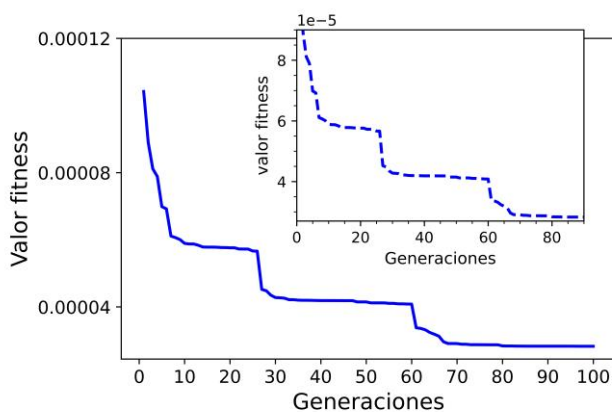


Fig. 5. Curva de convergencia del AG (media de 20 ejecuciones) para el transformador 15 kVA.

Caso de estudio 2: Transformador monofásico 2 kVA, 220/110 V, 50 Hz. Se realizan 20 ejecuciones y se utilizan las dos funciones objetivo Ec. (12) y Ec. (13) con los siguientes parámetros de control del AG:

- Población de 100 individuos.
- Número de generaciones 100.
- Probabilidad de cruce 0.6.
- Probabilidad de mutación 0.001.
- Potencia de entrada 1934.02 W \*.
- Potencia de salida 1808.61 W \*.

\*Valores obtenidos mediante simulación Matlab/Simulink.

Los límites asignados a los parámetros del CET se muestran en la Tabla V.

De manera similar al caso de estudio 1, la Tabla VI muestra los parámetros estimados del transformador del promedio de las 20 ejecuciones. Así como, la desviación de los parámetros de acuerdo con el porcentaje de error para los seis parámetros del CET  $R_1, X_1, R_2', X_2', R_c, X_m$  con respecto a los valores guía de [4].

Con las estimaciones de la Tabla VI se calcula el error promedio siendo 12.39 %. Si bien el porcentaje de error en cada variable es amplio con respecto a los valores guía, la efectividad del AG es validada mediante la comparación de las estimaciones realizadas con los algoritmos propuestos en [4].

Utilizando los parámetros estimados del transformador de la Tabla VI se realiza el cálculo de la tensión del secundario  $V_2$ , la corriente del primario  $I_1$ , la corriente del secundario  $I_2$  y la pérdida sin carga  $P_{\text{sin carga}}$ , para ser verificados con los valores correspondientes obtenidos de los ensayos de circuito abierto y cortocircuito de [4]. Los resultados de  $V_2, I_1, I_2$  y  $P_{\text{sin carga}}$  se muestran en Tabla VII con su respectivo porcentaje de error y error promedio.

TABLA V. LÍMITES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS PARÁMETROS DEL CET.

$R_1^{\min}$ [ $\Omega$ ]	0.1	$R_1^{\max}$ [ $\Omega$ ]	5.0
$X_1^{\min}$ [ $\Omega$ ]	0.0	$X_1^{\max}$ [ $\Omega$ ]	0.7
$R_2'^{\min}$ [ $\Omega$ ]	0.1	$R_2'^{\max}$ [ $\Omega$ ]	5.0
$X_2'^{\min}$ [ $\Omega$ ]	0.0	$X_2'^{\max}$ [ $\Omega$ ]	0.7
$R_c^{\min}$ [ $\Omega$ ]	2100	$R_c^{\max}$ [ $\Omega$ ]	4000
$X_m^{\min}$ [ $\Omega$ ]	210	$X_m^{\max}$ [ $\Omega$ ]	400

TABLA VI. PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR DE 2 kVA (PROMEDIO DE 20 EJECUCIONES) CON J\*.

Parámetros	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_1$ [ $\Omega$ ]	$R_2'$ [ $\Omega$ ]	$X_2'$ [ $\Omega$ ]	$R_c$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]
*Guía	0.596	0.377	0.596	0.377	2494.8	235.8
AG	0.584	0.407	0.565	0.569	2289.8	236.1
Error (%)	2.06	7.91	5.13	50.89	8.21	0.11

**TABLA VII.** CORRIENTES, VOLTAJE Y EFICIENCIA ESTIMADOS DEL TRANSFORMADOR DE 2 kVA (PROMEDIO DE 20 EJECUCIONES).

Parámetros	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$V_2$ [V]	$P_{sin\ carga}$ [W]	Error Promedio
*Guía	8.95	17.55	105.5	18.6	-----
AG	8.87	17.42	104.70	22.17	-----
Error (%)	0.87	0.76	0.76	19.21	5.4

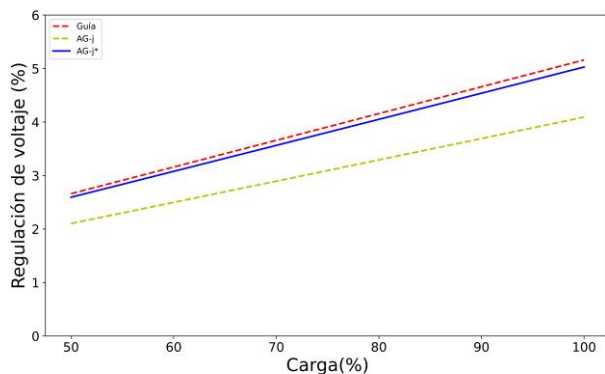
Para verificar los parámetros estimados del transformador monofásico de 2 kVA, la **Tabla VIII** muestra la variación del voltaje secundario referido y la regulación de voltaje variando la carga entre 50% a 100% en incrementos de 10%, utilizando los parámetros guía de [4] y los parámetros estimados con la función objetivo (Ver **Ec. (13)**).

En la **Fig. 6** se muestran las desviaciones existentes entre la regulación de voltaje guía, la regulación de voltaje mediante la función objetivo (**Ec. (12)**) y la regulación de voltaje mediante la función objetivo (**Ec. (13)**). Donde se aprecia la incorporación de la potencia de entrada y la potencia de salida, proporcionando una mejor estimación de los parámetros del CET.

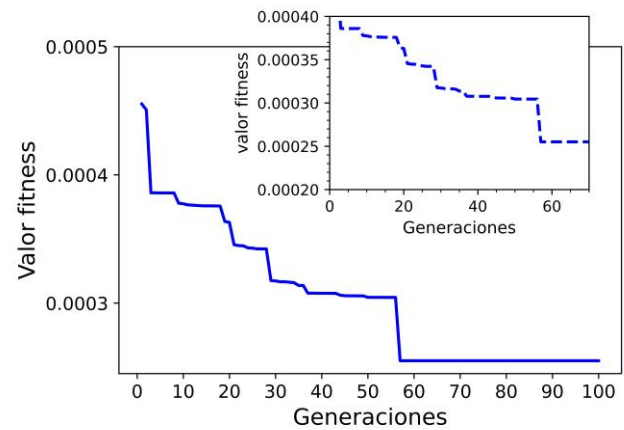
La curva convergencia del caso de estudio 2 se muestra en la **Fig. 7**. Donde se observa al igual que en la **Fig. 5**, que el valor mínimo debe ser decreciente y asintótico al valor óptimo final. La estabilidad en este caso de estudio se acerca alrededor de la generación 60.

**TABLA VIII.** VOLTAJE SECUNDARIO REFERIDO AL PRIMARIO Y REGULACIÓN DE VOLTAJE VARIANDO LA CARGA DEL TRANSFORMADOR DE 2 kVA.

Carga [%]	$V'_{2Guía}$ [V]	$V'_{2est}$ [V]	$RV_{Guía}$ [%]	$RV_{est}$ [%]
50	214.29	214.44	2.6613	2.5946
60	213.26	213.43	3.1595	3.0786
70	212.23	212.43	3.6586	3.5640
80	211.21	211.43	4.1586	4.0510
90	210.20	210.45	4.6595	4.5393
100	209.20	209.47	5.1612	5.0292



**Fig. 6.** Regulación de voltaje variando la carga del transformador de 2 kVA.



**Fig. 7.** Curva de convergencia del AG (media de 20 ejecuciones) para el transformador 2 kVA.

La **Tabla IX** muestra la comparativa entre las estimaciones realizadas con algoritmos de optimización propuestos en [4], mostrando que AG tiene un mejor desempeño en la estimación de los parámetros del CET. De acuerdo con el cálculo del error promedio, calculado con los seis errores absolutos de cada parámetro estimado. Para el enfoque de optimización caótica (COA) 24.14%, el algoritmo de optimización de forrajeo de mantarrayas (MRFO) 23.90% y el algoritmo de estimación basado en MRFO caótico (CMRFO) 34.86% mientras que AG 12.39%.

#### IV. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación del AG desarrollado se logra con éxito la estimación de los parámetros del transformador, justificando su desempeño al mostrar una baja desviación en comparación con los parámetros que se obtuvieron de los ensayos clásicos de circuito abierto y cortocircuito. También, la comparativa con las estimaciones del CET con otros algoritmos evolutivos, muestra una mejor caracterización del CET brindando confianza y estabilidad en las estimaciones obtenidas.

**TABLA IX.** PARÁMETROS ESTIMADOS PARA TRANSFORMADOR DE 2kVA.

Parámetros	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_1$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\Omega$ ]	$X_2$ [ $\Omega$ ]	$R_c$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]
*Guía	0.596	0.377	0.596	0.377	2494.8	235.8
COA	0.432	0.220	0.416	0.492	2149.8	238.6
COA error (%)	27.56	41.56	30.10	30.64	13.82	1.17
MRFO	0.529	0.153	0.295	0.305	2559.9	233.9
MRFO error (%)	11.18	59.25	50.47	19.08	2.60	0.80
CMRFO	0.699	0.100	0.119	0.509	2556.1	233.4
CMRFO error (%)	17.33	73.48	79.91	35.02	2.45	1.00
AG J*	0.584	0.407	0.565	0.569	2289.8	236.1
AG J* Error (%)	2.06	7.91	5.13	50.89	8.21	0.11

Para trabajos futuros se recomienda la aplicación de los parámetros inherentes del funcionamiento del transformador tales como las pérdidas sin carga y la relación reactancia resistencia predominantemente inductiva en transformadores para implementar restricciones que ayuden a descartar un gran número de soluciones locales, siendo que, lo que se busca es un óptimo global que tenga la menor desviación a los parámetros reales. Asimismo, contribuirá a una mayor convergencia de los algoritmos evolutivos.

## REFERENCIAS

- [1] L. Strezoski, H. Padullaparti, F. Ding and M. Baggu, "Integration of Utility Distributed Energy Resource Management System and Aggregators for Evolving Distribution System Operators," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 277-285, March 2022, doi: 10.35833/MPCE.2021.000667.
- [2] A. Iliias, K.J. Mou, A.H.A. Bakar, Estimation of transformer parameters from nameplate data by imperialist competitive and gravitational search algorithms, *Swarm and Evolutionary Computation*, Volume 36, 2017.
- [3] M. Mossad, M. Azab, A. Abu-Siada, Transformer parameters estimation from nameplate data using evolutionary programming techniques, *IEEE Trans. Power Deliv.* 29 (2014) 2118–2123.
- [4] M. P. Calasan, A. Jovanović, V. Rubežić, D. Mujčić and A. Deriszadeh, "Notes on Parameter Estimation for Single-Phase Transformer," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3710-3718, July-Aug. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2992667.
- [5] Thilagar, S.H.; Rao, G.S. Parameter Estimation of Three-Winding Transformer Using Genetic Algorithm. *Eng. Appl. Art. Intell.* 2introduc002, 15, 429–437.
- [6] Bhowmick, D.; Manna, M.; Chowdhury, S.K. Estimation of equivalent circuit parameters of transformer and induction motor using PSO. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Trivandrum, India, 14–17 December 2016.
- [7] M. I. Abdelwanis, A. Abaza, R. A. El-Sheimy, M. N. Ibrahim and H. Rezk, "Parameter Estimation of Electric Power Transformers Using Coyote Optimization Algorithm With Experimental Verification," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50036-50044, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978398.
- [8] H. Youssef, M. H. Hassan, S. Kamel and S. K. Elsayed, "Parameter Estimation of Single Phase Transformer Using Jellyfish Search Optimizer Algorithm," *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAACCA51523.2021.9465279.
- [9] "IEEE Guide for Transformer Loss Measurement," in *IEEE Std C57.123-2019 (Revision of IEEE Std C57.123-2010)*, 10 Feb. 2020, pp. 1-55.
- [10] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. *Transformer Engineering—Design and Practice*; Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2004.
- [11] McQuarrie, Donald A.. (2003). *Mathematical Methods for Scientists and Engineers - 22.1 Estimation of Parameters*. University Science Books Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4L1O1/mathematical-methods/estimation-parameters>.
- [12] Palma, J., & Marín, R. (2008). *Inteligencia Artificial: Técnicas, Métodos y Aplicaciones*. pp. 433-456. España: McGraw - Hill.
- [13] K. Deb and H. Beyer, "Self-Adaptive Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover," in *Evolutionary Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 197-221, June 2001, doi: 10.1162/106365601750190406.

- [14] T. Bäck and H. Schwefel, "An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization," in *Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 1-23, March 1993, doi: 10.1162/evco.1993.1.1.1.
- [15] Radosavljević, Jordan. (2018). *Metaheuristic Optimization in Power Engineering - 2.9 GA Control Parameters*. (pp. 40,50). Institution of Engineering and Technology. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011MADT3/metaheuristic-optimization/ga-control-parameters>.

## BIOGRAFÍAS



**LUIS FELIPE TORRES PÉREZ** Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco. Actualmente se desarrolla como Ingeniero de Proyectos de Media y Baja Tensión. Sus áreas de interés corresponden a eficiencia energética y automatización. Sus intereses de investigación son computo evolutivo, diagnóstico de transformadores y líneas de transmisión.



**JUAN CARLOS OLIVARES GALVÁN** Obtuvo el Doctorado en el CINVESTAV, Campus Guadalajara en el 2003. Fue estudiante visitante en Virginia Tech, Blacks-burg, Estados Unidos en 1999 (12 meses) y profesor visitante en la University of Alberta, Edmonton, Al-berta, Canadá en 2014 (12 meses). Trabajó durante ocho años en la fabricación de transformadores de distribución como ingeniero de diseño. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en la UAM-Azcapotzalco y Senior Member del IEEE. Sus intereses principales de investigación están relacionados con métodos numéricos y experimentales en dispositivos electromagnéticos para mejorar su diseño, fabricación, mantenimiento y diagnóstico.



mercados eléctricos.

**HÉCTOR ASCENCIÓN MESTIZA** Egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana, en Ingeniería Eléctrica en 2015. En 2019 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Actualmente, se encuentra estudiando el Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia. Sus intereses principales son aspectos de computación evolutiva para diseño de dispositivos electromagnéticos,



**DAVID GRANADOS LIEBERMAN** Obtuvo el grado de Ingeniero y Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, posteriormente obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato en la Maestría en Ingeniería Eléctrica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI, nivel 2) y Senior Member IEEE. Sus áreas de interés son el procesamiento digital de señales, análisis de la calidad de la energía, redes eléctricas inteligentes y diagnóstico de máquinas y sistemas eléctricos.