



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**PARAMETER ESTIMATION METHODOLOGY IN
ELECTRICAL DEVICES WITH ITERATIVE
SIMULATION PROCESSES USING GENETIC
ALGORITHMS**

Johan Lisandro Castiblanco Pasuy

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería eléctrica, electrónica y computación

Manizales, Colombia

2021

METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS CON PROCESOS ITERATIVOS DE SIMULACIÓN USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Autor:
Johan Lisandro Castiblanco Pasuy

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería-Ingeniería Eléctrica

Director :
Ph.D. Armando Jaime Ustariz
Codirector :
Ph.D. Andres Felipe Guerrero Guerrero

Línea de Investigación en modelado y simulación de electrónica de potencia
Grupo de Investigación en Calidad de la Energía y Electrónica de Potencia “GICEP”

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería eléctrica, electrónica y computación
Manizales, Colombia

2021

A Dios.

A mi ciudad, país, el mundo y la humanidad .

A mis padres Yolanda y Lisandro.

A Sergio y Vanessa Arias.

"La sencillez es una gran virtud, pero requiere mucho trabajo para lograrla y educación para apreciarla. Y para empeorar las cosas: la complejidad la venden mejor".

- Edsger Wybe Dijkstra.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Armando y Andres por su constante apoyo y paciencia en todas las facetas y adversidades de este proceso. Profundos agradecimientos por sus recomendaciones, asesorías acertadas y el tiempo invertido para mi formación.

A todos los integrantes de los grupos de investigación GICEP y GRED&P, especialmente a Andres Felipe Guerrero, Carlos David Rojas , Ana Isabel Narvaez por su acompañamiento, apoyo y charlas amenas de profundo pensamiento en las diferentes etapas de este trabajo.

Agradezco especialmente a mi familia, quienes me han brindado su apoyo en todo momento. A Vanessa Arias Arias, por siempre estar presente cada vez que la necesite, dando siempre un enorme pensamiento positivo. A mis padres, quienes siempre estuvieron apoyándome en todo el proceso de desarrollo de este trabajo, dando siempre grandes consejos.

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales principalmente al laboratorio de electricidad y electrónica con todos sus miembros, especialmente al profesor Julio Cesar García y el ingeniero Sebastián Orjuela por permite cursar con apoyo y enseñanzas durante esta etapa de la vida. Por último, agradezco la importante gestión y colaboración de la coordinación de posgrado con Leidy.

RESUMEN

La tesis se presenta como una metodología para realizar estimación de parámetros de dispositivos eléctricos por medio de simuladores electrónicos. Se aborda una alternativa a los problemas de manipulación de parámetros precisamente en la estimación de parámetros de modelo circuital de cargas eléctricas. De esa forma se propone una metodología que utiliza técnicas de inteligencia artificial como los algoritmos genéticos para validar modelos propuestos de softwares de simulación eléctrica. Así se encuentra una alternativa a la típica estimación de parámetros basada en funciones objetivo realizada sobre ecuaciones matemáticas de todo el sistema.

Se realiza una contextualización respecto a la temática de estimación y el funcionamiento de las herramientas de simulación temporal de dispositivos eléctricos. Se presentan la elección de software, selección de herramientas, estructura de la metodología, su funcionamiento y el trabajo conjunto de estas para llevar a cabo la estimación.

El software de simulación base es LTspice con uso del motor Spice para manipular parámetros eléctricos por medio de arreglo Netlist matricial. Se utiliza algoritmos genéticos y se presenta la función objetivo general para realizar la estimación en distintos escenarios. Se expone una manera de adquisición de señales para agrupar las señales por medio del dispositivo Analog Discovery 2 y se ejecuta todo el código principal de la metodología haciendo uso del lenguaje de programación Python. Finalmente, se valida la herramienta con 3 escenarios de estimación de dispositivos del área de ingeniería eléctrica haciendo estimación de parámetros de un transformador, un módulo fotovoltaico y una lampara fluorescente (CFL).

La metodología agilizará el proceso involucrado para llevar estimación de parámetros a partir de datos adquiridos. Adicionalmente, brinda un método versátil para que los ingenieros, haciendo uso de conocimiento de simulación, realicen caracterización de los dispositivos eléctricos que necesiten de manera rápida sin modelamientos matemáticos- analíticos extensos y complejos.

Palabras clave: (Estimación, optimización, variabilidad, Netlist, algoritmo genético G.A, CFL, PV, transformador).

ABSTRACT

The Thesis is presented as a methodology to do parameter estimation of electric devices using electronic simulators. It approaches an alternative to problem of manipulation parameters in the parameter estimation of circuitual models of electric loads. Is proposed a methodology that use artificial intelligent techniques like genetic algorithm to validate model proposed of electrical simulation software's. In that way is founded and alternative to the typic techniques of parameter estimation bases of objective functions made it over mathematical equations of all the system.

Is realized a contextualization about estimation topics, and the operation of simulation software tools focus on electrical devices in time analysis. Is presented the software choices, tools selection, structure of the methodology, its functioning, and the work in group of them to carry out the estimation.

The base software for simulation is LTspice using the Spice motor to manipulate electrical parameters via Netlist matrixial configuration. Is used genetic algorithms and is presented the general objective function to make signals comparison to realize the estimation. Is exposed way to do signal acquisition to a group the signals via Analog Discovery device and it is executed all the principal code of methodology making use of Python programming language. Finally, is validated the tool with 3 scenarios of devices estimation in the electrical engineer area doing estimation of parameters of a transformer, photovoltaic module, and compact fluorescent lamp.

The methodology shall agile the involved process to do parameter estimation bases on acquired data. Give a versatile method for engineers, that making use of simulation knowledge, they should realize electrical device characterization that can need in a fast way without making complex and large mathematical-analytic models.

Keywords: (Estimation, optimization, variability, Netlist, genetic algorithm, CFL, PV, transformer).

CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 MOTIVACIÓN E INTERÉS POR EL TEMA.....	14
1.3 OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO.....	15
1.4 ESTADO DEL ARTE.....	16
1.5 APORTES.....	17
1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	18
CAPÍTULO 2	20
MARCO TEÓRICO	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS	21
2.1.1 <i>Estimación en ingeniería eléctrica</i>	22
2.1.2 <i>Estimación en modelamiento y diseño de circuitos</i>	23
2.1.3 <i>Estimación-Optimización</i>	24
2.2 TÉCNICA DE ESTIMACIÓN	26
2.2.1 <i>Algoritmos Genéticos</i>	26
2.2.2 <i>Operadores genéticos</i>	29
2.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL TRABAJO	33
2.4 SÍNTEISIS	35
CAPÍTULO 3	36
3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS	37
3.1 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN CON FLUJOS ITERATIVOS DE SIMULACIÓN CISE ..	37
3.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN IMPLEMENTADA EN PYTHON-LTSPICE.....	40
3.2.1 <i>Proceso de adquisición de datos</i>	42
3.2.2 <i>Proceso de simulación en LTspice</i>	43
3.2.3 <i>Proceso de control y procesamiento de señales en Python</i>	45
3.3 SÍNTEISIS	50
CAPÍTULO 4	51
EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA	51
4. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS Y RESULTADOS	52
4.1 ESCENARIO TRANSFORMADOR	53
4.1.1 <i>Modelo circuital</i>	54
4.1.2 <i>Datos</i>	55

4.1.3	Implementación de la metodología.....	57
4.1.4	Resultados	61
4.2	ESCENARIO FOTOVOLTAICO.....	63
4.2.1	Modelo circuital	64
4.2.2	Datos	66
4.2.3	Implementación de la metodología.....	67
4.2.4	Resultados	70
4.3	ESCENARIO CFL.....	73
4.3.1	Modelo circuital	73
4.3.2	Datos	75
4.3.3	Implementación de la metodología.....	77
4.3.4	Resultados	79
4.4	SÍNTESIS.....	82
CAPÍTULO 5.....		83
CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....		83
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
5.1	CONCLUSIONES GENERALES.....	84
5.2	CONTRIBUCIONES GENERALES	85
5.3	RECOMENDACIONES.....	86
5.4	FUTUROS TRABAJOS	87
5.5	DISCUSIÓN ACADÉMICA	88
BIBLIOGRAFÍA.....		89
ANEXO I.....		95
I.	MANUAL Y GESTIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	95
I.1	MANUAL DE UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	95
PYTHON-LTSPICE-GA-ESTIMACIÓN		95
CONOCIMIENTOS PREVIOS RECOMENDADOS.....		95
INSTALACIÓN		95
1)	Modelo de señales adquiridas.....	96
2)	Clase de preprocesamiento para simulación.....	97
3)	Método de algoritmo genético(G.A).....	97
AUTORES Y RECONOCIMIENTO.....		98
LICENCIA.....		98
I.2	NETLIST DE ESCENARIOS DE LTSPICE	99
II.2.1	Netlist de LTspice de escenario de Transformador	99
II.2.2	Netlist de LTspice de escenario de modulo fotovoltaico.....	100
II.2.3	Netlist de LTspice de escenario CFL.....	100
ANEXO II		101
II.	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS.....	101
II.1	SELECCIÓN DE HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	101
II.1.1	Simuladores eléctricos de circuitos	101
II.1.2	Herramienta de Simulación LTspice	104

II.2 SELECCIÓN HERRAMIENTA DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES-ALGORITMO	105
<i>Herramienta de programación Python</i>	105
II.3 SELECCIÓN DE HERRAMIENTA PARA EXTRACCIÓN DE DATOS	105
II.3.1 <i>Analog Discovery 2</i>	106
II.3.2 <i>Waveforms</i>	106
ANEXO III	107
III: ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EN ESCENARIO CFL	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Formas de abordar estimación de parámetros en el estado del arte.	16
Figura 2 Diagrama de metodología implementada de estimación de parámetros basada en simulaciones iterativas.	18
Figura 3. Técnicas de estimación utilizadas en dispositivos eléctricos.	25
Figura 4. Diagrama de flujo G.A.	28
Figura 5. Etapa de codificación y creación población del GA.	30
Figura 6. Elitismo en G.A.	31
Figura 7. Cruzamiento en G.A.	31
Figura 8. Mutación en G.A.	32
Figura 9. Criterio de parada en G.A.	32
Figura 10. Decodificación y solución del G.A.	32
Figura 11. Gráfico de herramientas específicas de la metodología de trabajo implementada. .	34
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología propuesta de estimación de parámetros.	38
Figura 13. Diagrama de implementación de la metodología utilizado Python -LTspice.	41
Figura 14. Conexión entre Analog Discovery y PC.	42
Figura 15. Configuración típica de un Netlist en Spice.	44
Figura 16. Conexión centro de control con LTspice.	46
Figura 17. Comparación paso de tiempo LTspice y medidas.	47
Figura 18. Topología circuito eléctrico de transformador.	54
Figura 19. Modelo de simulación de transformador en LTspice.	56
Figura 20. Señales simuladas y con ruido inyectado de escenario de transformador.	57
Figura 21. Convergencia de parámetros de escenario de transformador.	61
Figura 22. Topología de circuito eléctrico de módulo fotovoltaico.	64
Figura 23. Curva V-I de medidas del módulo Leibold solar (STE 4/100) [73].	67
Figura 24. Modelo de simulación de módulo fotovoltaico en LTspice.	68
Figura 25. Convergencia de parámetros de escenario módulo fotovoltaico.	71
Figura 26. Curvas V-I de medidas, simulación de parámetros estado del arte [73] y simulación parámetros de la metodología propuesta.	72
Figura 27. Topología de circuito eléctrico de carga CFL.	74
Figura 28. Adquisición de datos experimentales de carga CFL. A-) Esquema De adquisición. B-) Imagen del módulo de adquisición de luminaria de laboratorio GREdYp.	75
Figura 29. Formas de onda de tensión y corriente adquiridas de bombilla CFL Stark.	76
Figura 30. Modelo de simulación de bombilla CFL en LTspice.	77
Figura 31. Convergencia de parámetros de escenario carga CFL.	80
Figura 32. Formas de ondas de tensión y corriente de medidas y modelo de simulación propuesto de bombilla CFL Stark.	81

Figura 33. Diagrama de utilización de script principal para realizar estimación por simulaciones iterativas.....	96
Figura 34. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso transformador.....	99
Figura 35. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso módulo fotovoltaico.....	100
Figura 36. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso CFL.....	100
Figura 37. Relación de estimación de parámetros CFL respecto a muestro de tensión.	108
Figura 38. Grafica de función de estimación parámetro $R(V)$ de carga CFL con grafica de estimación de la metodología.....	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Equivalencia G.A-entorno biológico.....	27
Tabla 2. Equivalencia de parámetros entre topología y modelo simulación de transformador.....	58
Tabla 3. Rango de trabajo de parámetros de transformador en el G.A.....	60
Tabla 4. Sintonización de operadores genéticos en escenario de transformador.....	60
Tabla 5. Comparación de resultados de escenario de transformador.....	62
Tabla 6. Métricas de comparación calculadas sobre señales de la funciones fitness de escenario de transformador.....	63
Tabla 7. Equivalencia de parámetros entre topología y modelo simulación de modulo fotovoltaico.....	68
Tabla 8. Rango de trabajo de parámetros de modulo fotovoltaico en el G.A.....	70
Tabla 9. Sintonización de operadores genéticos en escenario de modulo fotovoltaico.....	70
Tabla 10. Equivalencia de parámetros entre topología y modelo simulación de carga CFL.....	78
Tabla 11. Rango de trabajo de parámetros de carga CFL en el G.A.....	79
Tabla 12. Sintonización de operadores genéticos en escenario de carga CFL.....	79
Tabla 13. Métricas de comparación calculadas sobre señales de la funciones de error [65] con la solución de la metodología.....	82
Tabla 14. Comparación de simuladores eléctricos de uso en ingeniería eléctrica.....	103
Tabla 15. Registro de convergencia de parámetros CFL en con muestreo de tensión de 5v.....	107

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta una descripción de los elementos componentes del trabajo como la identificación de problema, la motivación del trabajo, el interés, la importancia en el campo de desarrollo, la contextualización del trabajo en el estado del arte y una pequeña presentación del aporte de este. Finalmente, se describe la composición para el desarrollo de este trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la evolución de la computación y la tecnología ha tenido un significativo impacto en las distintas ramas que estudia el ser humano. Tal es el caso de la ingeniería específicamente la ingeniería eléctrica donde el uso de software ha permitido mejorar y entender las distintas soluciones que se han implementado en Colombia [1],[2]. En ese sentido, a lo largo de la historia el país se ha caracterizado por la importación de dispositivos y distintos modelos para su implementación con el fin de satisfacer las necesidades del país en el sector eléctrico [3]. No obstante, el uso de estos ha generado una notable necesidad respecto a su implementación en los diferentes modelos de la red existentes. De ahí es pertinente el uso de las últimas tecnologías y softwares para el modelamiento de los distintos dispositivos convencionales para manipular sus parámetros y así utilizarlos con propósitos específicos por los ingenieros. Cabe añadir que como en Colombia distintos sistemas de generación de energía alternativa han tenido su llegada; estos tipos de generación conocidos como no convencionales han traído consigo nuevos modelos, topologías y específicamente dispositivos eléctricos que tienen la necesidad de ser modelados para su inclusión posterior en diseños relacionados con la ingeniería eléctrica [4],[5].

1.1 Identificación del problema

Los modelos de cargas o dispositivos eléctricos en estimación se han utilizado con distintos fines. Estos modelos están basados en parámetros que responden a su comportamiento con medidas físicas. La manipulación de parámetros se ha utilizado para controlar dispositivos eléctricos desde que se iniciaron a utilizar sus modelos en simulación [6]. El uso de ecuaciones matemáticas ha sido un común denominador a la hora de modelar, utilizar o analizar estos dispositivos eléctricos [7]. Lo anterior no implica obviar el análisis que conlleva un estudio meticuloso y un tiempo necesario a la hora de desglosar estos modelos eléctricos.

Por otra parte, distintos softwares de simulación de circuitos eléctricos y softwares de procesamiento de señales han tenido un fuerte desarrollo en los últimos años. Destacando el uso de lenguajes de programación [8] que cada día se usan más tanto para la investigación con el uso de datos como con el procesamiento de señales y toda su fundamentación matemática [9].

En consecuencia, son varios los interrogantes al respecto de la manera de interactuar con los modelos existentes de típicas cargas eléctricas, como también el uso de sus variables para manipularlos según el fin deseado en Ingeniería, tales como:(a) Cómo interactuar parámetros de modelos eléctricos de simulación con lenguajes de procesamiento de señales (b) Cómo se pueden emplear técnicas de optimización o estimación usando variables de entrada y salida según medidas para validar con software.

Todo esto trae consigo implicaciones a la hora de realizar estimaciones basadas totalmente en ecuaciones en donde se hace un modelado matemático, pero que a la hora de llevar la simulación presente variaciones o no corresponda al mismo. Lo que genera nuevas restricciones o ecuaciones de ajuste para volver a modelar analíticamente y verificar hasta encontrar un modelo de simulación aceptable con correspondencia entre modelo analítico y simulado. Además, la precisión de este tipo de estimación basada en ecuaciones se limita al modelo matemático según su rendimiento matemático y método de optimización analítico implementado[10]. Lo que puede conllevar a problemas de precisión de diseño de sistemas o errores en rendimientos de simulación y posteriormente en la práctica de circuitos de sistemas de control, electrónica de potencia, entre otros. En contraste, al usar procesos de simulación como método, el resultado del proceso de estimación obtiene consigo la validación del resultado en simulación, cumpliendo con estas dos características simulación en el mismo proceso.

1.2 Motivación e interés por el tema

Diversos procesos que necesitan conocer las cargas en Ingeniería eléctrica y analizar los dispositivos que se utilizan en la vida diaria o por el ser humano han sido trabajados desde la perspectiva de la Ingeniería eléctrica [11]. La optimización de variables y precisamente la estimación juega un papel importante para modelar estos dispositivos que son usados cotidianamente y hacen parte del diario vivir para el ser humano al estar relacionado con el consumo y uso de la energía eléctrica. Esto ha conllevado a variadas técnicas de estimación y optimización ser utilizadas para poder cubrir las necesidades de las cargas o dispositivos relacionados con la energía eléctrica. La motivación de este trabajo nace en el desarrollo de la caracterización y optimización de la topología propuesta por Guerrero para sintonizar parámetros de una red Snubber [12]. Estos problemas comúnmente se abordan con direccionamiento matemático y se comprueba rápidamente en entorno de simulación, no

obstante, se genera la pregunta si es necesario realizar el modelo matemático cada vez que se desee estimar parámetros de una nueva carga conociendo que se confrontar con resultados de simulación y luego con resultados medidas experimentales. En ese sentido este trabajo de grado busca la manera de evita el paso de modelado matemático para confrontar una estimación directamente sobre resultados de simulación haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial en el área de estimación. Esta propuesta de investigación pretende abordar la mejor manera o una metodología para manipular los parámetros de los típicos modelos existentes de dispositivos eléctricos y los nuevos futuros modelos que puedan utilizarse. En ese sentido, la propuesta desarrolla una metodología para implementar una herramienta que permita estimación de parámetros por medio de simulaciones iterativas ajustándose a una métrica y convergencia controlada por un algoritmo genético.

Para dar respuesta a esta alternativa se plantean los siguientes objetivos.

1.3 Objetivos del presente trabajo

Este trabajo aborda las discusiones respecto a la forma en que generalmente se utilizan técnicas de optimización en estimación para manipulación de parámetros en modelos de dispositivos eléctricos. De esa manera, se expone una metodología como alternativa en la que se manifiesta cómo realizar estimación de parámetros con análisis computacional para diversos modelos existentes de dispositivos eléctricos.

Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología que permita estimar parámetros de modelos de dispositivos eléctricos mediante simulaciones iterativas controladas por una técnica de estimación en software de procesamiento computacional.

Objetivos específicos

1. Implementar una herramienta que permita integrar el núcleo de un software de simulación en un proceso de estimación de parámetros.
2. Proponer una función objetivo generalizada que permita estimar parámetros de dispositivos eléctricos minimizando el error entre señales experimentales y simuladas.
3. Validar la eficiencia de la herramienta de procesamiento computacional en diferentes escenarios con distinta naturaleza de datos recolectados.

1.4 Estado del arte

Los problemas de estimación de parámetros de dispositivos eléctricos en el estado del arte normalmente se abordan a través de modelos matemáticos. Estos modelos permiten describir el comportamiento del dispositivo para así poder encontrar su equivalente. De esa forma se aplican técnicas de optimización a estas ecuaciones matemáticas con el fin de encontrar la equivalencia del modelo matemático con unas medidas dadas experimentalmente [13],[14],[15]. Luego de eso los parámetros resultados de ese proceso de modelado matemático son validados haciendo uso de software de simulación. De esa forma se utilizan estos parámetros y se encuentra un rendimiento de simulación dada la estimación realizada matemáticamente.

Por último, se mide la eficiencia de esta estimación. Para ello se contrastan tanto del modelo matemático como del modelo simulación con las medidas experimentales tomadas del equipo físico para así encontrar la validez del proceso de estimación [6].

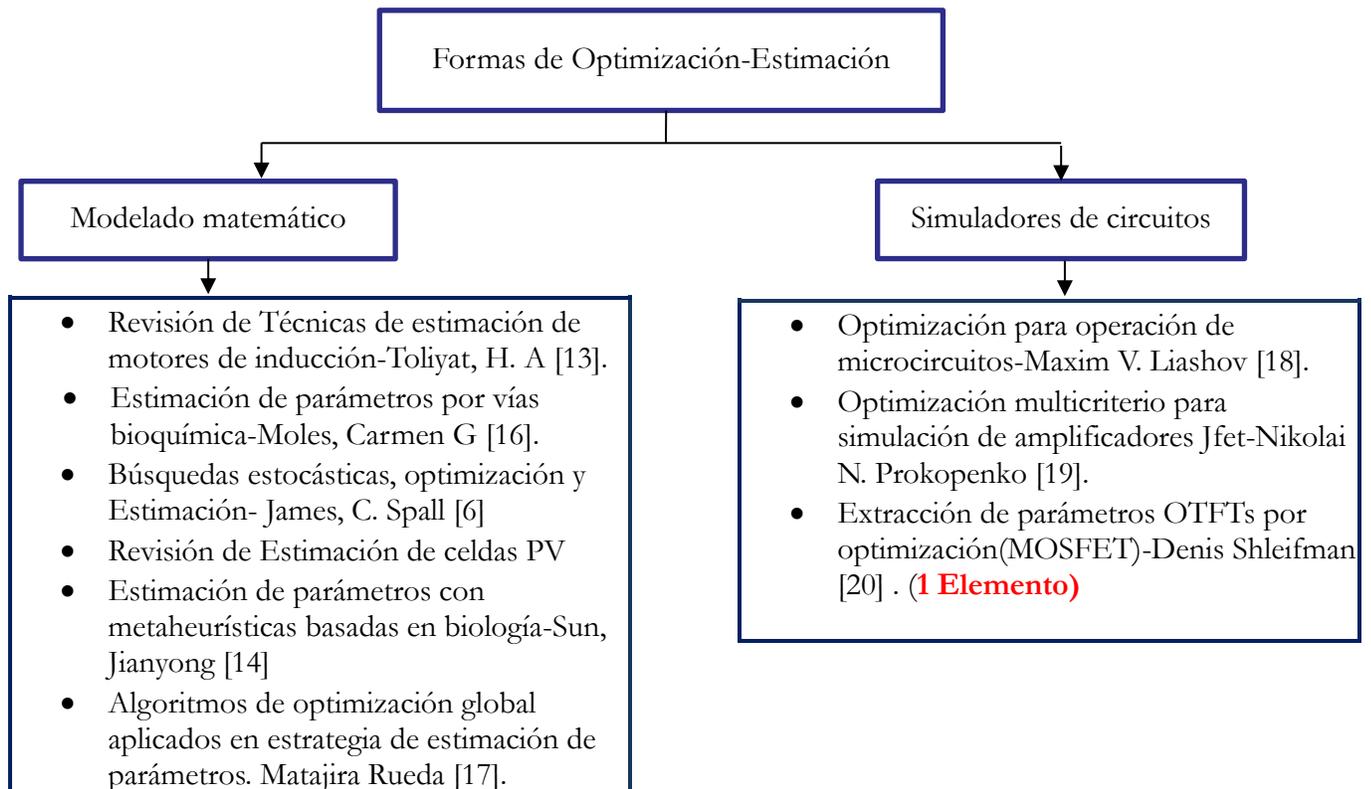


Figura 1. Formas de abordar estimación de parámetros en el estado del arte.

Este típico proceso de estimación de parámetros de dispositivos eléctricos ha tenido buen acierto, aunque conlleva de ciertas desventajas para la generalización de estimación de dispositivos. Esto debido a que particulariza el proceso para cada dispositivo en donde se tiene que plantear una fuerte inversión analítica en el proceso de modelado matemático del dispositivo para luego aplicarle una técnica de optimización y posteriormente acondicionar estos modelos matemáticos para llevarlos a softwares de simulación y validar.

Este trabajo presenta una alternativa para la típica estimación de parámetros de circuitos eléctricos basados en la optimización de ecuaciones matemáticas, en ese caso haciendo uso de simulaciones iterativas. En el estado de arte se han utilizado simuladores, pero enfocados en criterios de optimización [19] o caracterización de elementos particulares. Es el caso de optimizar las variables de un solo elemento como un transistor MOSFET propuesto por Denis Shleifman [20]. De esa forma este trabajo extrapola el uso de simuladores al emplearlo en procesos de estimación de un circuito completo que represente un dispositivo eléctrico. Para ello se expone una metodología que permita realizar el proceso de estimación optimizando una métrica de comparación de modelos de simulación y medidas experimentales directamente.

1.5 Aportes

Este trabajo presenta los siguientes aportes:

- A) Se desarrolla un nuevo enfoque para realizar estimación de parámetros de dispositivos eléctricos basado en simulaciones iterativas. De esa manera se expone una metodología que realiza todo el proceso de estimación de parámetros basado en el rendimiento de simuladores eléctricos, en contraste con el estado del arte que evidencia estimación basada en modelos matemáticos [13],[14],[15] o que usan optimización por medio de simuladores con objetivo de un solo elemento en particular [20]. La metodología interconecta técnicas de estimación en un lenguaje de programación (Python) con un programa de simulación (LTspice). La estimación se basa en simulaciones iterativas que se comparan con una entrada o medidas hasta hallar los parámetros de salida, como se muestra en la Figura 2.

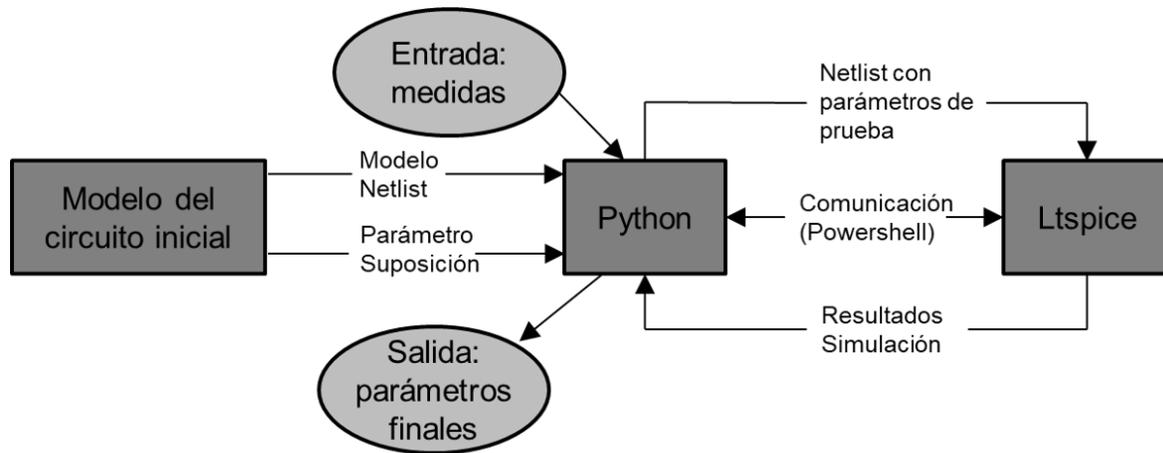


Figura 2 Diagrama de metodología implementada de estimación de parámetros basada en simulaciones iterativas.

- B) Se propone una función multiobjetivo basada en señales de caracterización que se utiliza para estimar parámetros no solo en un dispositivo eléctrico particular, sino en distintos dispositivos eléctricos. En este trabajo se valida la metodología con la estimación de un transformador monofásico, un módulo fotovoltaico y una bombilla CFL residencial.
- C) Se desarrolla todo el código fuente de la metodología desarrollada en Python con su respectiva API entre Python y LTspice. Finalmente, se comparte la herramienta en el repositorio GitHub [21] de código abierto para uso general, sin restricción para el desarrollo y utilización de la comunidad.

1.6 Estructura del documento

Este trabajo se ha dividido en 5 capítulos, donde el primero corresponde a esta introducción. A continuación, se realiza una breve descripción del contenido de cada uno de ellos.

El Capítulo 1 presenta la introducción general de este trabajo final de maestría, exponiendo la forma en que se desarrolla el trabajo, identificando el problema y el interés que justifican este documento, los objetivos y la disposición del trabajo.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión del estado del arte de la temática relacionada con estimación de modelos que representan dispositivos eléctricos. Se realiza una revisión de la técnica de estimación de algoritmos genéticos utilizada y sus principales operadores. Posteriormente se exploran las herramientas y conceptos utilizados por el trabajo según los procesos que emplea la metodología de este trabajo ya sea en extracción de datos, simulación y control por programación.

En el Capítulo 3 se propone la metodología para abordar este problema de estimación de parámetros, se exponen los elementos que conforman esta metodología: etapa de adquisición de datos, etapa de simulación y la etapa de procesamiento de control por programación. Se explica el funcionamiento de cada etapa de la metodología y su correspondiente unión. Por último, se presenta la función objetivo para contrastar múltiples señales como finalidad del algoritmo de estimación.

En el Capítulo 4 se realiza una validación de la herramienta a través de su evaluación en distintos escenarios o dispositivos eléctricos con diferentes formas de recolección de datos, distinta cantidad de parámetros y ubicación del dispositivo en una red eléctrica. Finalmente, se presentan los resultados de este trabajo final de maestría y las diferentes métricas de evaluación del rendimiento.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, las recomendaciones del uso e importancia de la metodología y algunas propuestas de futuros trabajos para continuar y mejorar con los aportes relacionados a este.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta una inducción al estado del arte de las temáticas relacionadas con estimación. Se presenta la técnica de algoritmos genéticos como método de estimación de parámetros con sus respectivas características y operadores. Posteriormente se exploran las herramientas para realizar estimación de parámetros por medio de simulaciones iterativas utilizadas en este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estimación de parámetros

A través de los años el hecho de seleccionar la mejor decisión teniendo múltiples caminos ha sido uno de los aspectos más desafiantes. El problema se acentúa con la complejidad con criterios de decisión en un contexto donde se presentan múltiples caminos o soluciones. De ese modo científicos e ingenieros han estado tratando distintas técnicas de desarrollo o herramientas que permitan solucionar estos problemas complejos presentados en estimación y optimización [10].

De ahí parte una de las necesidades de extraer información a partir de un conjunto de datos. Estimación de parámetros es la disciplina que permite desarrollar herramientas para el uso de datos de manera eficiente con el fin de estimar constantes que aparecen en modelos matemáticos y en desarrollo de modelamiento de fenómenos [22].

Esta área de estimación de parámetros es vista también como un problema de estudio inverso. Como una solución a ecuaciones diferenciales parciales que clásicamente otorga solución en el dominio conocido con fronteras, condiciones iniciales y constantes. En un problema inverso todas estas constantes no son conocidas. De esa forma se usan mediciones discretas de las variables dependientes en el dominio de trabajo con el fin de estimar esas constantes o parámetros [22].

Esta temática de estimación de parámetros es de vital importancia en el desarrollo del mundo moderno para dar solución a diversos problemas relacionado con el programa espacial, investigación del átomo y modelamiento de la economía. Claramente en el desarrollo de la ciencia y la ingeniería esta temática es trabajada con el fin de ajustar modelos que describen fenómenos físicos o dispositivos.

En el área de ingeniería, los primeros pasos para abordar estos tipos de problemas son escribir los procesos toma de decisión en un lenguaje matemático y en un problema de estimación que puede ser abordado como optimización. Dependiendo de la estructura del criterio de decisión los problemas de optimización son clasificados en lineales y no lineales [23]. Funciones formuladas en programación lineal tienden aparecer de forma lineal y generalmente pueden ser

abordadas de manera amigable por las técnicas ya existentes y desarrolladas [24] . Por tal motivo la programación lineal es una área madura y muy considerada en tecnología. A pesar de la estricta limitación respecto a su manera de formular funciones, la programación lineal tiene una gran aplicación en ingeniería.

Por otro lado, el área de programación no lineal representa un desafío dominante debido a la diversidad y complejidad en la forma que se le dan a las funciones en el despliegue de los problemas [25]. La programación no-lineal puede ser clasificada entre varias categorías: programación entera [26], [27], programación convexa [28], programación geométrica [29], entre otros que son de las más comunes en la literatura para abordar este tipo de problemas.

El modelamiento de un problema no lineal es relativamente sencillo en general, esto debido a que no hay limitación en la forma en la que se formulan las funciones y los parámetros utilizados en el problema. De hecho, estas funciones pueden aparecer en cualquier función no lineal y con parámetros enteros o continuos. Para solucionar estos problemas de manera analítica en la mayoría de los casos no es trivial plantear el problema. Sin embargo, se encuentran problemáticas en general cuando se busca resolver el problema de esta manera. Como alternativa, técnicas o herramientas basadas en inteligencia artificial como las redes neuronales (NN) [30], optimización por enjambre de partículas (PSO) [31] y algoritmos genéticos (GA) [32] han sido investigados a través de los años. Estos emplean técnicas inteligentes que exploran todas las posibles soluciones dadas por un problema, por lo que superan en unos casos algunas de las limitaciones de los enfoques de optimización tradicionales.

2.1.1 Estimación en ingeniería eléctrica

Tradicionalmente el área de la ingeniería eléctrica ha estado basada en el análisis y síntesis de un sistema limitado o con poca cantidad de elementos. En la actualidad, las cosas han cambiado, no solo los sistemas se han vuelto más grandes y complejos, sino que también estos han comenzado a interconectarse y colaborar entre ellos. Así trabajan en conjunto teniendo un objetivo común y enfrentando restricciones propias.

Para manejar estos requerimientos emergentes de los sistemas en ingeniería eléctrica, esta área se ha visto fuertemente influenciada por la matemática de estimación [22] y optimización

[33],[34]. Esto tiene gran importancia a la hora de administrar los sistemas respecto al cómo deben operar económicamente. El conocimiento en estimación ayuda a los ingenieros a diseñar sistemas más eficientes debido a la interpretación y modelamiento de variables desconocidas. La temática de estimación y optimización da la posibilidad de tratar con el modelamiento de sistemas, diseño y análisis de redes complejas y sistemas que requieren parámetros y restricciones para su consideración.

Por ese motivo la aplicación se ha visto envuelta en diversas áreas que componen la ingeniería eléctrica como es el caso de procesamiento de señales, diseño de circuitos, asignación de recursos en comunicaciones inalámbricas, despacho de potencia, control óptimo de frecuencia-carga, planeación óptima en microrredes, control voltaje-frecuencia en microrredes, amortiguación de oscilaciones de potencia en área amplia, entre otros.

Este trabajo está enfocado en la estimación de parámetros de circuitos eléctricos, de ese modo pertenece al área del diseño y modelamiento de circuitos.

2.1.2 Estimación en modelamiento y diseño de circuitos

En el modelado y diseño de circuitos se han encontrado distintas alternativas a la hora de manipular sus parámetros, no obstante, con la adopción de nuevas tecnologías se ha realzado la importancia que tiene el uso de modelos de dispositivos eléctricos con el fin de brindar mejores rendimientos y obtener las mejores utilidades de estos para el ser humano. De ese modo en el diseño de circuitos se encuentran dos etapas [35]. La primera está basada en la topología del circuito y su propia estructura. La segunda etapa está basada en el rendimiento para optimizar sus medidas de construcción como es caso de área, ganancia y consumo de potencia. Estas etapas son generalmente realizadas por medio de optimización de modelos con ecuaciones analíticas desarrolladas a mano con gran consumo de tiempo en el proceso de diseño encontrando soluciones sin garantizar el óptimo o mejor rendimiento. Por tal motivo técnicas automáticas se vuelven esenciales a la hora de tratar con diseño de circuitos o modelamiento de circuitos con el fin de encontrar el mejor modelo y desempeño [36].

Para atacar esas complejidades y desafíos de estimación, métodos de optimización han sido empleados por los investigadores [37]. Debido a la búsqueda de gran rendimiento respecto a medidas tomadas físicamente y diseño de problemas el área se ha ido enfocando hacia temáticas

de criterio multiobjetivo. De esa manera los métodos y herramientas usados en estos problemas de optimización se han visto no solo en cuestiones de reducción de circuitos en el diseño, sino que también a la hora de modelar dispositivos o circuitos ya existentes con el fin de encontrar métricas más eficientes, robustas, rápidas y de costo efectivo para el trabajo con los circuitos. Es el caso de realizar estimación de parámetros en modelos conocidos como los motores de inducción [13], variables de interés del comportamiento de una batería [38], parámetros que influyen en un modelo fotovoltaico [15], cargas de frecuente impacto en la red como luminarias [39], entre otros.

En ese sentido, el desarrollo de técnicas evolucionarias ha tenido gran impacto en la literatura como alternativas para solucionar los problemas propuestos. Estos han sido empleados a la hora de lidiar con estos problemas de múltiple objetivo [40], [41], precisamente en el ámbito de la estimación de parámetros que puede ser tomada como una vertiente del estado del arte de la optimización.

2.1.3 Estimación-Optimización

La manipulación de parámetros se ha abordado con distintos fines a lo largo del desarrollo de los modelos circuitales. En ese ámbito la optimización y estimación han tenido gran participación para sacar funciones objetivo que solucionen los problemas encontrados en ingeniería [16]. No obstante, estos dos términos, aunque muy relacionados entre sí no necesariamente tienen un mismo significado. Optimización en términos generales se basa en la búsqueda de un mínimo o máximo de una función bajo unas restricciones planteadas. Por otro lado, la estimación hace referencia a un término estadístico que se basa en hallar uno o muchos parámetros desconocidos a partir de unos datos o medidas [42].

Aunque parecen ser términos diferentes guardan cierta relación en la cual diversos métodos de optimización se pueden utilizar con fines de estimación al tratar de minimizar una función de costo que disminuye un error o una métrica que indique el parentesco de los modelos estimados respecto a sus propias medidas [17].

En ese sentido se puede decir que optimización es un término más extenso que puede utilizarse en estimación, pero no es el caso ya que este término no puede abarcar totalmente la estimación porque a pesar de que se puedan usar técnicas de optimización en aplicaciones de estimación, existen métodos de estimación totalmente independientes que no están basados en el área de optimización.

Teniendo esto, según el uso de optimización/estimación de parámetros en los dispositivos eléctricos existen distintas maneras de interactuar con el modelamiento de estas cargas como muestra la Figura 3. Estas maneras están clasificadas según el trabajo de estimación que se desee, donde se tiene en cuenta si los parámetros se estiman y se actualizan con el tiempo de operación del dispositivo o si se extraen los datos y luego se procede a analizarlos.

De esa forma se hace la división con el término de estimación offline que se basan en el procesamiento de los datos y señales en un tiempo externo a la operación de los dispositivos y la estimación online que si permite su aplicación durante el trabajo del circuito [43].

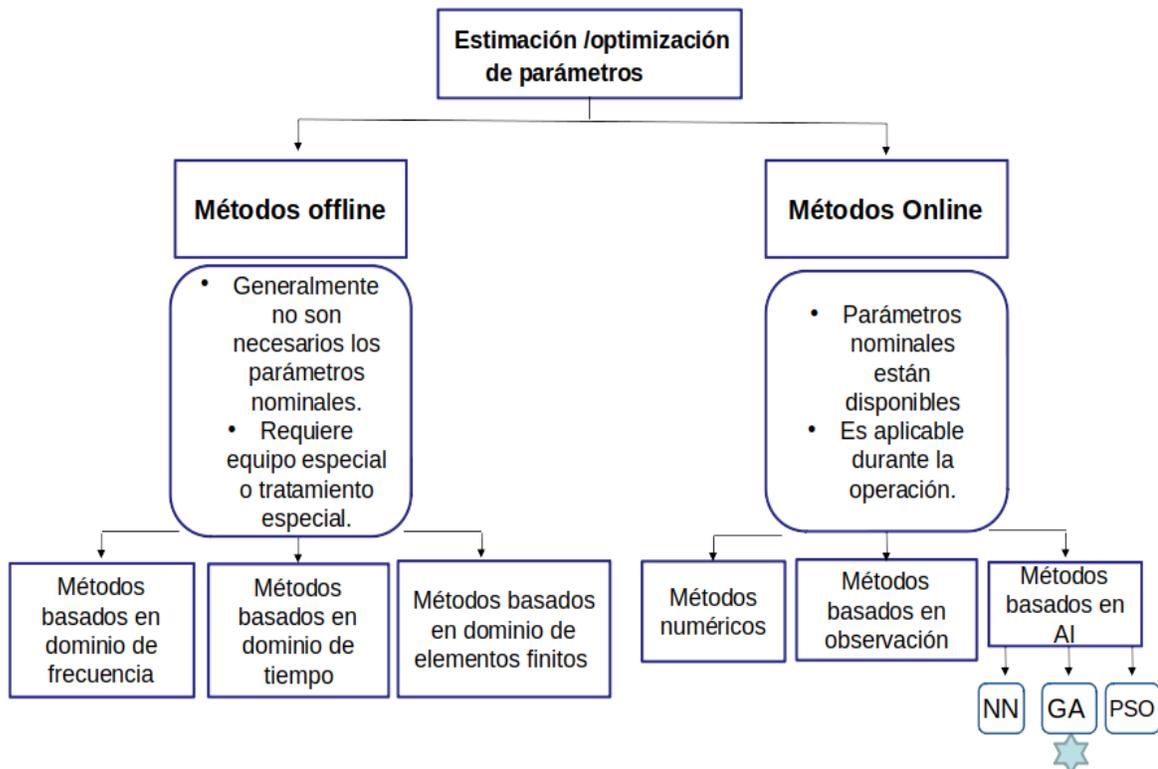


Figura 3. Técnicas de estimación utilizadas en dispositivos eléctricos.

2.2 Técnica de estimación

En este trabajo, la técnica implementada para abordar el problema de estimación fue algoritmos genéticos (G.A). Esta técnica es una de las diversas que se usan en optimización basadas en metaheurística y evolución natural expuesto en la inteligencia artificial. La técnica de estimación puede ser modificada por el usuario ya sean por otras alternativas como PSO [31] o NN [30].

2.2.1 Algoritmos Genéticos

Para el caso de este trabajo se implementó G.A debido a su capacidad de iteración sucesiva y su utilización en procesos de estimación de dispositivos eléctricos en la literatura [44].

Aparte de otras ventajas que tienen vital importancia para la implementación de análisis de dispositivos eléctricos, entre estas ventajas se destaca [45]:

- **Amplia aplicabilidad:** Los G.A pueden ser aplicados virtualmente a cualquier problema que pueda ser formulado como tarea de optimización. El Ingeniero diseñador puede utilizar cualquier técnica de representación que siga su intuición o conocimiento del tema. Posee flexibilidad lo que permite hacer combinaciones de pasos de iteraciones de convergencia, lo que da un amplio portafolio de formas para estimar.
- **Supera los métodos clásicos de los problemas reales:** Esto permite a los G.A afrontar a problemas vistos de optimización como restricciones no lineales, funciones de costo distintas al MSE, evolución en condiciones no estacionarias o la posibilidad de implementar distintos caprichos particulares de cada problema que no permiten las clásicas técnicas de optimización.
- **Potencial de usar su conocimiento o mezclarse con otras técnicas:** Debido a su comportamiento evolutivo estas técnicas permiten incorporar su conocimiento o dominio específico en otros algoritmos que se enfrentan a problemas del mundo real. De esa manera estas técnicas permiten utilizar sus soluciones para ser combinadas con otras técnicas de optimización del estado del arte.
- **Robusto a cambios dinámicos:** Los métodos tradicionales de optimización no son robustos a los cambios de ambiente o del contexto del problema en donde requieren

un reinicio completo para poder otorgar otra solución. En contraste, los G.A pueden ser configurados de manera adaptativa para las circunstancias cambiantes.

- Capacidad de resolución en problemas sin conocimiento previos: La ventaja principal de estos algoritmos para su aplicación radica en que la habilidad de los G.A para enfrentar problemas donde no existen humanos expertos. De esa forma funcionan en problemas donde no se conoce la solución o no se necesita poner una semilla o condición inicial que permitan a la técnica converger a una solución. No obstante, existiendo conocimiento del problema, la semilla o valor inicial puede ser implementado para favorecer al G.A debido a que acelera la convergencia del algoritmo por su cercanía en la búsqueda de la solución.

En los últimos años los GA han tenido gran acogida para la resolución de problemas de estimación de parámetros en cargas o dispositivos modelados con circuitos en ingeniería eléctrica [44].

Para el trabajo con GA se utilizan términos basados en la biología [16]. Para ello se utiliza una codificación que permita el cambio de manera sencilla durante procesos iterativos, en ese sentido por medio de bits se representa los genes que son aquellos valores que a lo largo del método evolucionario presenta variación con el fin de encontrar un óptimo y dar respuesta al problema dado en ingeniería. Esta equivalencia entre biología y técnica GA se representa en la

TABLA 1.

TABLA 1. EQUIVALENCIA G.A-ENTORNO BIOLÓGICO

Evolución Natural	Algoritmo Genético
Gen	Posición de cadena (0 o 1)
Genotipo	Punto sin codificar
Fenotipo	Punto Codificado
Cromosoma	Cadena de genes
Función de aptitud	Valor de la función objetivo

Los componentes que definen un algoritmo genético son:

- Una función que se desea optimizar.
- Un grupo de candidatos para la solución (Población).
- Una métrica de evaluación que permite valorar los candidatos que optimizan la función.
- Un método de reproducción.

El G.A funciona porque hay coherencia en los recursos y se promueve que el mejor linaje o configuración se propague a través de las distintas iteraciones. De esta manera ciertas características que dan un mejor desempeño en la función de aptitud permite que los mejores individuos se reproduzcan y así tenga más posibilidad de dejar a sus hijos y mantener su información hereditaria a lo largo del desarrollo. Del algoritmo.

Para entender su funcionamiento hay que tener en cuenta que este algoritmo comienza con una población inicial de individuos que se someten a acciones aleatorias de carácter similar a las biológicas (mutaciones o combinaciones genéticas), se pasan por una función fitness, de costo o de criterio mediante la cual se deciden cuáles son los individuos más aptos, cuáles se pueden seguir reproduciendo y cuáles tienen que desaparecer, en otras palabras, como un proceso de selección natural [46]. El proceso usado para encontrar estos valores óptimos se puede ver claramente en la Figura 4.

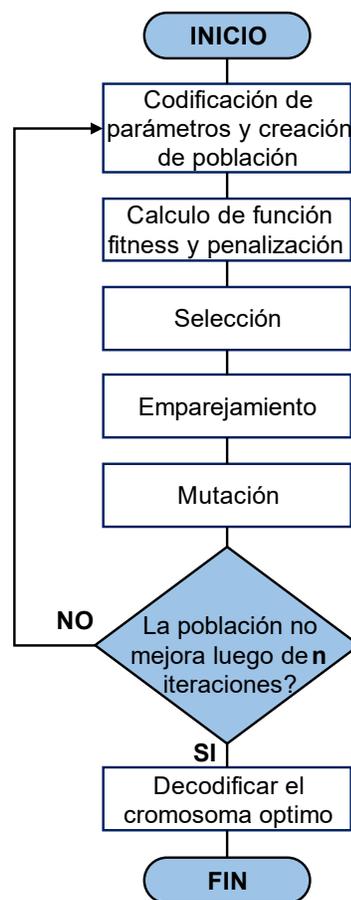


Figura 4. Diagrama de flujo G.A

2.2.2 Operadores genéticos

Las etapas o bloques que componen un G.A o los pasos que los individuos van atravesando son también llamados operadores genéticos los cuales tiene una funcionalidad definida y están inmersos en el proceso evolutivo descrito con el diagrama de flujo Figura 4. Diagrama de flujo G.A

Para aplicar un G.A hay que tener en cuenta una función de fitness o también llamada la función objetivo que se usa en estimación-optimización y tener en claro los parámetros o variables que se van a modificar, que van a evolucionar y de los cuales se buscará el valor deseado. Teniendo esto en claro, para poder proceder y ejecutar el flujo del G.A es necesario configurar los operadores genéticos:

- Codificación de parámetros y creación de población: Teniendo seleccionado los parámetros a modificar (x_1, x_2) se asigna un rango de operación donde trabajaran los parámetros en el algoritmo según la ecuación (1), por otro lado, se asigna una resolución la cual será definida por el número de bits que codifican el valor decimal de los parámetros en un valor binario representado por bits como indica la ecuación (2).

$$Rango = [x_0, x_k] \quad (1)$$

$$Resolucion = \frac{x_k - x_0}{2^{bits}} \quad (2)$$

En ese sentido, suponiendo dos parámetros de una función objetivo se pueden tener dos cromosomas usando 8 bits para representar cada uno de ellos (C1 y C2) . Así, variando un bit con esa representación binaria se varía el valor decimal del parámetro según la resolución dada. De ese modo los cromosomas que representan los dos parámetros se concatenan y forman un individuo genético (16 bits). Esta es una de las probables combinaciones que se tiene que iterar para hallar la solución. Después se asigna una cantidad fija de población la cual determinará el número de individuos que se verán involucrados durante cada época o iteración del G.A, esta procede a generar una función de codificación que según las variables se usa una definición de bits la cual dará el paso de movimiento y el intervalo en donde se buscará esta solución. Este

proceso de codificación de dos variables y posterior creación de una población de 800 individuos se observa en la Figura 5.

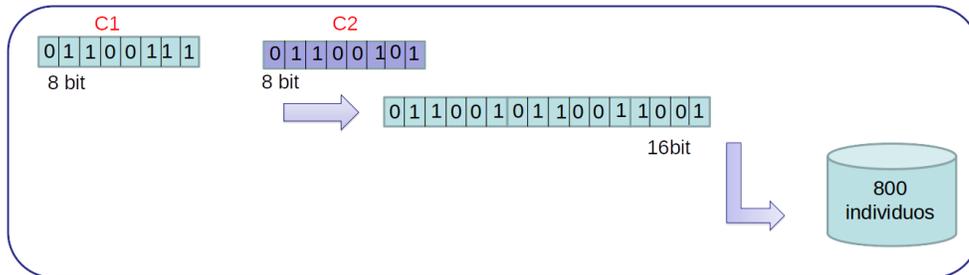


Figura 5. Etapa de codificación y creación población del GA.

- Cálculo de función fitness y penalización: La función fitness es un operador crítico e importante ya que define el criterio de selección o convergencia, de ese modo la función a optimizar es el error visto entre unas señales medidas o respecto a un modelo de simulación propuesto

$x_0 \in x$ tal que f es un mínimo en x_0 , donde $f: x \rightarrow R$, por lo tanto:

$$f(x_0) = \min_{x_0 \in x} f(x) \quad (3)$$

Se pueden implementar funciones de restricción o de penalización para controlar que ciertos valores que generan comportamientos atípicos o de una mala modelación real sean castigados y aumente su función de fitness con el fin de no ser seleccionados en los procesos de reproducción

- Selección: Este operador se caracteriza por dar una probabilidad de emparejamiento a cada individuo según su rendimiento en la función objetivo (4). De ese modo, a los individuos que tengan un mejor fitness se les asignará una mejor probabilidad al ser comparado respecto a la suma de rendimiento de todos los individuos.

$$p(b_{i,j \text{ seleccionado}}) = \frac{f(b_{i,j})}{\sum_{k=1}^N f(b_{i,j})} \quad (4)$$

Por otro lado, también se implementa el operador elitismo en la Figura 6, en el cual los dos mejores individuos siempre son conservados y no se modifican en ningún bit con el fin de que

pase la siguiente población intacta y no se pierda el proceso de mejora continua en la evolución del algoritmo.

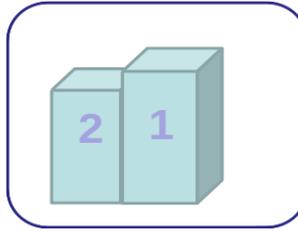


Figura 6. Elitismo en G.A.

- **Emparejamiento:** Este operador también llamado cruzamiento se realiza para la creación de nuevos individuos, en este caso luego de ser seleccionados dos padres según el proceso de selección se toma una probabilidad que afirmará si estos dos padres se cruzan. Dado el caso de que si, los padres se aparean produciendo dos hijos como nuevos individuos usando la mitad de los bits padre 1 concatenados con la otra mitad del padre 2. Un ejemplo de este cruce entre dos individuos se observa en la Figura 7.

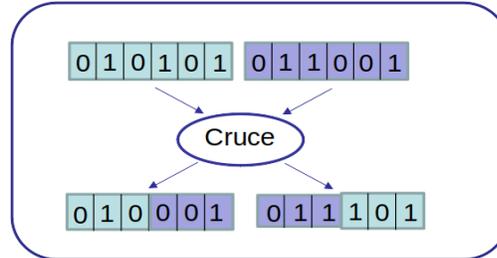


Figura 7. Cruzamiento en G.A.

- **Mutación:** Este operador es de vital importancia para quitar la uniformidad durante el proceso evolutivo del algoritmo. Para utilizarlo se asigna una probabilidad (generalmente de valor pequeño) la cual decidirá si cada bit cambia aleatoriamente con su complemento binario, lo que dará un cambio total al valor decimal del individuo. Esto se realiza con el fin de obtener mayor diversidad entre la población y tratar de evitar mínimos locales implementando cambios más abruptos. En la Figura 8 se evidencia como los bits denotados de color amarillo son asignados para mutación y cambian según su complemento binario.

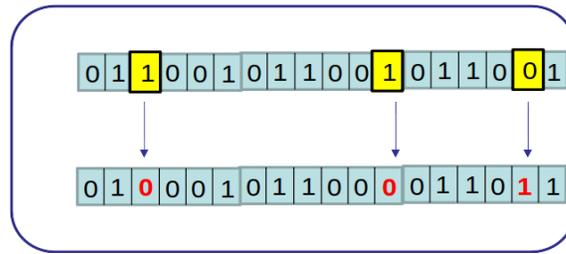


Figura 8. Mutación en G.A.

- Criterio de fin de ciclo: Para terminar el proceso iterativo del algoritmo se dispone un tope de un valor de iteraciones ($k=30$) sin cambio alguno dentro de los rendimientos de los individuos de la población, lo que indica si luego de k iteraciones no se presenta un cambio de mejora en la función de aptitud, el algoritmo ha hallado su fin.

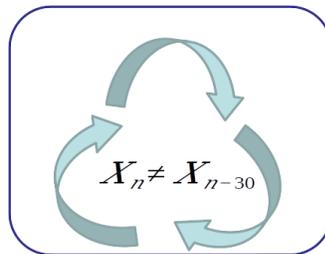


Figura 9. Criterio de parada en G.A.

- Decodificación: Por último, el individuo solución se decodifica según sus dos partes o cromosomas de 8 bits para así obtener sus valores reales y obtenerse los parámetros solución que satisfacen de mejor manera la función objetivo realizada. En la Figura 10 se muestra la decodificación de dos individuos binarios para obtener su valor numérico decimal.

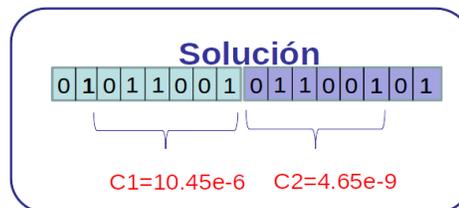


Figura 10. Decodificación y solución del G.A.

2.3 Herramientas utilizadas en el trabajo

Para el desarrollo de la propuesta de estimación de parámetros de circuito eléctrico con flujos de simulación iterativos se deben tener en cuenta las herramientas empleadas para su implementación. Para ese caso se realizó una comparación y selección de herramientas que se utilizaron con el fin de trabajar con la metodología que expone este trabajo.

Por ese motivo se utilizaron métodos o herramientas ya existentes que facilitan su uso y que brindan ventajas en el propósito de poner en práctica la metodología. De esa forma se priorizó la elección de herramientas que tengan flexibilidad a la hora de referirse de la licencia como es caso de herramientas de código abierto, que permitan uso de software libre o con licencia GNU. Esto posibilita utilizar sin restricción las herramientas ya que no se encuentran sujetas a licencias o software de pago. También se exponen otras facilidades y ventajas de las herramientas cómo la capacidad de respuesta o facilidades con el proceso de simulación en software de circuitos eléctricos tanto la capacidad de nodos o convergencia de reglas de integración. Por otra parte, también se selecciona herramientas por sus bondades relacionadas con el objetivo de estimación. Es el caso de la existencia de librerías de optimización, manipulación de datos, control de rutinas de automatización, peso de instalador, entre otros. De ese modo la metodología se puede ejecutar por cualquiera y se puede extender libremente para el desarrollo de la comunidad. Cabe añadir que la metodología no está atada a unas herramientas específicas, esta puede ser implementada según el criterio del diseñador o de quien manipule el proceso de estimación de acuerdo con sus condiciones y necesidades.

En la Figura 11, se exponen las herramientas específicas utilizadas en este trabajo. Para ello se desarrolló un gráfico resumen dividido en 3 secciones a consecuencia de que la metodología de este trabajo utiliza 3 procedimientos principales. De esa forma, se identifica con su color característico cada herramienta en el trabajo: (a) adquisición de datos en color amarillo, (b) simulación en color rojo y (c) control por programación en color azul.

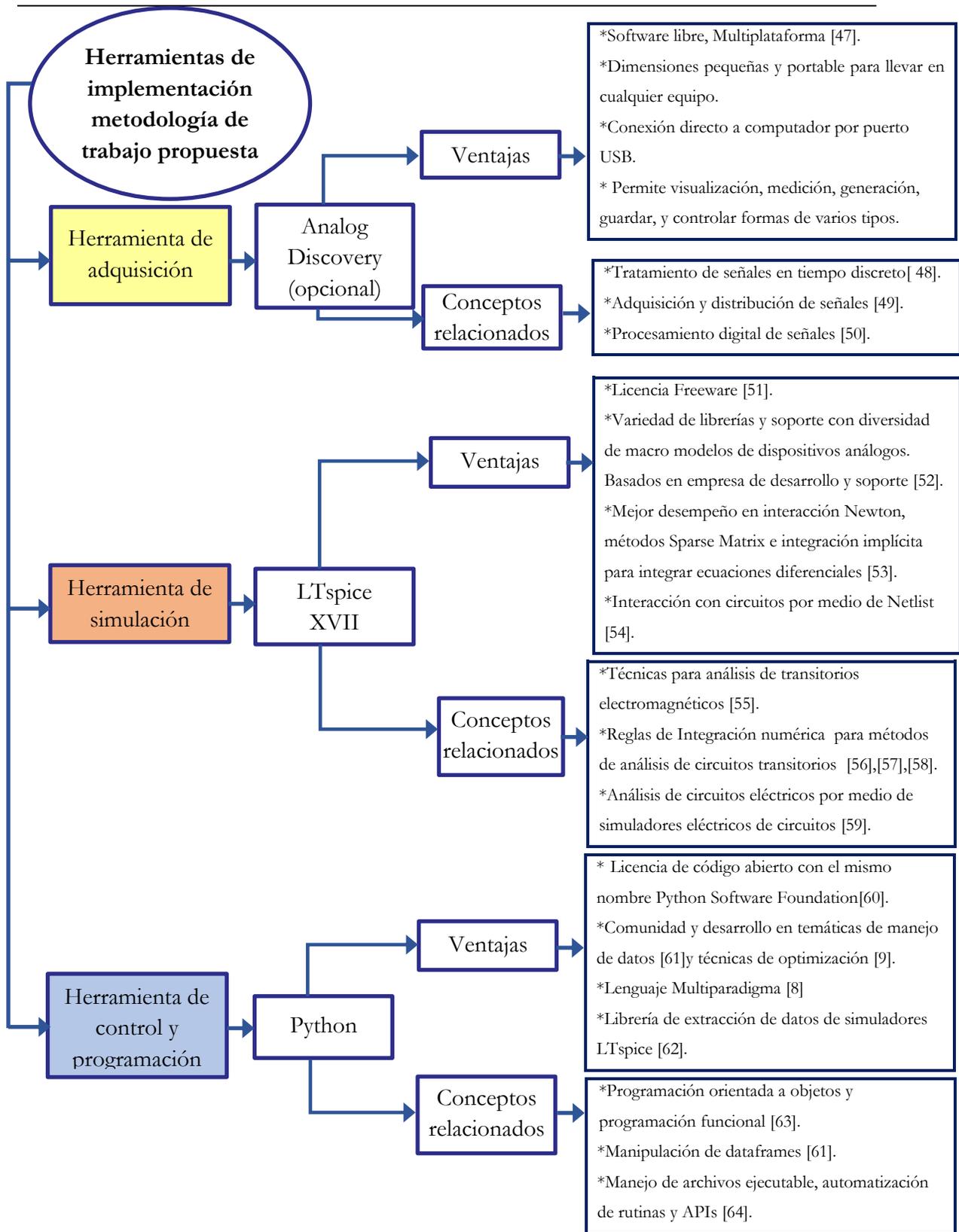


Figura 11. Gráfico de herramientas específicas de la metodología de trabajo implementada.

El cuadro resume la forma de selección y utilización de las herramientas de este trabajo. Se divide en 3 secciones principales según su función en la metodología. De esa forma se seleccionó en como herramienta de adquisición (sección de color amarillo), el equipo Analog Discovery el cual conlleva unas ventajas vistas la facilidad de interacción con un computador personal que permitiría en un futuro extender la metodología propuesta a desafíos tipo Online. Se relacionan también temas que se involucran en la adquisición de datos como el paso de muestreo, estandarización de señales, entre otros para ser consultados en la bibliografía. La información al respecto de esta herramienta se encuentra detallada con mayor profundidad en ANEXO II. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS.

En la segunda sección basada en simulación existen diversos simuladores que pueden ser utilizados, no obstante, en el trabajo se eligió LTspice debido a que cuenta con una licencia de uso freeware y presenta un alto rendimiento en entornos circuitales comparado con otro software de licencia paga. Una comparación de software de simulación y características más detalladas de LTspice puede verse en el Anexo II.1.2 Herramienta de Simulación LTspice. El grafico en esta sección también expone temáticas y conocimientos basados en el estado del arte para abordar estos tópicos de simulación .

Por último, en la sección de programación demarcada por color azul, se utilizó como herramienta el lenguaje de programación Python. En el anexo II.2 Selección herramienta de procesamiento de señales-algoritmo, puede verse información relevante respecto las librerías y facilidades del lenguaje. Por otra parte, también se relacionan temáticas y conocimientos que permiten relacionarse con la aplicación de esta herramienta para la manipulación y manejo de software.

2.4 Síntesis

Este capítulo realiza una breve conceptualización respecto a la temática de estimación y cómo se puede relacionar con técnicas de optimización, enfocándose en el área de la ingeniería eléctrica. Se presentan los aspectos importantes de un algoritmo genético, técnica que es utilizada para estimación de parámetros de dispositivos eléctricos. Finalmente, se realiza una contextualización de las herramientas utilizadas en este trabajo mostrando las ventajas y conceptos relacionados para la implementación de la metodología propuesta por este trabajo.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Este capítulo expone la metodología para abordar problemas de estimación de parámetros de circuitos eléctricos enfocada en el aprovechamiento de elementos de simulación y no centralizada sobre ecuaciones matemáticas. Se expone el esquema de la metodología implementada con herramientas particulares. Se analiza la herramienta de adquisición de datos, herramienta de simulación, la herramienta de procesamiento de señales y el correspondiente acople entre estas. Finalmente, se presenta la función objetivo general para estimar distintos dispositivos eléctricos.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para el desarrollo de una herramienta se debe identificar claramente el problema que se va a solucionar o el proceso que va a facilitar. En ese sentido se encierra el problema en el área de estimación de parámetros de circuitos eléctricos. Para ello, al revisar el estado del arte se encuentra que para estimar parámetros de dispositivos eléctricos, la literatura generalmente se enfoca en el uso de modelos matemáticos, por lo que estos procesos de estimación u optimización se aplican al comportamiento mismo de las ecuaciones que describen el fenómeno[10].

Por otro lado, las herramientas de simulación que contienen elementos circuitales que describen el fenómeno de los dispositivos no son de uso común para abordar problemas de optimización y estimación de los parámetros [20].

3.1 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN CON FLUJOS ITERATIVOS DE SIMULACIÓN CISE

De ese modo, se propone una metodología (Figura 12) que hace uso de herramientas existentes como una alternativa a la clásica manera de estimar parámetros enfocados en el análisis de ecuaciones y análisis numéricos de estimación/optimización que hacen uso de técnicas analíticas.

Para ello se desarrolla una metodología de estimación basada en flujos iterativos de simulación CISE (**C**ircuit **I**terative **S**imulations **E**stimation) que se utiliza junto a una técnica de optimización/estimación que contrasta una función compuesta por señales dadas por la simulación iterativa con señales de medidas del dispositivo. De ese modo no se realiza la típica

estimación aplicada sobre una ecuación matemática basada en el modelo analítico del dispositivo para caracterizar los parámetros.

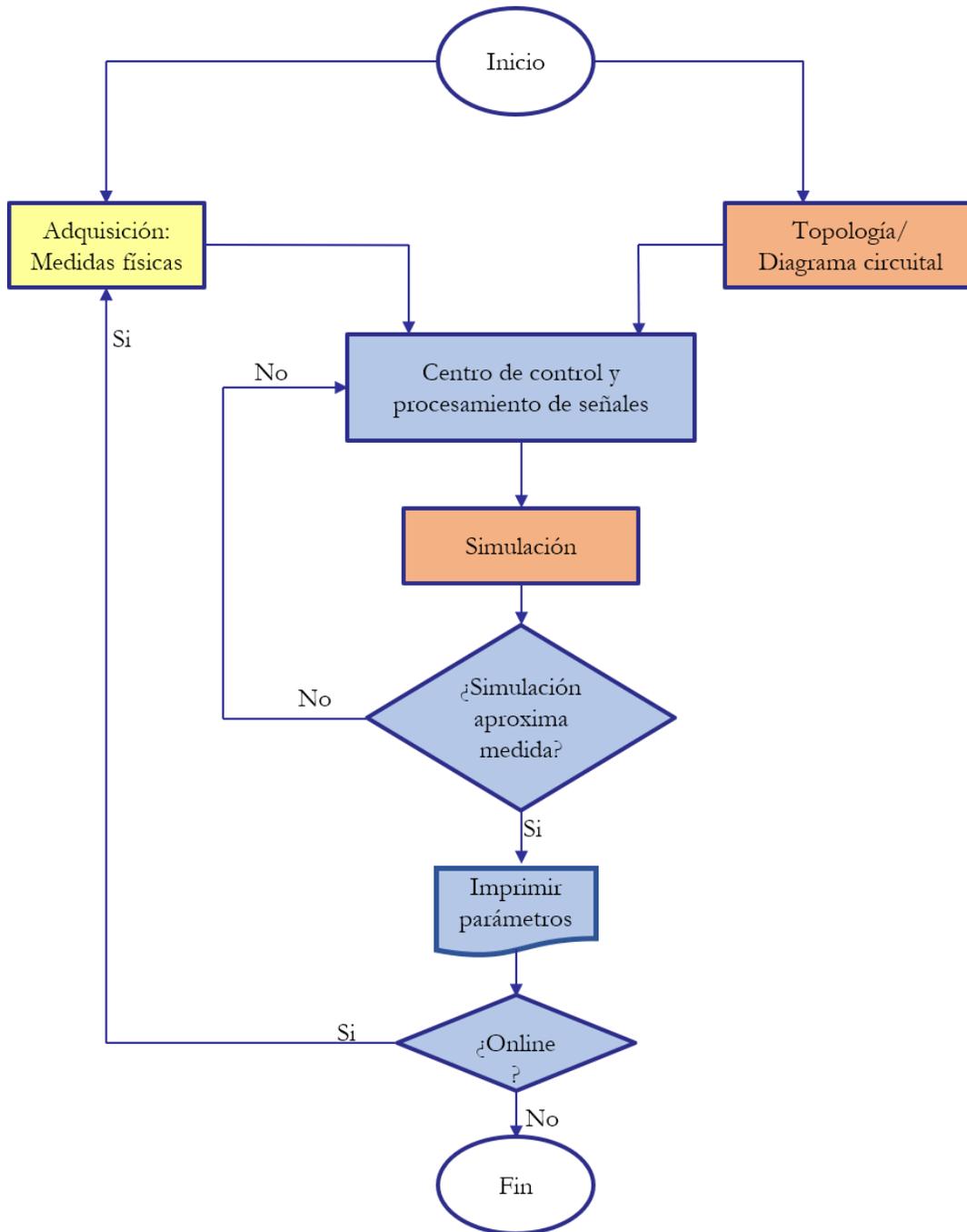


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología propuesta de estimación de parámetros.

El diagrama de flujo de esta metodología inicia con la elección de dispositivo y su correspondiente modelo eléctrico, de esa manera se extraen medidas eléctricas del dispositivo y se otorga la topología del circuito a un programa de control. En el proceso de control se introducen las variables a modificar y se configuran para ser enviadas al programa de simulación. El programa de simulación otorga unas señales que se comparan con las señales experimentales mediante una función objetivo. Esta función otorga un indicativo de la eficiencia de estimación de los parámetros según el comportamiento dado por las medidas de la carga. Por último, si se desea hacer una estimación online se debe reiniciar el proceso desde la etapa de adquisición de señales para volver a estimar los parámetros. En este proceso se pueden usar valores encontrados en estimaciones previas para realizar una estimación online con mejores tiempos, un factor para considerar en este tipo de estimaciones.

En este trabajo se consideró implementar la metodología propuesta para estimar casos offline en procesos de estimación de cargas, en ese sentido existen aspectos a considerar en el proceso de implementación.

Para estimar mediante esta metodología se requiere una representación circuital del dispositivo eléctrico. Esta topología o representación está compuesta por los parámetros que se van a estimar en el proceso con el fin de representar o modelar correctamente el dispositivo.

De ese modo en primer lugar se debe definir el dispositivo eléctrico y consecuentemente conocer su topología o diagrama circuital que lo represente.

La metodología de la Figura 12 consta de 3 procesos principales, cada proceso a continuación es identificado con un color característico. Esto con la intención de distinguir el proceso en cada uno de los cuadros explicativos donde se utiliza cada proceso e interacciona con el resto de los componentes de la metodología. De esa forma se precisa el proceso de adquisición de datos o señales con color amarillo, el proceso de simulación con color rojo y un proceso principal de control de la metodología con color azul. Estos procesos se describen a continuación:

- Proceso de adquisición de señales(Amarillo): Teniendo en cuenta su topología se necesitan unas medidas físicas o medidas de referencia que dan la métrica para contrastar como datos correctos respecto al modelo del escenario de simulación.
- Proceso de simulación(Rojo): Por medio de este se representa el modelo del dispositivo a través de un circuito eléctrico y su equivalente en forma matricial o Netlist. Mediante este se obtienen las representaciones de simulación de las señales con las que se contrastan las medidas físicas del dispositivo a estimar.
- Proceso de control y procesamiento de señales(Azul): Permite establecer o aplicar una técnica analítica o heurística de las diversas utilizadas en los procesos de estimación y optimización con el fin de proveer un criterio de convergencia con posibles candidatos para alimentar la herramienta de simulación y así encontrar el ensayo de simulación que más se parezca a las medidas físicas tomadas.

La implementación de esta metodología se enfocó en abordar los 3 procesos principales que la componen: proceso de adquisición de señales, control de procesamiento y proceso de simulación.

3.2 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN IMPLEMENTADA EN PYTHON-LTSPICE

A continuación, se expone el conjunto de herramientas para aplicar la metodología de estimación de parámetros y su funcionamiento, en ese sentido se muestra el flujo de trabajo entre la herramienta de simulación (LTspice), la herramienta con la que extrajeron los datos(Analog Discovery) y la herramienta para aplicar la técnica de estimación de parámetros G.A (Python). El diagrama de la metodología implementada para realizar estimación offline se observa en la Figura 13.

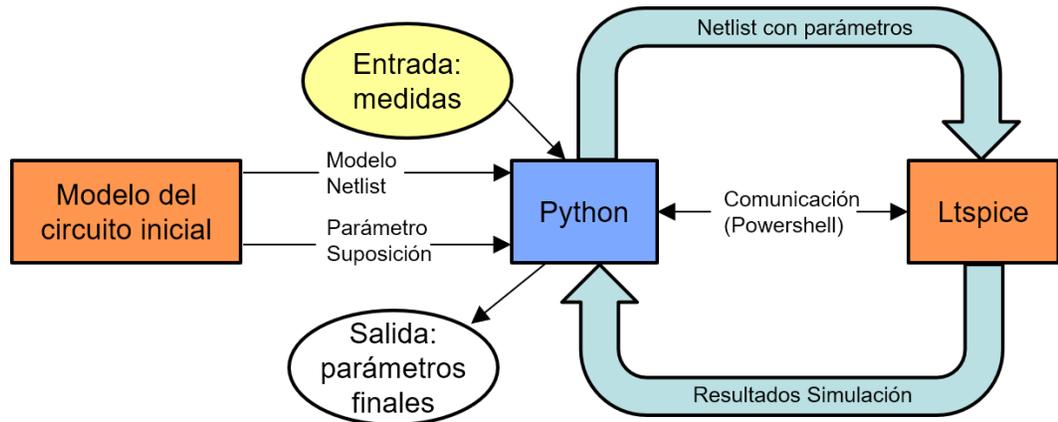


Figura 13. Diagrama de implementación de la metodología utilizado Python -LTspice.

El flujo del trabajo inicia con la selección del dispositivo de su modelo eléctrico o de topología. En ese sentido su topología se dispone por medio de un modelado basado en Netlist en LTspice. De esa manera se carga el Netlist por medio de “strings” para manipular los parámetros a estimar y configurar el centro de control y procesamiento de Python con los respectivos parámetros objetivos.

Por otro lado, haciendo uso del Analog Discovery se adquieren las señales de tensión o corriente del dispositivo eléctrico que caracterizan el elemento físico y sirven como valor real o base. Así por medio del software Waveforms se disponen las señales eléctricas en archivos de tipos .CSV que luego el centro de control de Python puede leer y extraer.

Luego desde Python se inicia una rutina de estimación basado de G.A se crea una población de individuos basados en los parámetros objetivo. Así se da inicio al proceso iterativo basado en la técnica para estimar.

En el proceso cada individuo se somete a una evaluación en el software de simulación. Desde Python se da la instrucción de script de consola donde por medio de comandos de consola se envía cada individuo a LTspice, se simula y se retorna al centro de control en Python la información de las señales eléctricas simuladas. De ese modo se extraen las señales de simulación para manipularlas y compararlas con las señales medidas mediante una métrica de semejanza.

Cada individuo compuesto por los parámetros objetivos tiene una evaluación en la que se mide si su simulación tiene semejanza a los datos medidos y así se emplea la técnica evolucionaria de inteligencia artificial sucesivamente hasta extraer el individuo que prevea el mejor parentesco con las señales medidas.

Por último, luego de que el algoritmo de control haya encontrado la mejor solución en el proceso del algoritmo genético, se consolida el proceso y se puede dar como salida, los parámetros estimados con mejor ajuste de las medidas físicas del dispositivo eléctrico.

El manual de uso de la herramienta respecto a su instalación y manipulación puede verse en el ANEXO I. MANUAL Y GESTIÓN DE LA HERRAMIENTA.

3.2.1 Proceso de adquisición de datos

Para tomar los datos basta con adquirir señales eléctricas de tensión o corriente según el caso de estimación y según las señales de análisis correspondiente para estimar. De esa manera los datos pueden ser extraídos de un simple osciloscopio o tarjeta de adquisición en el desarrollo de la metodología. La metodología no tiene restricción de herramientas para su funcionamiento. Por otro lado, se propone una manera de adquirir las señales con la posibilidad de utilizar una estimación online u offline por medio del dispositivo Analog Discovery 2 para facilitar la conexión de las medidas físicas con el centro de control y procesamiento en Python. En la Figura 14 se muestra como el equipo por medio USB transfiere señales eléctricas adquiridas directamente para uso en computador.

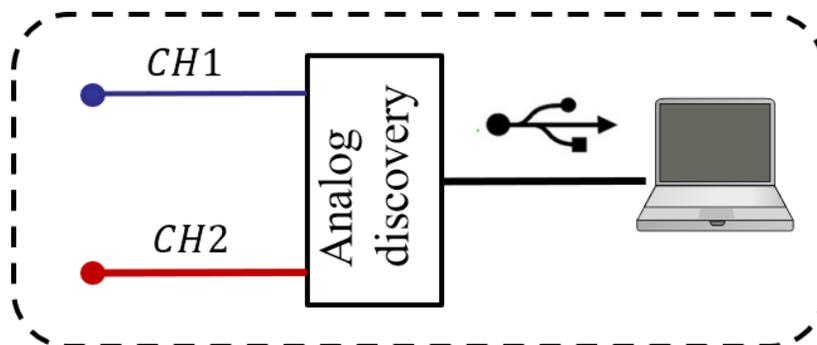


Figura 14. Conexión entre Analog Discovery y PC.

3.2.2 Proceso de simulación en LTspice

El tratamiento de los parámetros que se procesan en la metodología para estimar se realiza a través de un mapeo matricial que define todo el conjunto de un circuito, en el caso de LTspice esta configuración se conoce como Netlist. De esa forma conociendo la topología o modelo circuital del dispositivo eléctrico, este se configura dentro de un Netlist para manejar su variación parámetros de manera iterativa.

3.2.2.1 Netlist

Netlist, es una lista circuital global formada por los nodos enumerados (Siempre debe existir un nodo referencia denominado como el nodo 0, componentes conectados a los nodos, valores de los componentes y modelos de estos).

La primera línea de la Netlist debe contener el nombre de esta y es ignorada en muchos simuladores basado en Spice, también se indica la dirección o ruta (path) del Netlist.

Por otra parte, los modelos pueden estar definidos en una librería, existen librerías típicas que describen el comportamiento de dispositivos semiconductores como diodos transistores bipolares, FET, MOSFET, OPAM, entre otros. Según el distribuidor estos modelos pueden tener gran variedad y tener en cuenta comportamientos muy fieles a el comportamiento del elemento comercial. Para el uso de ellos se usa la línea de comando: “.LIB nombre de librería.”

El final de la lista del Netlist se precisa mediante la instrucción “.end”. La Figura 15 muestra como está compuesto una Netlist. De ese modo, tiene una columna cero que indica la abreviación o nombre de cada elemento. Luego cada parámetro es indicado en la primera columna, el nodo origen en la segunda columna, el nodo final en la tercera columna y el valor del elemento en la última columna.

Resistencia	Rid	Nodo	Nodo	Valor	
Condensador	Cid	Nodo	Nodo	Valor	
Inductor	Lid	Nodo	Nodo	Valor	
Diodo	Did	Nodo(P)	Nodo(N)	Modelo	
Transistor	Qid	Nodo(C)	Nodo(B)	Nodo(E)	Modelo
MOS	Mid	Nodo(D)	Nodo(G)	Nodo(S)	Modelo
Alimentación	Vid	Nodo	Nodo	Valor	
Señal	Vid	Nodo	Nodo		Descripción señal de tensión
Intensidad corriente	Iid	Nodo	Nodo		Descripción fuente de
.lib					
.dc V1 0 0.87 1m					
.backanno					
.end					

Figura 15. Configuración típica de un Netlist en Spice.

3.2.2.2 Manipulación de Netlist

De tal manera conociendo el equivalente del dispositivo eléctrico en un Netlist, este se puede manipular debido a su forma de texto plano. Esta manipulación se realiza a través de cadenas de texto o “strings” los cuales pueden modificar valores de parámetros o propias condiciones de simulación del modelo para buscar iterativamente el rendimiento de simulación según ese ajuste. De esa forma se evita la manipulación manual del software de simulación y se sistematiza el proceso al dar órdenes de Netlist de diferentes circuitos con cambios para que el software de simulación procese.

3.2.3 Proceso de control y procesamiento de señales en Python

Este es el proceso de mayor importancia ya que este es el encargado de llevar todo el control de la metodología y llevar a cabo el proceso de estimación con sus flujos iterativos hasta llegar a la solución de los parámetros estimados. Este proceso se encarga de dar las órdenes de simular y de comparar con medidas, así como de ir modificando los parámetros durante todo el proceso de convergencia. También recibe la información inicial del proceso como el Netlist de topología principal y definir el punto de parada dar solución del proceso con los parámetros o el modelo encontrado.

El centro de control basa su funcionamiento en el paradigma de programación orientada a objetos en Python. En ese sentido se utilizan clases para delimitar los procesos con un modelo de medidas y un modelo de simulación. Por otra parte para la lectura de archivos se hace uso de la librería Pandas [61] trabajada en el área de analítica de datos la cual permite el uso de dataframes para llevar los datos previstos por la herramienta de adquisición en formato CSV dentro del entorno de Python.

3.2.3.1 Librería LTspice

Esta librería permite interactuar en Python con las gráficas que provee una simulación de un circuito de LTspice. Es mantenida y administrada por DonghoonPark y posee una licencia de MIT. Esta licencia es compatible con muchas licencias copyleft, como la GNU o de uso público general, no posee copyright y por ende permite su modificación y uso [62].

Su principal labor es la de manipulación del archivo con extensión “.*raw*” el cual posee la información de la representación gráfica de las señales simuladas por LTspice en ese sentido se puede extraer con toda su información punto a punto tanto su vector de tiempo como el vector de las tensiones de cada nodo que posee el Netlist del circuito y la corriente de cada elemento.

3.2.3.2 API de conexión Python-LTspice

Para realizar la conexión con la herramienta de simulación se realizó una clase de llamado a LTspice la cual permite llamar un archivo de script basado en terminal, en el caso de Windows de archivos batch que pueden ser ejecutados directamente al ser abiertos. De esa manera se

manipulan los procesos o aplicaciones de Windows para controlar la apertura del programa de LTspice. Al momento de ejecutar LTspice se dispone como argumento de apertura o circuito a simular el correspondiente Netlist preprocesado. Luego el centro de control espera que el programa termine su simulación, adquiere las señales en el entorno de Python y por último cierra el programa de LTspice con otro llamado de batch. De esa manera se realiza la interconexión entre el centro de control y el programa de simulación durante cada evaluación de cada individuo de población del algoritmo genético visto en la Figura 16. En la Figura 16 se muestra la conexión enviando el Netlist con la orden de ejecutar el programa de simulación(LTspice), luego se reciben las señales de simulación y por último se envía la orden de cerrar el programa.

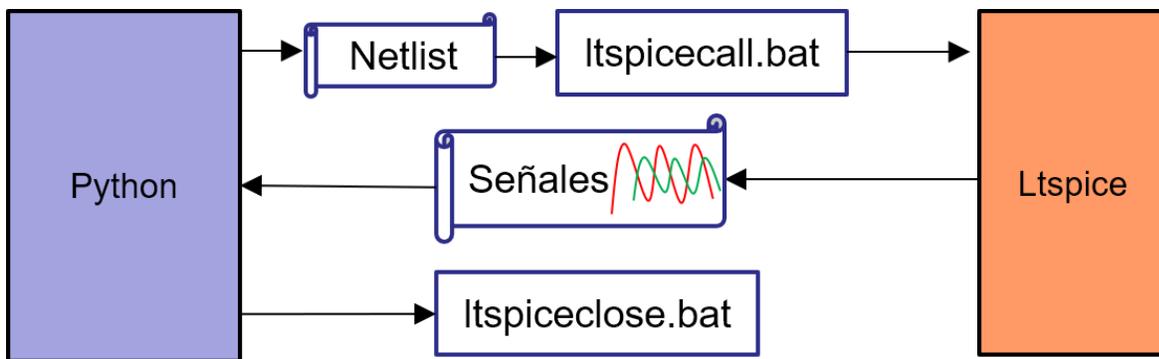


Figura 16. Conexión centro de control con LTspice.

3.2.3.3 Estandarización de señales

Para poder comparar los procesos de las señales de simulación con las señales de medidas hay que tener en cuenta la naturaleza o composición de estas señales, por tal motivo hay que considerar el muestreo de las señales que se van a comparar. En ese sentido, LTspice dispone de pasos de integración variables donde solo se puede modificar el paso máximo mientras que un muestreo de una señal física se realiza generalmente de manera uniforme (Muestreo Periódico).

En la Figura 17 se evidencia la diferencia para representar una misma señal de tensión en un tiempo de 50 ms. Como se puede ver el paso de integración es diferente ya que posee

variabilidad en el caso de LTspice en contraste del valor constante del paso de muestreo de una señal recolectada por un equipo de adquisición (Analog Discovery).

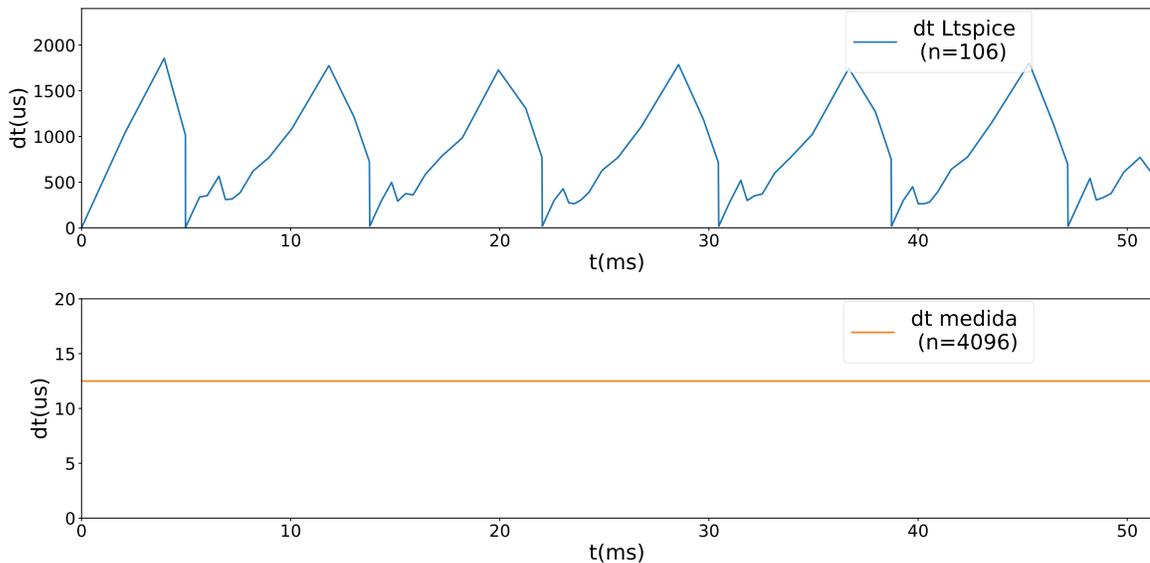


Figura 17. Comparación paso de tiempo LTspice y medidas.

Esto se puede ver reflejado como un inconveniente debido al distinto número de puntos o de muestras para representar una señal. Como se ve en la Figura 17 el simulador LTspice representa la señal con 106 puntos en contraste con el muestreo uniforme del equipo de adquisición que representa la señal con mayor definición haciendo uso de 4096 puntos. Esto se debe a que el simulador permite realizar su convergencia circuital haciendo pasos más grandes de tiempo llegando casi a los 2000 us, valores muchos más altos y fluctuantes en contraste con el paso de integración (**dt**) uniforme de 12.5 us del equipo de adquisición debido a su frecuencia de muestreo de 80 kHz.

Esta diferencia de puntos tiene que ser balanceada de alguna manera para poder utilizar las métricas de comparación punto a punto que definan el error entre simulación y medidas reales. Así, para comparar las señales de tensión o corriente con la métrica es necesario estandarizar los datos de simulación para reconstruir los datos de simulación y por medio de interpolación compararse con las medidas.

Para ello se controla una de las características del Netlist en simulación un máximo paso temporal. Este valor debe ser manipulado de manera que no vuelva mayor el tiempo de espera

por simulación debido a incluir más valores por tanta precisión y que permita un número de puntos considerable para comparar y mapear con los puntos de las medidas. De esa manera sin importar que el paso de integración de la simulación sea variable, este se reconstruirá en función de las medidas con resolución de paso fijo.

En ese sentido, los distintos valores de tensión y corriente utilizados por LTspice que se encuentran dentro del comportamiento del paso de integración variable se pueden mapear usando una interpolación. Esta interpolación permite la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto de puntos.

$$y = y_a + (x - x_a) \frac{(y_b - y_a)}{x_b - x_a} \quad (5)$$

En este caso los puntos conocidos son los previstos por la simulación con paso de integración variables mientras que los nuevos puntos son los basados en el tiempo muestreado por la señal adquirida de las medidas.

De esa manera las dos señales tanto la de medidas como la de simulación quedan uniformes y definidas en función del tiempo de las medidas manejando el mismo periodo de muestreo para hacer su correspondiente comparación punto a punto al ser llevados a la métrica de comparación.

3.2.3.4 Función Fitness

La función de fitness fue elaborada para contrastar las señales vistas por las medidas físicas y las señales otorgadas por el proceso de simulación. Para ellos se cuenta con diversas métricas de comparación la distancia euclídea, el error cuadrático medio, la raíz del error cuadrático medio, las diferentes definiciones de normas de comparación, entre otras [65].

Teniendo elegida una métrica de error que contraste una señal de simulación con una señal de datos medidos, esta función se denota como $f(\mathbf{e})$.

Por otro lado, para generalizar la función hay que tener en cuenta que existen diversos dispositivos eléctricos y cada uno de estos puede tener más de una señal de comparación para poder dar seguimiento y tener el mejor ajuste entre el modelo de simulación y el dispositivo físico. Por consiguiente, cada una de las señales o información del elemento deben tenerse en

cuenta para hacer el seguimiento. De esa forma según el número de señales (**m**) analizadas para realizar la estimación se construye un vector error el cual indica los errores de cada señal del modelo de simulación:

$$\mathit{vector_error} = [f_1, f_2, f_3 \dots f_m] \quad (6)$$

Teniendo en cuenta el vector error, la intención es minimizar el peso de este vector. Para ello se utiliza la definición de norma 2, que a través de un escalar da un indicativo de la dimensión del peso de este vector.

$$\|Y\|_2 = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_m^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m Y_j^2} \quad (7)$$

Se construye la función fitness generalizada según la métrica de error escogida. Esta función se compone como la norma 2 del vector de errores:

$$\mathit{fitness_general} = \|\mathit{vector_error}\|_2 = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_m^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m f_j^2} \quad (8)$$

Utilizando la técnica de optimización, en este caso G.A se plantea el objetivo de minimizar esta función fitness general siendo x_0, x_1, x_n los parámetros variados según cada individuo.

$$f(x_0) = \min_{x_0 \in x} \mathit{fitness_general} \quad (9)$$

Para la implementación, en este trabajo se utilizó como función de error el RMSE para dar convergencia entre datos estimados y datos medidos. La variable **n** representa el número de valores o puntos de comparación entre una señal de simulación y una señal medida.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(Y_i^* - Y_i \right)^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(Y_i^* - Y_i \right)^2} \quad (11)$$

De tal manera el vector de errores se ve compuesto por métricas de RMSE:

$$\mathbf{vector_RMSE} = [RMSE_1, RMSE_2, RMSE_3, \dots, RMSE_m] \quad (12)$$

Así que aplicando la norma dos de este vector de errores es posible encontrar la función fitness basada en RMSE.

$$\mathit{fitness_RMSE} = \|\mathbf{vector_RMSE}\|_2 = \sqrt[2]{RMSE_1^2 + RMSE_2^2 + \dots + RMSE_m^2} = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^m RMSE_j^2} \quad (13)$$

Conociendo \mathbf{n} como el número de puntos de cada señal comparada y \mathbf{m} como el número de señales comparadas, se plantea la función fitness basada en RMSE como:

$$\mathit{fitness_RMSE} = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^m \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(Y_{i,j}^* - Y_{i,j} \right)^2} \right)^2} \quad (14)$$

$$\mathit{fitness_RMSE} = \sqrt[2]{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(Y_{j,i}^* - Y_{j,i} \right)^2} \quad (15)$$

3.3 Síntesis

Este capítulo describe las características y el funcionamiento de la metodología propuesta en este trabajo. Inicialmente, se presenta la metodología de forma general para aplicación de estimación offline u online sin estar atadas a herramientas. Luego se presenta la metodología implementada con herramientas específicas: Analog Discovery como opción para realizar la adquisición de señales del dispositivo eléctrico, LTspice como herramienta de simulación y Python como centro de control y procesamiento de señales. Se explica el funcionamiento en conjunto de las herramientas que se utilizaron para aplicar la metodología propuesta. Se describe el método de comunicación de las herramientas elegidas que en conjunto dan solución al problema de estimación. Por último, se presenta la función objetivo general para diferentes dispositivos basada en contrastar la semejanza entre casos de simulación y caso de medidas o base.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Este capítulo expone el funcionamiento de la herramienta contrastando con casos de estimación. Se presenta la manera de configurar la herramienta y cómo se gestiona a la hora de enfrentar tres escenarios de estimación de uso común en el área de ingeniería eléctrica. Se expone la utilización de la métrica general propuesta en cada escenario de estimación, la sintonización del algoritmo genético y los correspondientes resultados del proceso

4. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS Y RESULTADOS

Para validar la herramienta se decidió hacer hincapié en cargas o dispositivos eléctricos de frecuente uso y de tecnologías de importancia y uso común en el área de ingeniería eléctrica. Para ello se realizó una revisión del estado del arte donde se encontraron casos en que se aplica estimación de parámetros por medio de ecuaciones y que utilizan medidas adquiridas de señales eléctricas. De esa manera se realiza un contraste respecto a la eficiencia de las herramientas como alternativa para resolver este tipo de desafíos.

La herramienta se evalúa mediante tres escenarios distintos de variada aplicación e interés en el área de ingeniería eléctrica.

En ese sentido se atacan tres casos que representan distintos dispositivos con diferente fuente de obtención de los datos:

- Transformador monofásico
- Modulo fotovoltaico.
- Bombilla CFL.

Estos tres escenarios también representan subáreas donde el modelamiento y la simulación tienen incidencia en la ingeniería eléctrica. De ese modo el transformador se asocia al modelado de redes eléctricas, la celda fotovoltaica al modelado de paneles e implementación de energías renovables y la bombilla CFL como elemento estudiado en problemas de calidad de la potencia y temáticas como eficiencia energética.

Se resalta que la herramienta implementada que ejecuta la metodología propuesta no está sujeta a estos tres casos particulares, sino que estos son sometidos a una estrategia de evaluación para demostrar que la metodología funciona. Así la metodología puede ser llevada a cualquier escenario de estimación donde el dispositivo eléctrico cuente con modelo circuital y datos con el fin de estimar sus parámetros a partir de datos físicos del dispositivo. De esa forma, la metodología es aplicada en 3 distintos escenarios con diferente complejidad debido a la técnica de recolección de los datos: (a) pasando de datos conocidos y simulados en el primer escenario, (b) datos experimentales del estado del arte para el segundo escenario y (c) datos experimentales tomados en laboratorio para el último escenario.

4.1 ESCENARIO TRANSFORMADOR

Los transformadores son máquinas eléctricas de gran importancia en el desarrollo del modelo de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en la actualidad. Fallas de estos pueden causar interrupciones de servicios y tiempos de reemplazo de transformadores sin servicio hasta de 6 a 20 meses [66].

Un buen entendimiento de su salud, rendimiento y modelo puede alcanzarse indicando sus condiciones. De esa forma manejar sus recursos de mejor manera con el fin de anticipar problemas en casos como fallos de emergencia [67]. La evaluación de las condiciones de los modelos puede ser realizada a través de dos vertientes principales: métodos de medición directa o métodos con enfoque de modelos. En los métodos de medición directa se utilizan sensores especiales y dispositivos de adquisición que permite analizar las diferencias físicas o condiciones químicas como analizadores de gases, grado de polimerización, pruebas de descarga parcial, entre otros [67],[68]. No obstante, aunque estos métodos pueden estimar la condición de los transformadores tienen la desventaja de estar relacionados con un costo alto tanto de instalación como de mantenimiento.

Por otro lado, se encuentran los métodos basados en modelos. Esta vertiente se basa en el modelo equivalente del circuito con los parámetros referidos a un lado del transformador. Este método tiene la ventaja de facilitar un mejor costo y de analizar los parámetros para diagnosticar el estado del transformador. De esa manera distintas técnicas de estimación tanto online u offline han sido presentadas en la literatura.

Por lo consiguiente, se proponen técnicas de estimación para conocer las impedancias internas, relaciones de transformación, pérdidas de potencia a través de mediciones de corriente o tensión de la carga. Esto teniendo en cuenta que haciendo uso de la estimación por modelo resulta más económico y accesible para transformadores de sectores de mayor demanda, uso común y no tan especializados como en los sistemas de distribución de energía eléctrica [69].

4.1.1 Modelo circuital.

El equivalente circuital de un transformador está compuesto por un transformador ideal que representa el número de vueltas o la relación de transformación. Como los datos son obtenidos en el dominio del tiempo, entonces se hace uso de un modelo de tiempo discreto que representa la dinámica del transformador, dicho modelo puede ser visto en la Figura 18.

Cabe añadir que en este modelo utilizado por Ziang Zhang [69] se desprecian las pérdidas en el devanado secundario. No obstante, estas se pueden ver reflejadas en R_c y R del devanado primario debido al acople magnético y la transformación de energía que tienen que corresponder al consumo energético del devanado secundario y su carga.

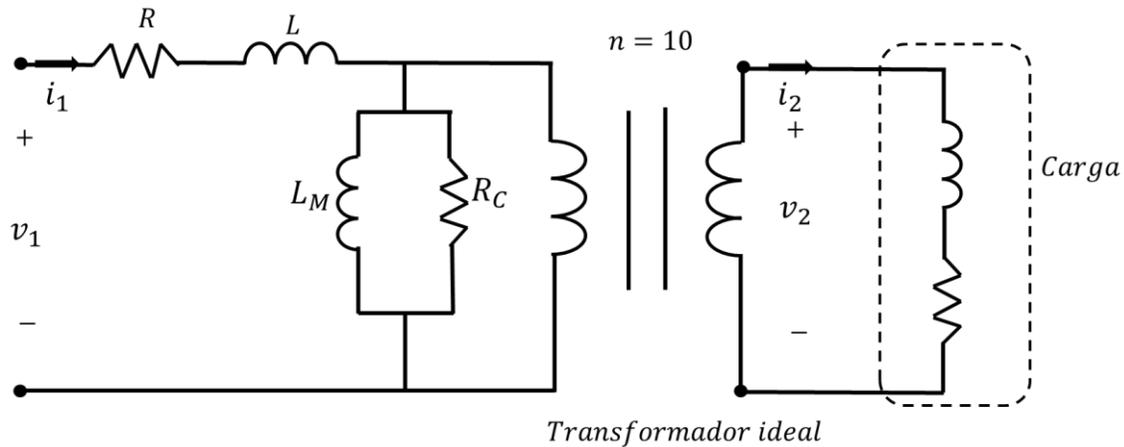


Figura 18. Topología circuito eléctrico de transformador.

Donde,

R : Resistencia de devanado en serie

L : Inductancia de fuga en serie

L_M : Inductancia de magnetización de derivación

R_c : Resistencia de pérdidas en el núcleo

N : Relación de transformación

4.1.1.1 Definición de escenario

En este escenario se expone una estimación a partir del uso de tensión y corriente de entrada y tensión y corriente de salida de la Figura 18. De esa manera, conociendo la naturaleza de la carga que está conectada al transformador y sus respectivos valores o modelo, se pretende estimar los parámetros que caracterizan al transformador. Como consecuencia, estimar los parámetros que inciden en su comportamiento interno que representan las pérdidas del núcleo o de la rama de magnetización del propio transformador.

El escenario del transformador está basado en el desarrollo expuesto por Ziang Zhang que realiza una técnica de estimación de parámetros por medio de medidas entre terminales. Para ello utiliza distintas formas de la técnica de mínimos cuadrados como método numérico para realizar la estimación [69].

Teniendo en cuenta lo anterior, este escenario está basado en encontrar los parámetros internos que modelan un transformador monofásico haciendo uso de la metodología propuesta.

4.1.1.2 Objetivo del escenario

Se plantea la estimación de los parámetros del modelo por medio de la metodología propuesta evaluándola en el modelo del transformador monofásico usado por Ziang Zhang [69] y contrastando con la metodología de estimación basada en el modelamiento a partir de ecuaciones haciendo uso de la técnica de ventaneo de mínimos cuadrados.

Los parámetros del escenario a buscar son R , L , L_M , R_C y N .

4.1.2 Datos

Este escenario se presenta con la intención de validar la metodología al enfrentarla a una estimación no tan compleja debido a que los datos son provistos por un modelo conocido, con parámetros conocidos y establecido según el modelo visto en la Figura 18.

De ese modo para la realización de este escenario se presentan unos datos simulados de un transformador usados en la metodología de Zhang [69], este dispositivo presenta las siguientes características:

- Potencia nominal: 250 kVA
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Voltaje nominal (RMS) en lado primario: 2400 V
- Voltaje nominal (RMS) en lado secundario: 240 V
- Relación de vueltas: 10:1

De esa manera, en la ejecución del escenario se conocen los parámetros propios u objetivos del modelo, los parámetros simulados fueron los encontrados por ese escenario de medidas presentado por Zhang [69]. El transformador base simulado en LTspice y basado en la topología de la Figura 18 tiene los elementos vistos en la Figura 19. El Netlist que representa este modelo de transformador se encuentra en el Anexo I.2 Netlist de escenarios de LTspice.

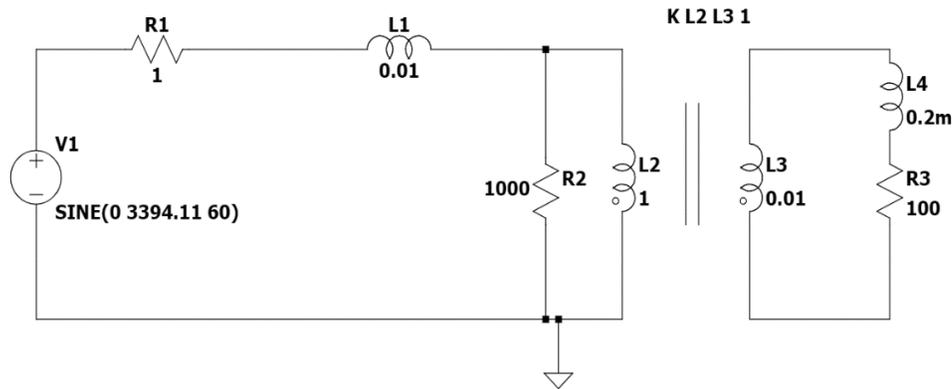


Figura 19. Modelo de simulación de transformador en LTspice.

La recolección de datos de trabajo de este escenario se basó en la obtención de las señales de V1, V2, i1, i2 de la Figura 18 usando el modelo de simulación de la Figura 19 con los respectivos parámetros y carga vista en esa simulación. Para no realizar un escenario tan ideal, el proceso de estimación estos datos obtenidos como base se contaminan con una inyección de ruido para aumentar la varianza y así contrastar el error visto por dicha inclusión. Se introduce un ruido normal con $\mu = 0$ se y $\sigma = 0.004$ a las 4 señales de simulación de tensión y corriente de entrada y salida. Las señales (V1, V2, i1, i2) con y sin ruido se presentan en la Figura 20, cabe añadir que el ruido es de bajas proporciones para no deformar la onda y se nota sus pequeñas

variaciones de mejor manera en las señales de corriente. Para el escenario de estimación se utilizaron los datos de las señales con ruido.

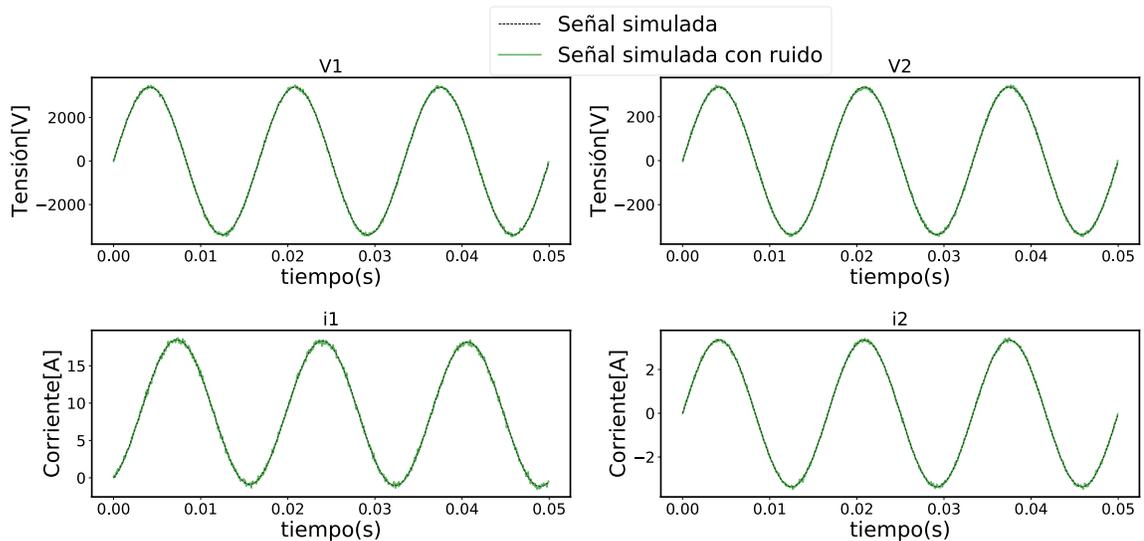


Figura 20. Señales simuladas y con ruido inyectado de escenario de transformador.

4.1.3 Implementación de la metodología

Para la implementación de la metodología en el escenario se analizan 3 subsecciones principales que representan los pilares que se deben tener en cuenta para realizar la estimación. Para ello se describe el modelo LTspice para simular el circuito del transformador, la adecuación de la función fitness general a una particular del escenario de transformador y la sintonización del algoritmo genético con el fin de buscar los parámetros característicos del escenario.

4.1.3.1 Modelo LTspice

El Netlist del circuito fue configurado teniendo en cuenta los “string” correspondientes para modificar en Python. Basados en la topología, los parámetros objetivo de la topología de la Figura 18 fueron simulados según el modelo de LTspice visto en la Figura 19. Para ello se

muestra la equivalencia de parámetros de la topología circuital con los parámetros que tienen el Netlist y modelo de simulación en la TABLA 2.

TABLA 2. EQUIVALENCIA DE PARÁMETROS ENTRE TOPOLOGÍA Y MODELO SIMULACIÓN DE TRANSFORMADOR

Variable topología	Modelo LTspice
R	R1
L	L1
R_C	R2
L_M	L2
N(equivalente)	L3

El modelo usado en LTspice de la Figura 19 tiene la particularidad de no incluir directamente la relación de transformación N, parámetro objetivo. No obstante, LTspice permite la inclusión de la relación de transformación mediante acople magnético de dos inductancias. En ese sentido se resalta un factor K (factor de acoplamiento) que indica el coeficiente de acople y puede tomar un valor entre 0 y 1. En este caso K=1 indica acople sin pérdidas, como en el escenario propuesto. Por otro lado, ya que las inductancias están acopladas, hay que aclarar que la relación de transformación N está ligada al valor numérico de las inductancias. En este caso N se relaciona con K y la raíz cuadrada del cociente de las inductancias L2 y L3 como se puede ver en la ecuación (16).

$$N = k \sqrt{\frac{L2}{L3}} \quad (16)$$

4.1.3.2 Métrica de búsqueda:

Para hallar los 5 valores se diseñó una función fitness que involucra el comportamiento de todas las variables medidas con las que es posible contrastar. En ese sentido, al obtener señales de corriente y tensiones de entrada y salida, se dispone de 4 variables para comparar con las señales previstas por el simulador.

Para buscar la función fitness se utilizan los RMSE de cada señal $RMSE = \sqrt{MSE}$ y se agrupan en un vector de errores, no obstante, para agruparlos se hace uso de la normalización NRMSE con el fin de juntar métricas donde cada RMS se normaliza respecto al valor máximo visto por la señal original:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (17)$$

Por lo tanto, se agrupan las métricas de cada señal de comparación y se agrupan en un vector de errores $[NRMSE_{i1}, NRMSE_{v2}, NRMSE_{i2}]$. No se incluye el valor de V1 debido a que esta señal es analizada como referencia o fuente que excita al modelo de simulación. De esa forma es una señal configurada con igual naturaleza que la medida. Por lo tanto, debido a su poca variación, V1 no aporta cambio o evolución en la función que mide el error entre simulación y medidas. De ese modo, teniendo en cuenta lo anterior, se utiliza la ecuación general (14) de error con un $m=3$ debido al análisis de estas 3 señales principales como se ve en la ecuación (18).

$$fitness_Trafo_RMSE = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^3 \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^* - Y_i)^2} \right)^2} \quad (18)$$

Posteriormente, la función objetivo o fitness a minimizar que indica la diferencia entre la estimación y los datos reales queda simplificada como la ecuación (19) .

$$fitness_{trafo} = \sqrt{NRMSE_{i1}^2 + NRMSE_{v2}^2 + NRMSE_{i2}^2} \quad (19)$$

Se aclara que el valor de tensión V2 debe considerarse en la métrica compuesta objetivo, esto debido al análisis de regulación de los transformadores y con el beneficio de poder extrapolar la metodología de estimación de offline a online en futuras aplicaciones. Ya que un cambio de nivel de tensión de salida con la tensión de excitación de entrada constante, indica un cambio de taps de relación de transformación. Esto indica un cambio entre la relación V1 y V2, es decir,

de la variable (N), lo que conlleva a un cambio de uno de los parámetros de búsqueda para estimar.

4.1.3.3 Sintonización algoritmo genético:

Para obtener los resultados se utilizó un algoritmo genético y se sintonizó con objetivo de 5 variables de interés. Se codificó teniendo en cuenta el valor esperado configurando el intervalo de búsqueda del parámetro según su naturaleza, la escala o un rango que abarque valores donde los parámetros de este tipo de transformadores trabajan. En consecuencia, el conocimiento del experto permite identificar rangos adecuados y encontrar los valores de la solución según la experiencia y entendimiento del problema.

En ese sentido se codifican los parámetros según la TABLA 3:

TABLA 3. RANGO DE TRABAJO DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADOR EN EL G.A

Variable	Límite Mínimo	Límite máximo
R1	1e-3	5
R2	1e-3	2000
L1	1e-6	2
L2	1e-6	2
L3	1e-6	2

Por otro lado, los operadores genéticos fueron configurados como indica la TABLA 4.

TABLA 4. SINTONIZACIÓN DE OPERADORES GENÉTICOS EN ESCENARIO DE TRANSFORMADOR

Operador genético	Valor	Unidad
Población	1000	individuos
Resolución	10	bits
Tasa de cruzamiento	0.99	porcentaje
Tasa de mutación	0.01	Porcentaje
Criterio de parada	20	iteraciones

4.1.4 Resultados

Los resultados se organizan en dos secciones. La primera está relacionada con el comportamiento del algoritmo genético a lo largo de las iteraciones o evolución de la técnica para encontrar los parámetros del modelo del transformador. La segunda está relacionada con medir la eficiencia entre los datos del escenario y los resultados del modelo de la metodología propuesta.

4.1.4.1 Proceso de estimación

La convergencia del algoritmo se dio luego de aproximadamente 199 iteraciones, un poco extenso debido a la variedad de valores combinaciones y parte de la resolución dada por ser una estimación multivariable de 5 variables. El individuo solución según la metodología presentas los siguientes valores de parámetros: $R_1=R=1.28142$, $R_2 =R_C =1012.71$, $L_1=L=0.0078213$, $L_2=L_M = 0.993158$ y $L_3=0.00977617$ lo que lleva a un $N=10.079172$. En la gráfica de la Figura 21 se observa la evolución de los parámetros durante la convergencia del algoritmo.

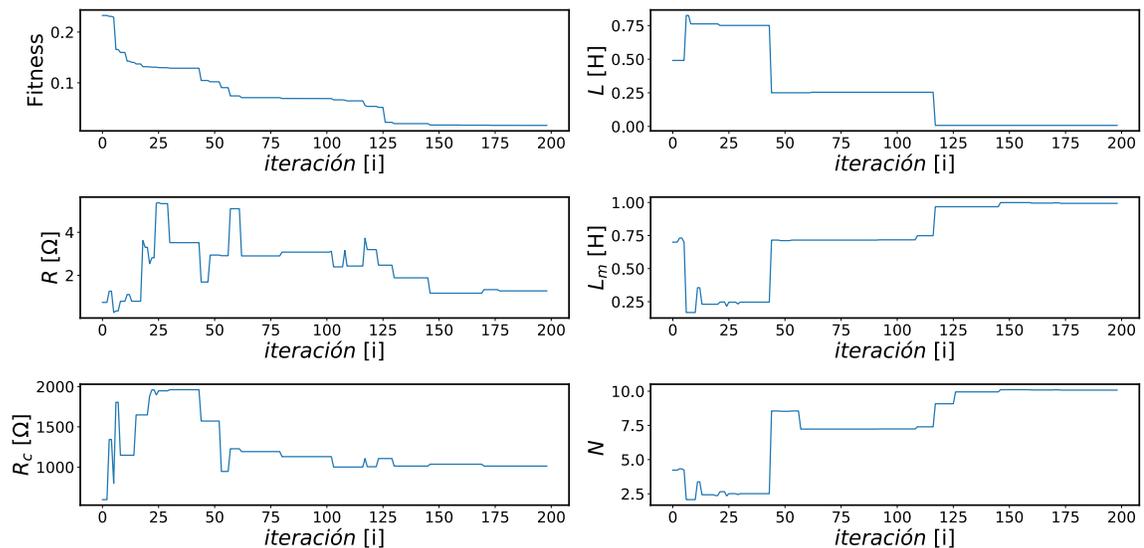


Figura 21. Convergencia de parámetros de escenario de transformador.

La solución de los parámetros otorga en la función fitness según la ecuación propuesta (19) un valor de 0.0161172. En la Figura 21 se observa que ningún parámetro converge de manera rápida en las primeras iteraciones, no obstante, se puede analizar que R_C es el primer parámetro en encontrar cercanía a su solución a lo largo de la iteración 100. Por otro lado, alrededor de la iteración 125-135, la mayoría de los parámetros están muy próximos a la solución a excepción de N que es el último en ajustarse debido al ajuste de la relación de transformación y la tensión V_2 que solo tiene esa señal como métrica de referencia.

4.1.4.2 Comparación resultados de modelo obtenido con datos usados

La comparación del modelo propuesto para este escenario se realiza a través de la TABLA 5. Esto debido a que como se conoce la solución o el valor exacto de los parámetros a estimar, se calculan los errores entre valor conocido y el valor estimado por la metodología implementada. Para comparar los errores se utilizó un error cuadrático y normalizado debido a la escala diferente de cada uno de los parámetros. Por último, al estar normalizados los errores se calcula el error cuadrático medio normalizado (NMSE) para otorgar el error de todo el modelo

TABLA 5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ESCENARIO DE TRANSFORMADOR

Parámetro	Valor conocido	Valor estimado	Error cuadrático normalizado
R	1	1.28142	0.07919722
R_C	1000	1012.71	0.1615441
L	0.01	0.0078213	0.00047467
L_M	1	0.993158	4.6813E-05
N	10	10.079172	0.00062682
NMSE			0.048

De la TABLA 5 anterior se puede contrastar la variedad en la escala de los distintos parámetros de este escenario. Por ese motivo se observa que el parámetro R y L están más alejados que el valor conocido. Esto es consecuencia de que estas impedancias son de entrada del dispositivo en donde hay tensiones de escalas de 3000 V, por lo que ese cambio de estos parámetros no influye de manera significativa en el resultado y naturaleza de las señales estimadas. De esa

forma se infiere que el método otorga valores cercanos y que en general dan buen rendimiento respecto al circuito original obteniendo un error de comparación normalizado de 4.8%.

Teniendo en cuenta los parámetros y las formas de onda correspondientes, se observan los NRMSE de las señales (V1, V2, i1, i2) por separado en la TABLA 6 . Esto con la intención de contrastar el resultado del proceso de comparación de cada una de las señales usadas en el proceso de estimación según su solución de simulación.

TABLA 6. MÉTRICAS DE COMPARACIÓN CALCULADAS SOBRE SEÑALES DE LA FUNCIONES FITNESS DE ESCENARIO DE TRANSFORMADOR

Señal	Métrica	Valor
V1	NRMSE	0.0073421
V2	NRMSE	0.0080812
I1	NRMSE	0.01122646
I2	NRMSE	0.0082196
Total	FitnessTrafo	0.0161172

4.2 ESCENARIO FOTOVOLTAICO

La energía solar ha sido una de las energías alternativas que más han tomado fuerza en los últimos años. La penetración de estas energías ha dado a un gran número de demanda de paneles y de distintas marcas en el mercado y más respecto al crecimiento previsto por las proyecciones de generación y distribución de energía [70],[71].

Así, radica una gran importancia de los modelos que van impactando el mercado respecto a los parámetros que las componen y que es lo que se está utilizando e implementando [15]. Existen normativas que exigen que los fabricantes de paneles solares indiquen ciertas características específicas del producto que están comercializando como es el caso de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito, parámetros típicos de una hoja de datos de estos dispositivos.

No obstante, para llevar a cabo un modelo más preciso con relación a los productos adquiridos es necesario realizar un modelo respecto a las medidas físicas que este mismo panel ofrece, así

se puede dar un modelado en específico y concorde respecto a los fenómenos o características que lo identifican según su historia, ambiente, contexto y rendimiento.

4.2.1 Modelo circuital.

La estimación de paneles solares se ha realizado ampliamente en la literatura haciendo uso de la ecuación de diodo (20) que permite emular el comportamiento de los semiconductores de una celda fotovoltaica en el proceso de generación de energía con el efecto fotoeléctrico.

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{\beta(V_d)}{n}} - 1 \right) \quad (20)$$

Donde n representa la constante de juntura y β es una constante que representa el conjunto de las constantes de la carga elemental del electrón (q), la temperatura absoluta de la juntura (T) y la constante de Boltzmann (K).

$$\beta = \frac{q}{KT} \quad (21)$$

De ese modo existen modelos de basta popularidad como es el caso del modelo de diodo único y de diodo doble [15]. En la Figura 22 se presenta el modelo de diodo sencillo para modelar eléctricamente una celda fotovoltaica.

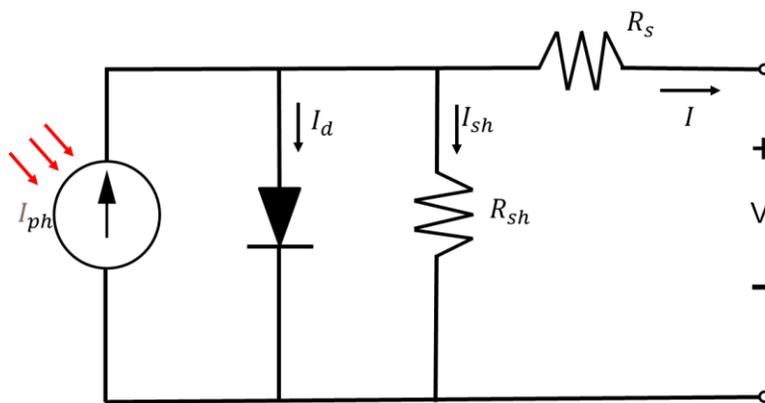


Figura 22. Topología de circuito eléctrico de módulo fotovoltaico.

Donde,

- K : Constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- q : Carga del electrón $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb
- T : Temperatura de la juntura o de la celda [K]
- I_{ph} : Corriente de electrones generada por la incidencia de los fotones [A]
- I_d : Corriente inversa de saturación (por su similitud con el comportamiento de un diodo) [A]
- I_s : Corriente de saturación del diodo [A]
- R_s : Resistencia en serie de la celda [Ω]
- R_{sh} : Resistencia en paralelo de la celda [Ω]
- V : Tensión generada por la celda. [V]
- I : Corriente generada por la celda [A]

Adicionalmente, la energía solar generada por un módulo fotovoltaico puede verse representada por un modelo de diodo único. De esa forma se define como una fuente de corriente dependiente de la irradiancia solar, una pérdida por un diodo de efecto semiconductor y una resistencia serie con otra resistencia paralelo del modelo. La corriente total dada por el panel se define como:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (22)$$

Por otra parte, se aclara que un panel solar está compuesto por varios módulos fotovoltaicos y estos a su vez están compuesto por agrupaciones en serie de celdas fotovoltaicas. No obstante, conociendo el modelo de la celda solar existe una manera de extrapolar el modelo de la celda fotovoltaica con un parámetro que permite emular el comportamiento de todo el panel. De ese modo teniendo en cuenta la ecuación característica de la celda fotovoltaica para extrapolarlo a módulo de celdas se hace uso de la constante N que permite escalar el comportamiento exponencial de tipo diodo de la corriente de saturación. De esa forma se modela el comportamiento de todo un módulo. Luego, si se realizan agrupaciones serie y paralelo de este modelo de módulo fotovoltaico se puede modelar en conjunto un panel solar [72].

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{\beta}{Nn}(V + IR_s)} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (23)$$

Donde V es la tensión de salida del módulo y N simboliza el número de celdas fotovoltaicas que dan la representación de un módulo fotovoltaico y no solo una celda fotovoltaica.

4.2.1.1 Definición de escenario

Para llevar a cabo el escenario de estimación usando LTspice inicialmente se debe contar con datos de un módulo solar. Para este caso se utilizaron datos provistos por un estudio realizado en la revista de PLOS ONE [73]. En dicho trabajo se hizo análisis de celdas y módulos fabricados en Francia y se disponen a la comunidad los datos de las medidas experimentalmente obtenidas. Adicionalmente se discute una estimación de los módulos fotovoltaicos basados en la ecuación (23) en la que utilizan diversos métodos en los que destaca mínimos cuadrados. De eso modo se dispone a contrastar este escenario de estimación con un módulo fotovoltaico, haciendo uso de la metodología propuesta por este trabajo.

4.2.1.2 Objetivo del escenario

Se realiza estimación de parámetros sobre los datos de un módulo solar Leibold solar (STE 4/100) realizada en laboratorio según el trabajo de F. F. Muhammad [73]. En ese sentido, conociendo que este módulo fotovoltaico está compuesto por 4 celdas, se estiman los parámetros de I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_s , n según la topología de la Figura 22.

4.2.2 Datos

La recolección de datos se realizó a través del estudio de métricas de estimación de parámetros de módulos fotovoltaicos realizado por Fahmi F. Muhammad [73]. En este trabajo se comparten los datos medidos experimentalmente en laboratorio que componen la curva V-I de un módulo fotovoltaico. El módulo que estimar es el Leibold solar (STE 4/100) y sus datos fueron extraídos con características de irradiancia de $900 \frac{W}{m^2}$ y una temperatura de $22^\circ C$. La curva V-I que caracteriza el comportamiento de este modulo fotolvtaiico se observa en la Figura 23.

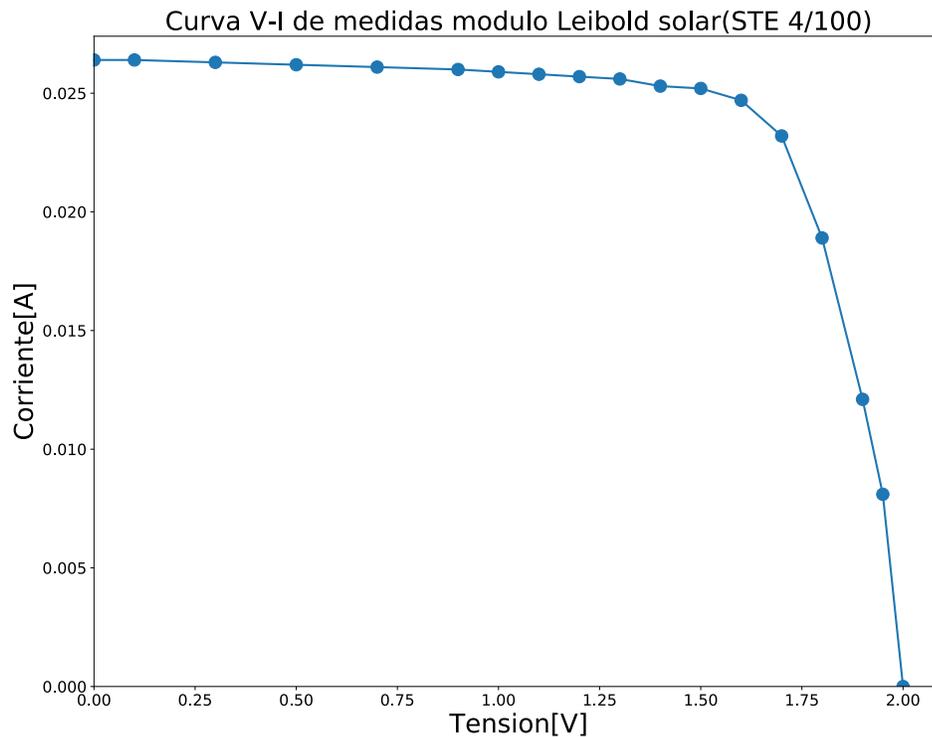


Figura 23. Curva V-I de medidas del módulo Leibold solar(STE 4/100) [73].

4.2.3 Implementación de la metodología

Para la implementación de la metodología en el escenario se analizan 3 subsecciones principales que representan los pilares que se deben tener en cuenta para realizar la estimación. Para ello se describe el modelo LTspice para simular el circuito del módulo fotovoltaico, la adecuación de la función fitness general a una particular del escenario de este módulo PV y la sintonización del algoritmo genético con el fin de buscar los parámetros característicos del escenario.

4.2.3.1 Modelo LTspice

El modelo de este módulo fotovoltaico cuenta con la particularidad de modificar el tipo de simulación del circuito en LTspice. Para ello no se utiliza un transitorio como base temporal de simulación, sino que se utiliza una simulación de paso de variable (.Step) en el Netlist [74]. De ese modo, se modela la respuesta del circuito con la corriente de salida en función de una tensión variable que modela una tensión de corto circuito y tensión de circuito abierto en la salida. Esta

variación se realiza a través de una fuente de tensión variable entre 0 y 5 V con paso de 1 mV. El circuito base de simulación que se utiliza para la metodología se ve en la Figura 24. El Netlist que representa este modelo de módulo fotovoltaico se encuentra en el Anexo I.2 Netlist de escenarios de LTspice.

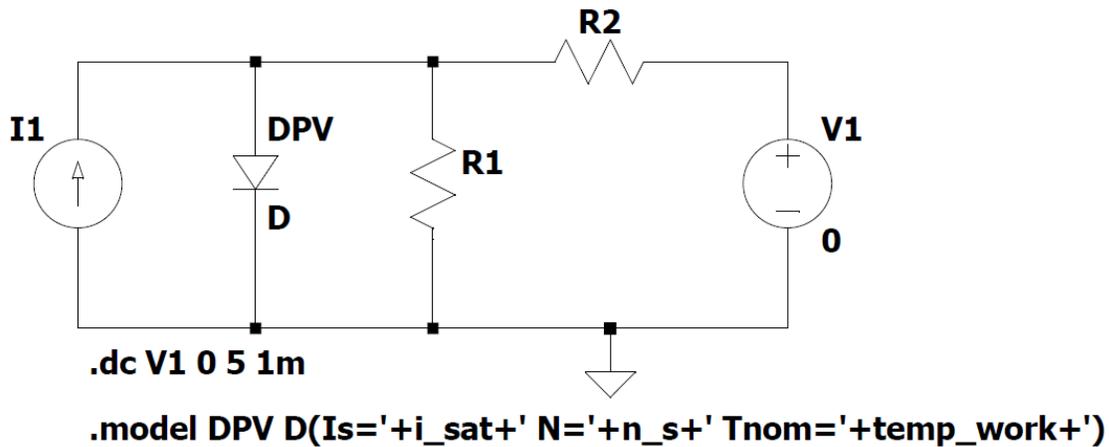


Figura 24. Modelo de simulación de módulo fotovoltaico en LTspice.

Por su parte las variables intrínsecas de la ecuación de diodo se modelan haciendo uso de las propiedades de ecuación de diodo de LTspice que permite ingresar parámetros propios según la ecuación (20). Se incluye también la variable temperatura en las condiciones de simulación teniendo en cuenta la temperatura de trabajo con la que se realizó el registro de las medidas del módulo. La equivalencia entre el modelo circuital de la topología Figura 22 y el modelo de simulación de la Figura 24 se presentan en la TABLA 7.

TABLA 7. EQUIVALENCIA DE PARÁMETROS ENTRE TOPOLOGÍA Y MODELO SIMULACIÓN DE MODULO FOTOVOLTAICO

Variable topología	Modelo LTspice
I_{ph}	I1
R_{sh}	R1
R_s	R2
I_s	i_{sat}
n	n_s

4.2.3.2 Métrica de búsqueda:

Para este escenario, la función fitness general presentada en la ecuación (15) se implementa teniendo en cuenta que en este tipo de casos fotovoltaicos se realiza una comparación entre corrientes en la curva característica de V-I, esto debido a que la tensión de medidas se toma como referencia de simulación y no introduce variación. De esa forma la ecuación general (15) se utiliza con un $m = 1$ como indica la ecuación (24).

$$fitness_{PV} - RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^1 \sum_{i=1}^n \left(Y_{j,i}^* - Y_{j,i} \right)^2} \quad (24)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, como solo se contrasta una señal que es la corriente, la primera sumatoria desaparece. Como consecuencia, la ecuación general de estimación se simplifica a una ecuación de RMSE (25) sencilla (25) entre las corrientes de medida (I) y simulación (\hat{I}).

$$fitness_{PV} = RMSE_I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(I_k^* - I_k \right)^2} \quad (25)$$

4.2.3.3 Sintonización algoritmo genético:

Para obtener los resultados se utilizó un algoritmo genético y se sintonizó con objetivo de 5 variables de interés. De ese modo se codifican teniendo en cuenta el valor esperado poniendo el intervalo de búsqueda concorde a su naturaleza o el rango de valores en que los parámetros trabajan en celdas y módulos solares [73]. En consecuencia, el conocimiento del experto permite identificar rangos adecuados y encontrar los valores de la solución según la experiencia y entendimiento del problema.

En ese sentido se codifican los parámetros según la TABLA 8 de la siguiente manera:

TABLA 8. RANGO DE TRABAJO DE PARÁMETROS DE MODULO FOTOVOLTAICO EN EL G.A

Variable	Límite Mínimo	Límite máximo
I _{ph}	1e-4	1
R _{sh}	0.1	1000
R _s	1e-9	5
I _s	1e-9	50e-6
n	1	2

Por otro lado, los operadores genéticos como indica la TABLA 9.

TABLA 9. SINTONIZACIÓN DE OPERADORES GENÉTICOS EN ESCENARIO DE MODULO FOTOVOLTAICO

Operador genético	Valor	Unidad
Población	250	individuos
Resolución	16	bits
Tasa de cruzamiento	0.98	porcentaje
Tasa de mutación	0.01	Porcentaje
Criterio de parada	25	iteraciones

4.2.4 Resultados

Los resultados se organizan en dos secciones. La primera está relacionada con el comportamiento del algoritmo genético a lo largo de las iteraciones o evolución de la técnica para encontrar los parámetros del módulo fotovoltaico. La segunda está relacionada con medir la eficiencia entre los datos del escenario y los resultados del modelo de metodología. Se contrastan los resultados de la metodología propuesta, las medidas y los resultados del artículo de los datos del módulo [73].

4.2.4.1 Proceso de estimación

En la Figura 25 se pueden ver los resultados de la metodología de los cuales destaca que luego de aproximadamente 140 iteraciones, el programa culmina con una solución y un RMSE de $3.81907 * 10^{-4}$. Se observa que los parámetros R_s e I_s convergen de una manera

anticipada respecto al resto de parámetros alrededor de la iteración 100. Por otro lado, el proceso evolutivo muestra otras particularidades como la del parámetro de I_{ph} que encuentra su valor en una iteración temprana (40), aunque sube y baja en un salto particular en el proceso debido a la variabilidad del algoritmo que busca siempre mejorar los resultados a partir de distintas combinaciones. Cabe aclarar que el algoritmo encontró la solución aproximadamente en la iteración 115, lo que determina el criterio de parada 25 iteraciones después con el fin de la estimación en aproximadamente 140 iteraciones. Por otra parte Así, luego de terminar el flujo de convergencia del algoritmo se encuentra la solución de los parámetros como $R_2=R_s = 0.16239 \Omega$, $R_1=R_{sh} = 2887.71 \Omega$, $n_s=n = 1.45885$, $i_{sat} = I_s = 37.49846nA$ y $I_1=I_{ph} = 0.026617 A$.

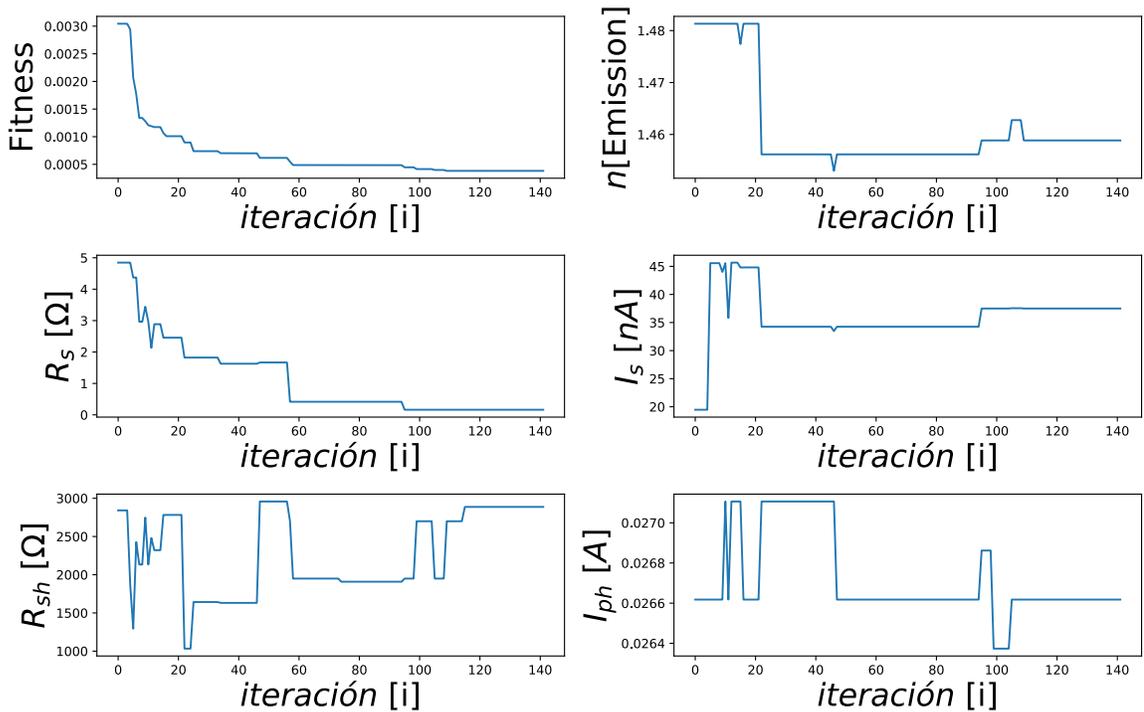


Figura 25. Convergencia de parámetros de escenario modulo fotovoltaico.

4.2.4.2 Comparación resultados de modelo obtenido con datos usados

Se contrastan de igual manera los parámetros encontrados por F. muhammad [73]. Para ello se someten los parámetros resultado de su trabajo [73] en el modelo de simulación propuesto de la Figura 24, encontrado su RMSE correspondiente. De esa manera los parámetros solución de

la estimación del módulo Leibold solar (STE 4/100) según su artículo son: $n = 1.0304$, $R_s = 2.5568 \Omega$, $R_{sh} = 2184.82 \Omega$, $I_{ph} = 0.02646 \text{ A}$ e $I_s = 0.129814 \text{ nA}$.

Estos parámetros otorgan un RMSE según el trabajo de F. muhammad [73] de $3.3392 * 10^{-4}$, basados en el modelo de ecuaciones previsto por ellos. A diferencia de si estos parámetros se introducen en el modelo de simulación de LTspice y se contrastan con las medidas referencia se obtiene un RMSE mayor de $4.0568 * 10^{-4}$. Por otro lado, los parámetros encontrados por la metodología propuesta obtienen un RMSE menor de $(3.81907 * 10^{-4})$ como resultado de simulación. Esto puede ser debido a los pasos de integración usados por el simulador y la forma de extraer los datos para comparar en los puntos que precisa el paso de cambio de tensión(dv) de los datos medidos. La comparación de los resultados con las medidas puede verse en la gráfica de la Figura 26.

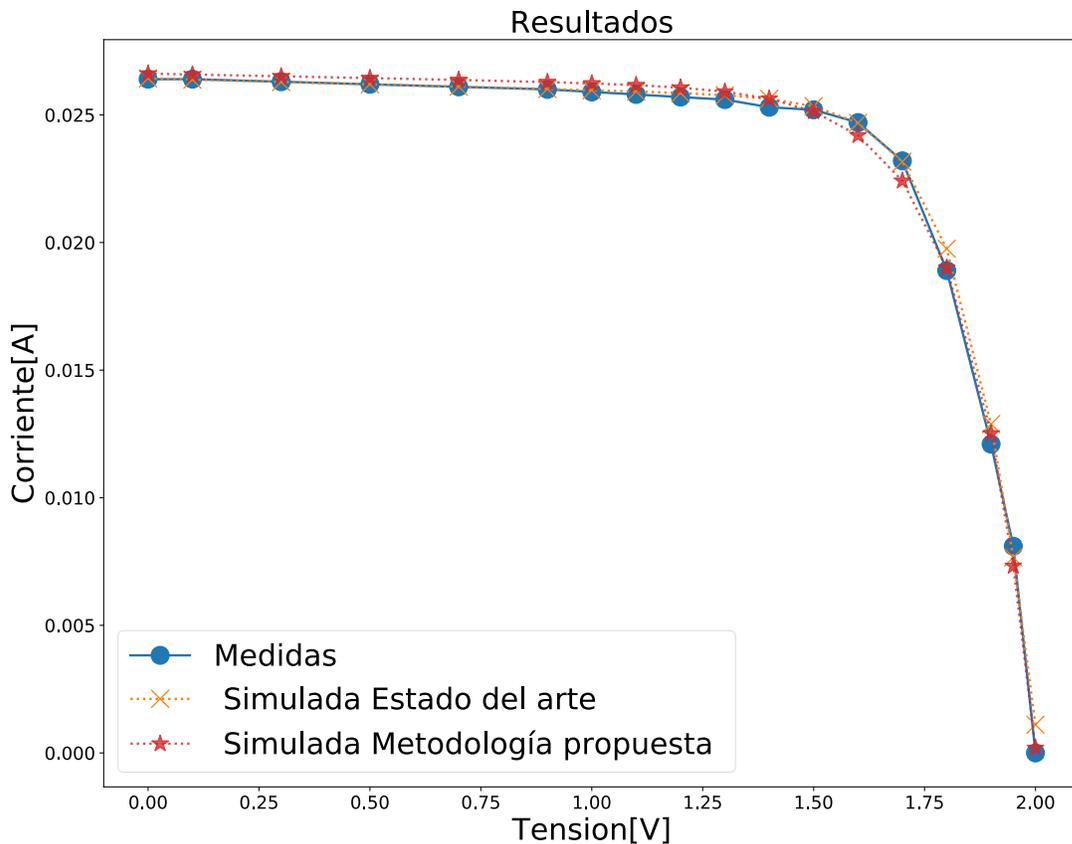


Figura 26. Curvas V-I de medidas, simulación de parámetros estado del arte [73] y simulación parámetros de la metodología propuesta.

4.3 ESCENARIO CFL

Este escenario está basado en la estimación de parámetros de una de las cargas comunes del sector eléctrico y de gran uso domiciliario, las iluminarias. Existen diversos tipos como las clásicas incandescentes y LED, pero este trabajo se enfoca en la estimación de parámetros de una bombilla CFL.

Las CFL (lámparas compactas fluorescentes) son dispositivos con una eficiencia lumínica aceptable respecto a la bombilla incandescente, pero menor respecto a las LED. De ese modo las CFL se encuentran en el medio de la clasificación de luminarias y cabe destacar que en el mercado y en la industria se siguen utilizando. Como consecuencia, el modelo de estas luminarias obtiene importancia en los estudios de ingeniería eléctrica [75].

Las lámparas CFL son cargas monofásicas de baja potencia, pero que pueden ser importantes en el estudio armónico debido a que su consumo de corriente conlleva a deformaciones en la onda respecto a la típica sinusoidal, por lo tanto la inclusión de varias lámparas de este tipo en la misma barra puede generar problemas de calidad de la potencia [76].

De hecho, en el mercado pueden encontrarse CFL con tasa de distorsión armónica (THD) mayor al 100% [75],[77] esto debido a que la normativa respecto a las directivas (IEC 61000-3-2 estándar para clase C) no son particularmente estrictos para dispositivos de bajo consumo [78].

Lo anterior ha motivado a los investigadores a realizar estudios enfocados en la caracterización de este tipo de cargas. En la literatura diversos modelos de CFL se han propuesto con topologías basadas en el diseño del balasto y topologías circuitales (desde las más básicas hasta las más robustas con control de factor de potencia) [75].

4.3.1 Modelo circuital.

Una bombilla CFL de uso residencial típicamente tiene un consumo promedio de 25 W y está equipada por un balasto que actúa como convertidor de frecuencia. Por ese motivo, es común encontrar valores altos de frecuencia en la salida de estas lámparas. En general una CFL puede ser representada por un filtro capacitivo y una resistencia de carga.

Las CFL tienen distintos modelos que se han utilizado en el estado del arte desde los más elaborados hasta los de menor complejidad añadiendo filtros activos en el modelado. Para la discusión de este escenario, en este trabajo se utiliza un modelo sencillo que permite modelar la carga con su comportamiento obteniendo una caracterización de sus elementos y formas de onda aceptable. De ese modo, en la Figura 27 se presenta la topología usada en este trabajo, esta fue propuesta por Gelvez [79]. En esta topología, el tubo y el inversor pueden ser aproximados por una resistencia de carga R_d .

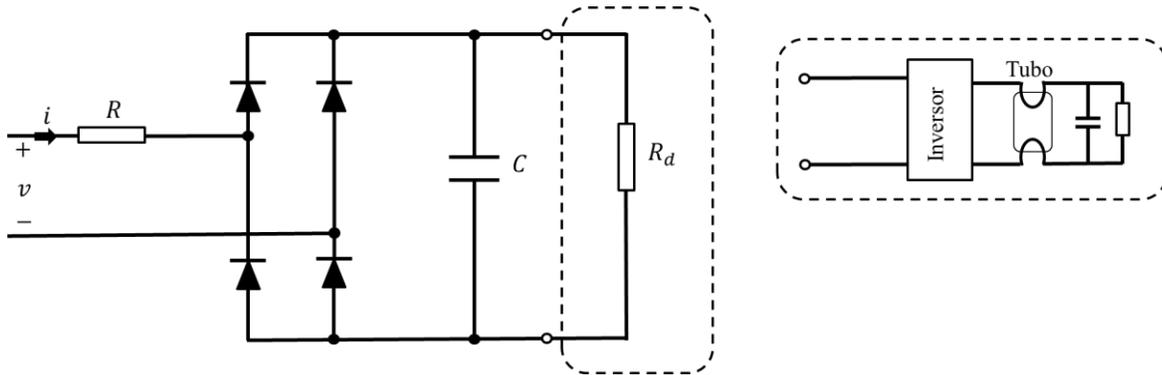


Figura 27. Topología de circuito eléctrico de carga CFL.

4.3.1.1 Definición de escenario

Se propone la estimación de parámetros de una CFL aplicando la metodología propuesta por este trabajo haciendo uso de las señales de entrada del dispositivo. Así, este escenario hace utilizar solo 2 señales de referencia o de mediciones para realizar la estimación de los parámetros que componen la carga de la tensión de entrada al dispositivo y la corriente de alimentación que el dispositivo CFL requiere.

4.3.1.2 Objetivo del escenario

Teniendo en cuenta lo anterior, en este escenario se dispone a encontrar los parámetros de la topología de la Figura 27 para modelar el comportamiento de un CFL. Para ello se establecen como parámetros objetivo R , C y R_d .

Esta estimación no hace uso de ecuaciones matemáticas, en la que se enfocan en modelar el comportamiento de conmutación o de caracterización de los elementos [39], [79] e implementan

técnicas como mínimos cuadrados [39]. Por tal motivo, la estimación se realiza con la metodología de simulaciones iterativas propuesta con un modelo de LTspice.

4.3.2 Datos

Este escenario se caracteriza por adquirir datos de forma experimental y obtenidos en laboratorio. Para ellos se propone hacer uso de un Variac o autotransformador para regular o poder modificar la tensión de alimentación del CFL.

Por otro lado, teniendo en cuenta el equipo de adquisición de datos propuesto, se utilizó el dispositivo Analog Discovery que adquiere las señales correspondientes directamente para el centro de control en el computador con Python. Para medir la corriente se emplea un transformador de corriente (CT) SCT-013-010 de relación 10A/1V para registrar la corriente con sonda de tensión (CH1). En la medición de tensión se utilizó un transformador de acople con relación de transformación 120:12 con el fin de registrar la onda de tensión (CH2), con esto se logra un aislamiento galvánico entre el circuito del experimento y la sonda de medida de tensión. El esquema del experimento realizado se muestra en la Figura 28.

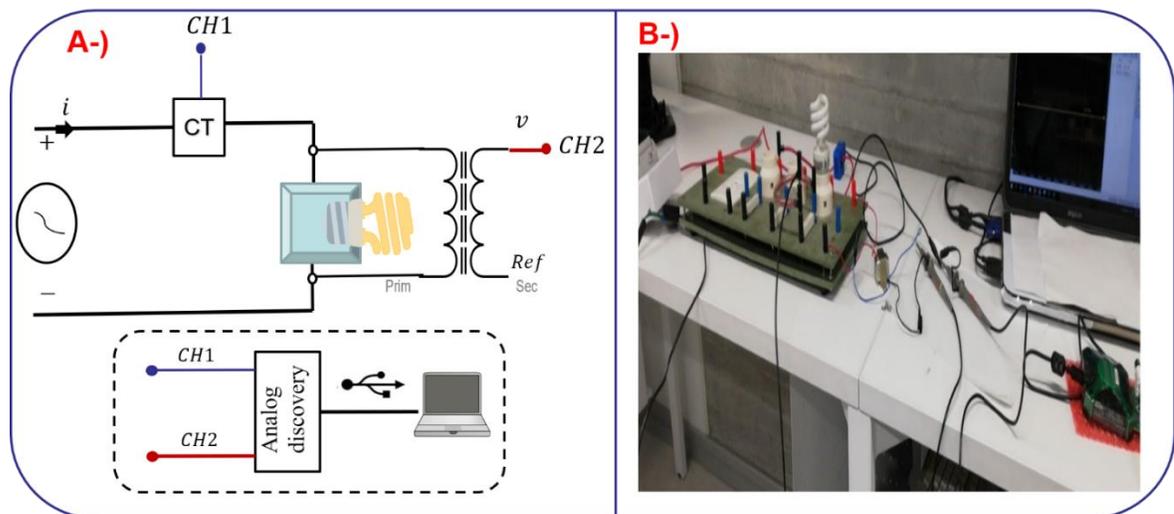


Figura 28. Adquisición de datos experimentales de carga CFL. A-)Esquema De adquisición. B-) Imagen del módulo de adquisición de luminaria de laboratorio GREDyP.

Teniendo en cuenta el esquema anterior se extrajeron las señales de tensión y corriente correspondientes para realizar el proceso de estimación, estas serán el valor de referencia para la estimación.

Se utilizó una bombilla CFL comercial de uso residencial de 20 W marca Stark. Se tomaron 3 ciclos para la comparación con un tiempo de referencia para el proceso de 50 ms y una tensión de red de 120 V RMS con frecuencia de 60 Hz. Se utilizó un tiempo de muestreo con un $dt=12.5$ us equivalente a una frecuencia de muestreo de 80 kHz. En ese caso se toman aproximadamente 1333 muestras por ciclo. Al tomar como referencia 50 ms como tiempo de trabajo se usa una señal adquirida con 4097 muestras que representan ese intervalo de tiempo.

En la Figura 29 se observan las señales de tensión y corriente en función del tiempo adquiridas como se mencionó anteriormente. Se analiza como la señal de corriente presenta más distorsión debido a las altas frecuencias que puede introducir el conmutador que poseen estas luminarias. Esto es típico en los estudios de calidad [78], donde la señal de tensión lleva una inercia mayor y no se distorsiona a comparación de la señal corriente que muestra los fenómenos para analizar.

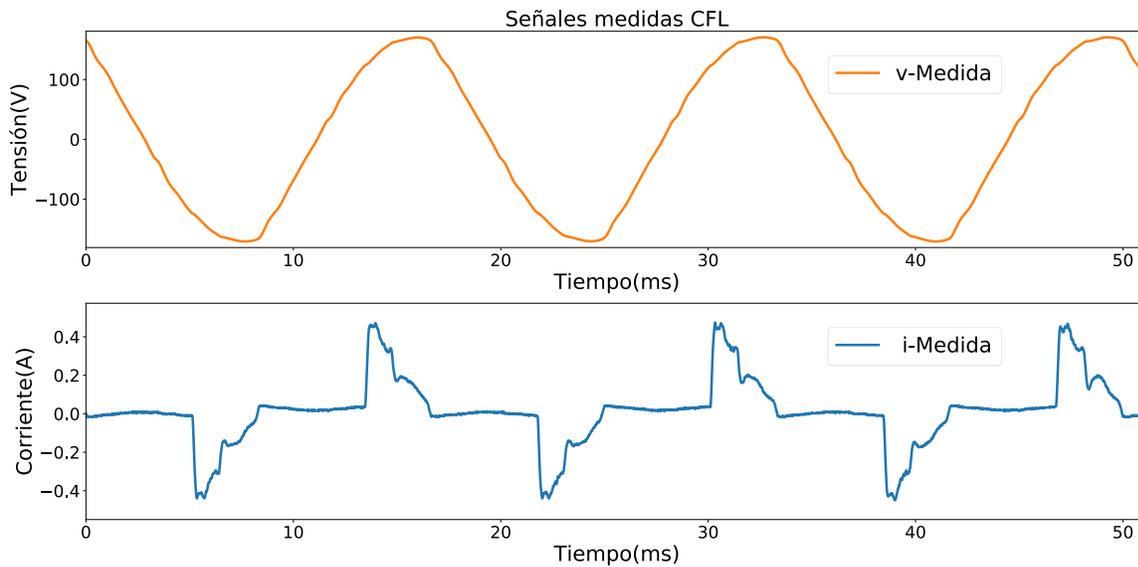


Figura 29. Formas de onda de tensión y corriente adquiridas de bombilla CFL Stark.

4.3.3 Implementación de la metodología

Para la implementación de la metodología en el escenario se analizan 3 subsecciones principales que representan los pilares que se deben tener en cuenta para realizar la estimación. Para ello se describe el modelo de LTspice para simular el circuito representativo de la CFL, la adecuación de la función fitness general a una particular del escenario CFL y la sintonización del algoritmo genético con el fin de buscar los parámetros característicos del escenario.

4.3.3.1 Modelo LTspice

El Netlist fue configurado teniendo en cuenta los “*string*” correspondientes para modificar, basados en la topología las variables fueron representadas según el modelo de LTspice visto en la Figura 35. En el modelo de simulación se utilizó una simulación de transitorio usando el mismo tiempo dado por las muestras extraídas, en ese caso el tiempo de simulación final también culmina en 50 ms. El Netlist que representa este modelo de luminaria CFL se encuentra en el Anexo I.2 Netlist de escenarios de LTspice.

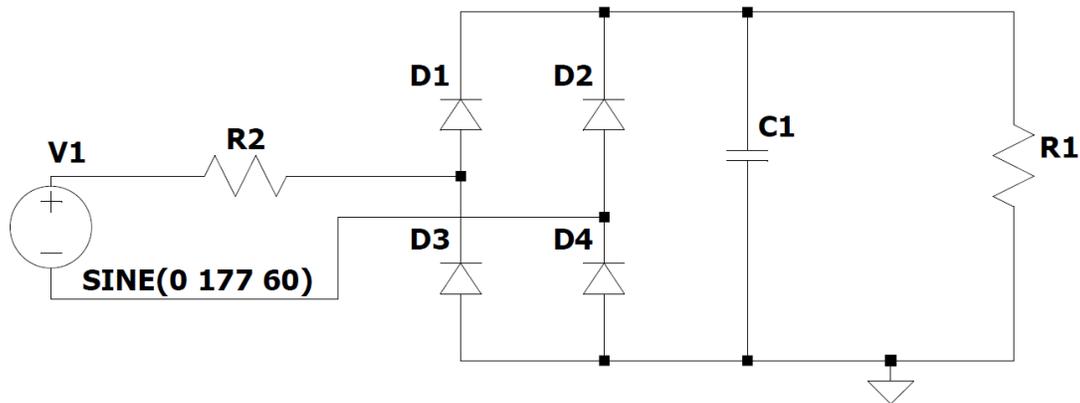


Figura 30. Modelo de simulación de bombilla CFL en LTspice.

La equivalencia entre el modelo circuital de la topología mostrada en la Figura 27 y el modelo de simulación de la Figura 30 se presentan en la TABLA 10.

TABLA 10. EQUIVALENCIA DE PARÁMETROS ENTRE TOPOLOGÍA Y MODELO SIMULACIÓN DE CARGA CFL

Variable topología	Modelo LTspice
R_d	R1
R	R2
C	C1

4.3.3.2 Métrica de búsqueda:

La función objetivo para este escenario está basada en la definición dada de la función fitness general de la ecuación (14). Para este caso se utiliza un $m = 1$ como se ve en la ecuación (26) debido a que la señal de tensión funciona como referencia para generar la señal de alimentación del modelo circuital.

$$fitness_{CFL_RMSE} = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^1 \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^* - Y_i)^2} \right)^2} \quad (26)$$

De esa forma, la función fitness general se puede simplificar analizando solo una señal. Como consecuencia, la función se abrevia en el RMSE sobre la función de corriente como muestra la ecuación (27). En ese sentido el comportamiento de los parámetros de la carga se verá contrastando las corrientes de medida (I) y simulación(\hat{I}).

$$fitness_{CFL} = RMSE_I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_k^* - I_k)^2} \quad (27)$$

4.3.3.3 Sintonización algoritmo genético:

Para obtener los resultados se utilizó un algoritmo genético y se sintonizó con objetivo de 3 variables de interés. De ese modo se codifica con el valor esperado poniendo el intervalo de convergencia concorde a su naturaleza o el rango de valores en que los parámetros de estas cargas CFL trabajan. En consecuencia, el conocimiento del experto permite identificar rangos adecuados y encontrar los valores de la solución según la experiencia y trabajo con parámetros de este tipo de cargas luminaria. Los parámetros se codifican según la TABLA 11 de la siguiente manera:

TABLA 11. RANGO DE TRABAJO DE PARÁMETROS DE CARGA CFL EN EL G.A

Variable	Límite Mínimo	Límite máximo
R1	0.1	10000
R2	0.1	1000
C1	1e-9	100e-6

Por otro lado, los operadores genéticos fueron configurados como indica la TABLA 12.

TABLA 12. SINTONIZACIÓN DE OPERADORES GENÉTICOS EN ESCENARIO DE CARGA CFL

Operador genético	Valor	Unidad
Población	40	individuos
Resolución	16	bits
Tasa de mutación	0.3	porcentaje
Tasa de emparejamiento	0.9	Porcentaje
Numero de iteración de convergencia	85	iteraciones

4.3.4 Resultados

Los resultados se organizan en dos secciones. La primera está relacionada con el comportamiento del algoritmo genético a lo largo de las iteraciones o evolución de la técnica para encontrar los parámetros de la carga CFL. La segunda está relacionada con la medida de eficiencia entre los datos del escenario y los resultados del modelo de metodología propuesta.

4.3.4.1 Proceso de estimación

Haciendo uso de la metodología se encontraron los valores que permiten caracterizar la carga CFL. Para ello el algoritmo genético dispuso de 85 iteraciones aproximadamente para encontrar la solución. En ese caso se encontraron los siguientes parámetros solución: $R_1 = R_d = 1685.59 \Omega$, $R_2 = R = 33.3766 \Omega$ y $C_1 = C = 11.2132 \mu F$.

Por otra parte, en la Figura 31 se puede observar como la convergencia de los valores solución se encuentra a partir de la iteración 45. No obstante, al establecer un criterio de parada de 40 iteraciones sin cambio alguno se ve como el algoritmo sigue iterando sin encontrar cambio alguno o denotar algún signo de evolución. Además, se evidencia la manera en que el parámetro de la capacitancia C converge rápidamente en relación de los otros dos parámetros resistivos R y R_d . Esto puede ser debido a que la capacitancia es el parámetro que indica el corrimiento en el tiempo de las señales de corriente para ajustarse con las medidas, lo cual permite inferir que su variación afecta con mayor peso en la función fitness y conlleva a ser la primera buscada por el algoritmo genético.

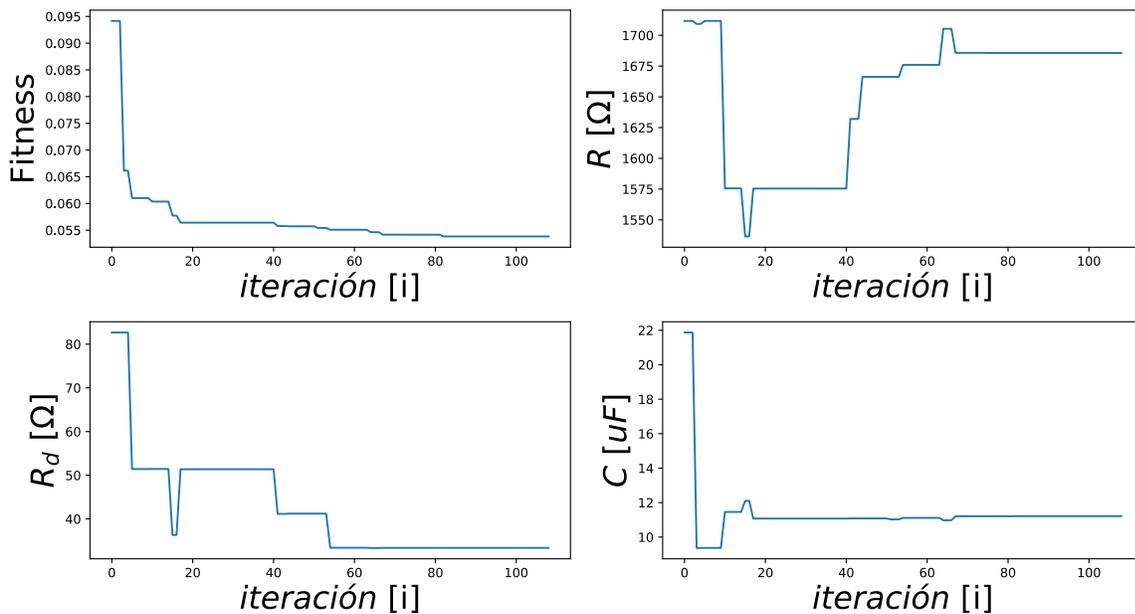


Figura 31. Convergencia de parámetros de escenario carga CFL.

4.3.4.2 Comparación resultados de modelo obtenido con datos usados

La comparación de resultados se realiza por medio de la forma de onda de la Figura 32 que contrasta las señales medidas respecto a las simuladas con los parámetros solución de la metodología. Se detalla geométricamente el parentesco respecto al desfase en el tiempo de carga en la señal de corriente y su ajuste aproximado de forma. La carga CFL presenta una inyección de ruido prevista por sus componentes no lineales o presencia de ruido debido a la naturaleza de los materiales que el fabricante usó en la bombilla. No obstante, para utilizar un modelo basado en filtro y elementos pasivos la estimación brinda un buen comportamiento dando el mejor ajuste basado en el detalle y sencillez de la topología de este modelo [79].

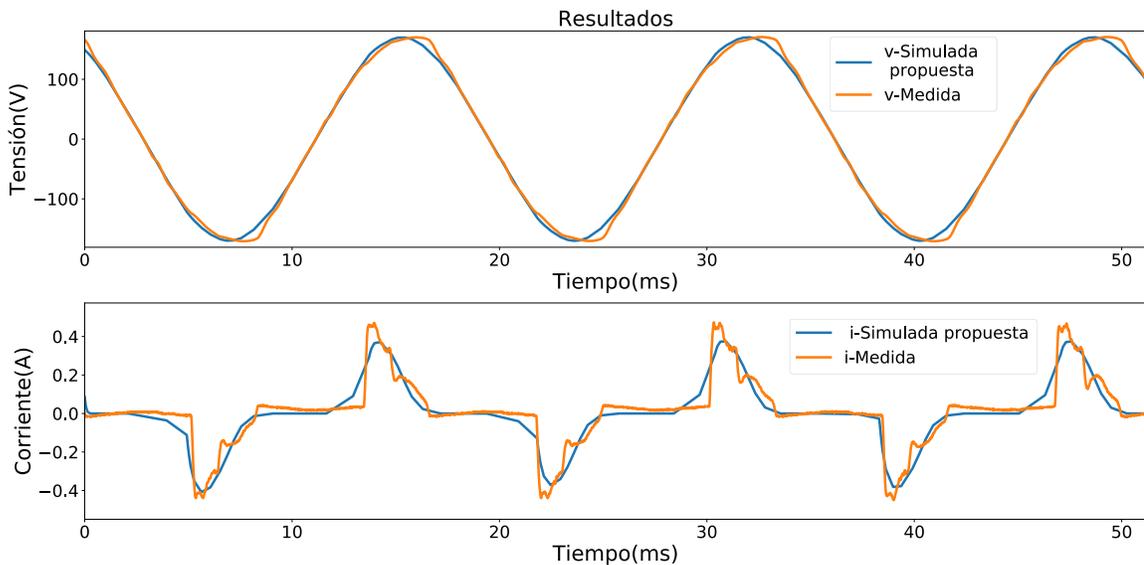


Figura 32. Formas de ondas de tensión y corriente de medidas y modelo de simulación propuesto de bombilla CFL Stark.

Por otra parte, también se contrastan los resultados de la metodología midiendo el error de las señales de simulación resultado con las medidas con diferentes métricas de comparación usadas en el estado del arte de estimación [65]. De ahí las señales solución del modelo, usando la estimación de parámetros presenta los errores que se muestran en la TABLA 13:

TABLA 13. MÉTRICAS DE COMPARACIÓN CALCULADAS SOBRE SEÑALES DE LA FUNCIONES DE ERROR [65] CON LA SOLUCIÓN DE LA METODOLOGÍA

MÉTRICA	VALOR
fitness	0.054789
MSE	0.003225
RMSE	0.054789
RRMSE	0.113%

4.4 Síntesis

Este capítulo muestra la ejecución y resultados de la metodología implementada en 3 escenarios distintos: El primero basado en ondas de simulación con ruido añadido (Transformador), el segundo escenario utilizó medidas experimentales recolectadas en el estado del arte por un artículo (PV) y por último un escenario con datos experimentales con la adquisición de señales reales de una carga en laboratorio (CFL). Finalmente se exponen los resultados que consigue la metodología en los 3 escenarios de estimación utilizando la función fitness general en cada caso particular. La metodología implementada se valida con los resultados y servirá de base para realizar distintos análisis respecto a los posibles dispositivos que se usen en ingeniería eléctrica. Se presenta como metodología ágil para realizar estimación y conocer la carga a partir de topología y flujo iterativo realizado en simulación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En este capítulo se da respuesta a los objetivos de este trabajo de grado y se plantean las conclusiones generales. Se realizan unas recomendaciones en estimación de parámetros eléctricos, se consideran los principales aportes y los posibles futuros trabajos para la comunidad académica.

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presenta la sección de conclusiones, recomendaciones del trabajo y futuros trabajos relacionados a este para continuar su proceso como metodología que aporte en los procesos de estimación en ingeniería.

5.1 Conclusiones Generales

- Una metodología de procesamiento computacional que realiza estimación de parámetros de cargas eléctricas mediante flujos reiterativos conjunto a un software de simulación es implementada. Dicha metodología es implementada con herramientas específicas: herramienta de extracción de datos (opcional) Analog Discovery, herramienta de simulación LTspice y la herramienta de procesamiento-control Python. La herramienta utiliza como técnica de estimación algoritmos genéticos y puede ser utilizada sin necesidad de realizar nuevos modelos matemáticos de dispositivos.
- Se presenta una métrica compuesta de señales como función objetivo que aborda todo el proceso de estimación, la cual es el propósito de la técnica de estimación y contrasta medidas con rendimientos de simulación.
- La validación de la metodología de estimación se realiza a través de tres escenarios distintos con diferentes formas de extracción de datos. Se realiza estimación de un transformador monofásico conociendo los parámetros resultado, un módulo fotovoltaico usando datos experimentales del estado del arte y una bombilla CFL residencial extrayendo los datos de manera experimental con el equipo de adquisición propuesto (Analog Discovery).

5.2 Contribuciones Generales

Las principales contribuciones están centradas en el proceso de realización de estimación de parámetros haciendo uso de software de simulación.

- La herramienta implementada basada en la metodología puede ser usada en cualquier dispositivo eléctrico desde que exista una topología previa eléctrica circuital que se apruebe bajo cualquier software de simulación.
- La metodología da por solución no solo los parámetros de la carga, sino que prácticamente otorga el modelo de simulación listo para implementación y modelado para cualquier otro estudio o ensayo con la carga.
- La herramienta ahorra tiempo de modelados y formulación matemática puntual debido a que permite realizar estimación con un proceso más ágil utilizando los modelos existentes para que haga el mejor ajuste de un modelo circuital (topología) en función de los datos o ensayos realizados del dispositivo físico que se tenga.
- La herramienta fue implementada en escenarios offline para caracterizar y corregir errores de dispositivos, pero se deja abierta la posibilidad para que también pueda ser implementada en escenarios online en donde sea necesario registrar y analizar el comportamiento de un dispositivo eléctrico en tiempo real para observar cualquier eventualidad u objetivo propuesto por el proceso de producción.
- La metodología es versátil también con temas como optimización donde no solo puede ser utilizada en estimación de parámetros, sino que también con propósitos de maximización, minimización de objetivos o métricas objetivo dadas según el caso. En ese sentido la metodología puede ser usada en otras áreas de ingeniería donde se manipulen parámetros con un propósito de diseño basado en la respuesta de un software de simulación.

5.3 Recomendaciones

Se recomienda hacer uso de esta herramienta para realizar modelos ágiles respecto al gasto de modelamiento matemático. En ese sentido se indica la facilidad de usar mayor poder computacional al mismo tiempo que ahorrar prototipos basados en ecuaciones o modelamientos matemáticos ya existentes. Cabe aclarar que la técnica de estimación puede ser cambiada y obtener distintos resultados, ventajas y desventajas según la heurística o forma de convergencia de cada técnica. En el caso de los algoritmos genéticos, estos pueden tener problemas de convergencia relacionados con mínimos locales. Sin embargo, con un ajuste de operadores genéticos como el caso de la tasa de mutación, aún se encuentran relaciones de convergencia favorables como las vistas en el escenario CFL.

Por otro lado, al hacer uso de técnica de simuladores con buen catálogo de productos electrónicos esta metodología se puede extrapolar al diseño electrónico con el fin de iterar recursivamente los modelos propuestos por fabricantes como Analog Devices o Texas Instruments. De esa manera se pueden estimar u optimizar dispositivos o topologías eléctricas basados en modelos de elementos producidos por los propios fabricantes acorde con su hoja de datos se adquiere comercialmente.

Se aclara que esta metodología implícitamente se basa en un modelado matemático, en ese caso un análisis matemático realizado por los ingenieros para simulación de circuitos eléctricos llevados a cabo al entorno computacional como los Netlist de Spice. Sin embargo, explícitamente se basa en resultados de simulación contrastados con datos medidos bajo una función de error según el cambio de parámetros simulados .

Por otra parte, a la hora de realizar estimaciones, hay que tener en cuenta la aplicación para seleccionar la metodología de estimación a utilizar. Por ejemplo, en aplicaciones donde el tiempo sea un factor esencial de precisión (por el orden de milisegundos) como en el caso de estimación online, aplicaciones de calidad de la potencia o análisis de protecciones, donde el tiempo de detección de falla presenta un aliciente y factor principal; se recomienda metodologías de estimación basadas en modelo analíticos o ecuaciones ya que estos se pueden optimizar en cálculos matemáticos o análisis computacional tipo O^2 . En contraste, la metodología propuesta de flujos iterativos de simulación brinda estimaciones u optimizaciones más sencillas de

implementar, pero no tan eficaces respecto al tiempo de cómputo de convergencia para encontrar solución.

5.4 Futuros trabajos

La herramienta iterativa de procesamiento computacional fue utilizada en escenario offline. Sin embargo, el esquema de metodología general CISE permite seguir trabajando por líneas de estimación, pero en nuevos desafíos como su implementación en escenarios online teniendo como base el repositorio con el código implementando offline [21].

La estimación de parámetros se realiza como un método determinístico en este trabajo donde se encuentra una solución que determina su valor bajo unas condiciones dadas. No obstante, el uso de datos y la utilización de estas técnicas de inteligencia artificial basados en heurísticas entregan una inquietud respecto a la veracidad y probabilidad de acierto de las estimaciones. De ese modo con la inclusión de big data y generación de grandes bases de datos se pueden realizar estudios con mayor cantidad de datos que los vistos en los tres escenarios. Así, implementar técnicas estocásticas emergentes respecto a redes neuronales y entrenamientos validados y no válidos de nuevos dataset de las cargas. Como consecuencia se podría llegar a realizar una estimación de parámetros no solo dando el valor solución, sino entregando una razón de acierto o una probabilidad del acierto respecto al valor de sesgo que pueden tener los datos y el sesgo que tienen las estimaciones presentadas a partir de las iteraciones y datos.

Otro futuro trabajo de gran valor es el relacionado con el estudio de variabilidad y dependencia de parámetros a la hora de realizar estimación de parámetros. Es el caso del experimento realizado en el escenario de CFL observando la dependencia del parámetro de resistencia en función del voltaje de entrada. Esta relación se puede ver en el Anexo III: ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EN ESCENARIO CFL, que se encuentra al final de este documento. Este experimento se puede extrapolar y estudiar en otros diversos dispositivos en lo que se pueden formular relaciones de variables que dependen o influyen en la estimación de parámetros. De ese modo será posible estimar generando funciones que permitan analizar los parámetros en

función de estas otras variables que afecten a los dispositivos eléctricos como es el caso de la temperatura, humedad, tensión de trabajo, irradiancia, entre otros.

5.5 Discusión académica

Como resultado inicial de este trabajo se realizó una publicación en un congreso, este trabajo consistió en la caracterización de una topología de red Snubber haciendo uso de algoritmos genéticos. Los temas que se desarrollan en el grupo de investigación GICEP están relacionados con la línea de investigación en modelado y simulación de electrónica de potencia.

Publicaciones en congresos

1. A. F. Guerrero-Guerrero, J. L. Castiblanco-Pasuy, A. J. Ustariz-Farfan, and E. A. Cano-Plata, "Characterization of Parameters of a Non-dissipative Snubber Network Using a Genetic Algorithm," in 2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2019 - Proceedings, 2019, doi: 10.1109/PEPQA.2019.8851548.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. M. Posada, “La Política de Importación Tecnológica en Colombia,” vol. 3, no. 4, pp. 539–570, 1979.
- [2] “Información estadística importaciones: Importaciones en Colombia subieron 3,9% según informe del Dane | Centro Virtual de Negocios - CVN.” [Online]. Available: <https://www.cvn.com.co/informacion-estadistica-importaciones-colombia/>. [Accessed: 28-Oct-2020].
- [3] B. De Sucesos and Y. Estadísticas, “INFORME SECTORIAL SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA Ministerio de Minas y Energía República de Colombia,” 1998.
- [4] “Invierta y Gane con Energía Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014.”
- [5] “Energías alternativas se toman Colombia.” [Online]. Available: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/energias-alternativas-se-toman-colombia/37756>. [Accessed: 28-Oct-2020].
- [6] J. C. Spall, *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*, vol. 65. John Wiley & Sons, 2005.
- [7] S. Andradottir, “Review of simulation optimization techniques,” in *Winter Simulation Conference Proceedings*, 1998, vol. 1, pp. 151–158, doi: 10.1109/wsc.1998.744910.
- [8] “A quick look at Julia, R and Python - knn Example | Towards Data Science.” [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/julia-r-and-python-7cd50c2b0fe4>. [Accessed: 28-Oct-2020].
- [9] J. Blank and K. Deb, “Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89497–89509, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990567.
- [10] M. Fathi and H. Bevrani, *Optimization in Electrical Engineering*. Springer International Publishing, 2019.
- [11] J. Roberts, K. Demarest, and G. Prescott, “What is electrical engineering today and what is it likely to become?,” in *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, 2008, doi: 10.1109/FIE.2008.4720588.
- [12] A. F. Guerrero-Guerrero, J. L. Castiblanco-Pasuy, A. J. Ustariz-Farfan, and E. A. Cano-Plata, “Characterization of Parameters of a Non-dissipative Snubber Network Using a Genetic Algorithm,” in *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2019 - Proceedings*, 2019, doi:

- 10.1109/PEPQA.2019.8851548.
- [13] H. A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, “A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 7, p. 52, 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4312369.
- [14] J. Sun, J. M. Garibaldi, and C. Hodgman, “Parameter estimation using metaheuristics in systems biology: A comprehensive review,” *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.*, vol. 9, no. 1, pp. 185–202, 2012, doi: 10.1109/TCBB.2011.63.
- [15] A. R. Jordehi, “Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 354–371, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.049.
- [16] C. G. Moles, P. Mendes, and J. R. Banga, “Parameter estimation in biochemical pathways: A comparison of global optimization methods,” *Genome Research*, vol. 13, no. 11. Genome Res, pp. 2467–2474, Nov-2003, doi: 10.1101/gr.1262503.
- [17] D. Matajira-Rueda, J. Cruz Duarte, J. Aviña Cervantes, and C. Correa Cely, “Global optimization algorithms applied in a parameter estimation strategy,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 13, no. 1, pp. 233–242, 2018, doi: 10.18273/revuin.v17n1-2018023.
- [18] M. V. Liashov, N. N. Prokopenko, A. A. Ignashin, O. V. Dvornikov, and A. A. Zhuk, “Parametric optimization subsystem in ltspice environment of analog microcircuits for operation at low temperatures,” in *2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2019*, 2019, doi: 10.1109/EWDTs.2019.8884446.
- [19] N. N. Prokopenko, M. V. Liashov, A. V. Bugakova, and A. A. Zhuk, “The Multi-Criteria Optimization in the LTspice Simulation Software of a JFet class AB Buffer Amplifier for Operation at Low Temperatures,” in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019*, 2019, pp. 21–24, doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906871.
- [20] D. Shleifman, R. H. Griffin, A. Dadvand, and T. Y. Chu, “Generic Parameter Extraction of Inkjet-Printed OTFTs via Optimisation Using LTspice and MATLAB,” *2018 Int. Flex. Electron. Technol. Conf. IFETC 2018*, pp. 1–3, 2018, doi: 10.1109/IFETC.2018.8583889.
- [21] J. L. Castiblanco-Pasuy, “johanv26/python_ltspice_GA_estimation: Working repository of estimation tool for electrical devices based on GA.” [Online]. Available: https://github.com/johanv26/python_ltspice_GA_estimation. [Accessed: 03-Feb-2021].
- [22] J. V. Beck and K. J. Arnold, *Parameter estimation in engineering and science*. James Beck, 1977.
- [23] D. G. Luenberger and Y. Ye, *Linear and Nonlinear Programming*, vol. 116. New York, NY: Springer US, 2008.
- [24] “Linear Programming and Network Flows - Mokhtar S. Bazaraa, John J. Jarvis, Hanif

-
- D. Sherali - Google Libros.” [Online]. Available: https://books.google.com.co/books/about/Linear_Programming_and_Network_Flows.html?id=2DKKHvV_xVwC&redir_esc=y. [Accessed: 29-Oct-2020].
- [25] D. P. Bertsekas, “Nonlinear Programming,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 48, no. 3, pp. 334–334, Mar. 1997, doi: 10.1057/palgrave.jors.2600425.
- [26] H. Salkin, *Foundations of integer programming*. New York: North-Holland, 1989.
- [27] “Integer Programming | Wiley.” [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Integer+Programming-p-9780471283669>. [Accessed: 28-Oct-2020].
- [28] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. .
- [29] E. L. Peterson, “Geometric Programming,” in *Advances in Geometric Programming*, Springer US, 1980, pp. 31–94.
- [30] A. I. Galushkin, *Neural network theory*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [31] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [32] F. Rothlauf, “Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms,” in *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 9–32.
- [33] M. Bakr, *NONLINEAR OPTIMIZATION IN ELECTRICAL ENGINEERING WITH APPLICATIONS IN MATLAB®*. .
- [34] J. A. Taylor, *Convex Optimization of Power Systems*. Cambridge University Press, 2015.
- [35] S. L. Sabat, K. S. Kumar, and S. K. Udgata, “Differential evolution and swarm intelligence techniques for analog circuit synthesis,” in *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings*, 2009, pp. 469–474, doi: 10.1109/NABIC.2009.5393356.
- [36] G. Alpaydin, S. Balkir, and G. Dünder, “An evolutionary approach to automatic synthesis of high-performance analog integrated circuits,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 7, no. 3, pp. 240–252, Jun. 2003, doi: 10.1109/TEVC.2003.808914.
- [37] “Fundamentals of optimization techniques in analog IC sizing,” in *Studies in Computational Intelligence*, vol. 501, Springer Verlag, 2014, pp. 19–40.
- [38] D. Dvorak, T. Bauml, A. Holzinger, and H. Popp, “A Comprehensive Algorithm for Estimating Lithium-Ion Battery Parameters from Measurements,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 771–779, 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2761406.
- [39] J. C. Gelvez and A. Ramirez, “Measurement-based characterization of residential lighting devices: CFL and LED,” *2017 North Am. Power Symp. NAPS 2017*, 2017, doi:

- 10.1109/NAPS.2017.8107190.
- [40] M. W. Cohen, M. Aga, and T. Weinberg, "Genetic algorithm software system for analog circuit design," in *Procedia CIRP*, 2015, vol. 36, pp. 17–22, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.033.
- [41] E. Tlelo-Cuautle *et al.*, "Applications of evolutionary algorithms in the design automation of analog integrated circuits," *J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 17, pp. 1859–1872, 2010, doi: 10.3923/jas.2010.1859.1872.
- [42] "Parameter Estimation - an overview | ScienceDirect Topics." [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/parameter-estimation>. [Accessed: 29-Oct-2020].
- [43] M. S. Rafaq and J. W. Jung, "A Comprehensive Review of State-of-the-Art Parameter Estimation Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors in Wide Speed Range," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4747–4758, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2944413.
- [44] W. MohamedAly, "Analog Electric Circuits Synthesis using a Genetic Algorithm Approach," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 121, no. 4, pp. 28–32, Jul. 2015, doi: 10.5120/21530-4523.
- [45] D. B. Fogel, "The Advantages of Evolutionary Computation.," in *BCEC*, 1997, pp. 1–11.
- [46] P. Ponce Cruz, *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alfaomega, 2011.
- [47] "Analog Discovery 2 [Digilent Documentation]." [Online]. Available: <https://reference.digilentinc.com/reference/instrumentation/analog-discovery-2/start>. [Accessed: 02-Feb-2021].
- [48] A. V Oppenheim, R. W. Schafer, and J. R. Buck, "Tratamiento de señales en tiempo discreto," 2011.
- [49] R. P. Areny, *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo, 1993.
- [50] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, "Digital signal processing," *PHI Publ. New Delhi, India*, 2004.
- [51] "LTspice | Design Center | Analog Devices." [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>. [Accessed: 02-Feb-2021].
- [52] M. L. González, *LTspice*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2020.
- [53] M. Engelhardt, "SPICE Differentiation," *LT J. Analog Innov.*, no. January, pp. 10–16, 2015.

-
- [54] A. Vladimirescu, *The SPICE book*. Wiley New York, 1994.
- [55] H. W. Dommel, “Techniques for analyzing electromagnetic transients,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 10, no. 3, pp. 18–21, Jul. 1997, doi: 10.1109/67.595285.
- [56] Q. I. Rahman and G. Schmeisser, “Characterization of the speed of convergence of the trapezoidal rule,” *Numer. Math.*, vol. 57, no. 1, pp. 123–138, 1990.
- [57] C. W. Gear, “Initial value problems: practical theoretical developments,” Mar. 1979.
- [58] C. A. Thompson, “A STUDY OF NUMERICAL INTEGRATION TECHNIQUES FOR USE IN THE COMPANION CIRCUIT METHOD OF TRANSIENT CIRCUIT ANALYSIS.”
- [59] T. P. Santamaría, *Electrónica digital*. Prentice Hall de Zaragoza, 1994.
- [60] “History and License — Python 3.9.1 documentation.” [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/license.html>. [Accessed: 02-Feb-2021].
- [61] W. McKinney, “pandas: a foundational Python library for data analysis and statistics,” *Python High Perform. Sci. Comput.*, vol. 14, no. 9, 2011.
- [62] “ltspice · PyPI.” [Online]. Available: <https://pypi.org/project/ltspice/>. [Accessed: 31-Oct-2020].
- [63] I. L. Spigariol, “Fundamentos teóricos de los Paradigmas de Programación Buenos Aires-Abril 2005.”
- [64] “Measuring API Usability | Dr Dobb’s.” [Online]. Available: <https://www.drdoobbs.com/windows/measuring-api-usability/184405654>. [Accessed: 02-Feb-2021].
- [65] M. Despotovic, V. Nedic, D. Despotovic, and S. Cvetanovic, “Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 246–260, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.058.
- [66] D. / Oe and / Iser, “Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid FOR FURTHER INFORMATION,” 2014.
- [67] C. E. Lin, J. M. Ling, and C. L. Huang, “An expert system for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 1, pp. 231–238, 1993, doi: 10.1109/61.180341.
- [68] L. Niemeyer, “A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 4, pp. 510–528, 1995, doi: 10.1109/94.407017.
- [69] Z. Zhang, N. Kang, and M. J. Mousavi, “Real-time transformer parameter estimation using terminal measurements,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015-Sept, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7285958.

-
- [70] A. McEvoy, L. Castaner, and T. Markvart, *Solar cells: materials, manufacture and operation*. Academic Press, 2012.
- [71] Z.-S. Li, G.-Q. Zhang, D.-M. Li, J. Zhou, L.-J. Li, and L.-X. Li, “Application and development of solar energy in building industry and its prospects in China,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 8, pp. 4121–4127, 2007.
- [72] P. M. Cuce and E. Cuce, “A novel model of photovoltaic modules for parameter estimation and thermodynamic assessment,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 159–165, 2012, doi: 10.1093/ijlct/ctr034.
- [73] F. F. Muhammad, A. W. Karim Sangawi, S. Hashim, S. K. Ghoshal, I. K. Abdullah, and S. S. Hameed, “Simple and efficient estimation of photovoltaic cells and modules parameters using approximation and correction technique,” *PLoS One*, vol. 14, no. 5, May 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0216201.
- [74] S. A. Afghan, H. Almusawi, and H. Geza, “Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model,” *MATEC Web Conf.*, vol. 126, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201712603002.
- [75] Z. Wei, N. R. Watson, and L. P. Frater, “Modelling of compact fluorescent lamps,” in *ICHQP 2008: 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2008, doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668833.
- [76] R. A. Jabbar, M. al-Dabbagh, A. Muhammad, R. H. Khawaja, M. Akmal, and M. Arif, “Impact of compact fluorescent lamp on power quality,” *undefined*, 2008.
- [77] Z. Wei and B. E. Hons, “Compact Fluorescent Lamps phase dependency modelling and harmonic assessment of their widespread use in distribution systems,” 2009.
- [78] “IEC 61000-3-2:2018 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase),” 1997. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/3b48ae97-3d70-455f-8ab5-40510a42744f/iec-61000-3-2-2018>. [Accessed: 31-Oct-2020].
- [79] J. Molina and L. Sainz, “Model of electronic ballast compact fluorescent lamps,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, pp. 1363–1371, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2284095.
- [80] “Comparativa: software de simulación electrónica | Blog personal: César Sánchez Meléndez.” [Online]. Available: <https://blog.uclm.es/cesarsanchez/2017/10/29/software-de-simulacion-electronica/>. [Accessed: 31-Oct-2020].

ANEXO I

I. MANUAL Y GESTIÓN DE LA HERRAMIENTA

I.1 Manual de utilización de la herramienta.

PYTHON-LTSPICE-GA-ESTIMACIÓN

Repositorio de trabajo de herramienta de estimación de dispositivos eléctricos basada en GA ([python-ltspice-GA-estimacion](#)).

La metodología interconecta técnicas de estimación en un lenguaje de programación (Python) con un programa de simulación (LTspice). La estimación se basa en simulaciones iterativas que se comparan con una entrada o medidas hasta hallar los parámetros de salida.

Conocimientos previos recomendados

Para la utilización del repositorio se recomienda tener formación o conocimiento en las siguientes temáticas:

- Modelado y simulación en electrónica de potencia.
- Herramienta de simulación LTspice.
- Lenguaje de programación Python.

Instalación

1. Herramienta compatible con sistema operativo [Windows 10](#).
2. Instalar [Ltspice XVII](#) en Windows 10.
3. Instalar [Python 3.7](#) o superior.
4. Se recomienda instalar el paquete de manejo o núcleo [AnaConda](#) que incluye Spyder para mayor facilidad de manejo de datos en optimización y estimación.
5. Use el administrador de paquetes [pip](#) para instalar la librería [ltspice](#).

`pip install ltspice`

6. Descargar repositorio de trabajo [python-ltspice-GA-estimacion](#) con código fuente de la herramienta en Github.

Uso

Para la utilización de este repositorio se debe tener instalada la herramienta según los pasos previos del ítem anterior. La herramienta se basa en estimar los parámetros de dispositivos eléctricos a partir de un modelo eléctrico de simulación. Por tal motivo el código principal utiliza como base la formulación de un circuito de simulación en netlist para estimar.

El proceso se basa en la ejecución del archivo principal *main_general_estimator.py*. Este script principal se compone de 3 secciones: Sección de ingresar señales adquiridas en modelo de trabajo. Sección de ajuste de ambiente y condiciones de simulación con la clase de procesamiento. Y por último la sección de estimación por medio del algoritmo genético.

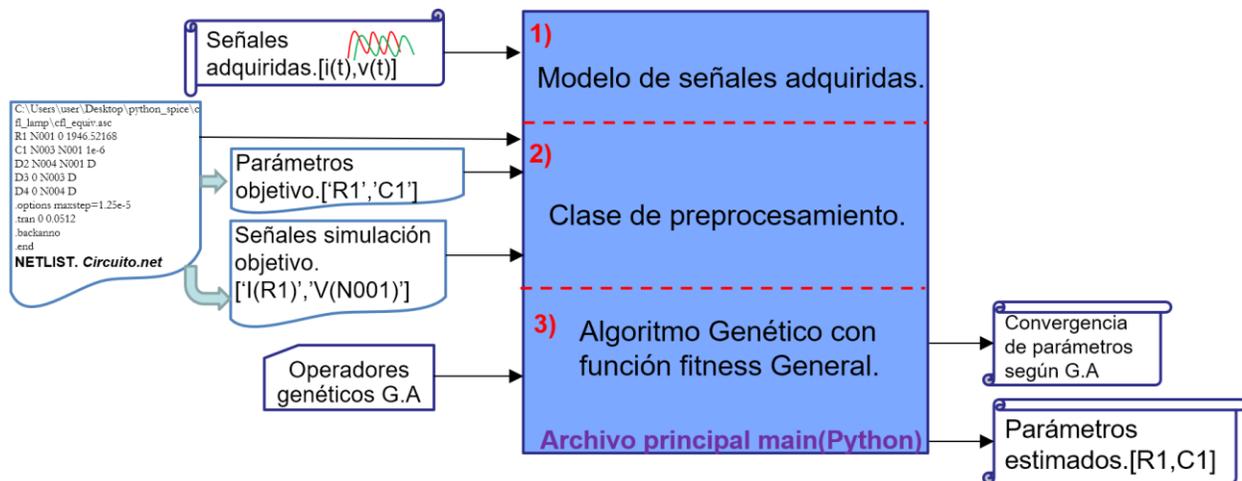


Figura 33. Diagrama de utilización de script principal para realizar estimación por simulaciones iterativas.

1) Modelo de señales adquiridas.

En esta sección se crea el modelo de medidas a partir de la clase Model. Esta clase permite leer señales medidas guardadas en formato *.csv*. De esa forma, se entregan como argumento de entrada el nombre del archivo para adquirir las dos instancias principales del modelo: tiempo y lista de señales. Por otra parte, la clase tiene un parámetro como bandera opcional *measure=True*,

que en valor de True indica que el modelo tiene las señales base , se guardara y se usara como referencia durante todo el proceso de estimación.

```
%%Measure data recolection model class
```

```
signals_file='values_noise.csv'
n=4

signal_name=['v1','i1','v2','i2']
measure=Model.read_csv_signal(signals_file,4)
measure_model=Model(measure.time,measure.signals[1:],measure=True)
```

2) Clase de preprocesamiento para simulación

Esta clase configura el escenario de simulación y las características para realizar los flujos iterativos. Para ello se ingresan el mapa del circuito en LTspice como el netlist y el archivo de graficas con extensión *.raw*. Se incluye un vector que indica los parámetros objetivo en string con el nombre correspondiente que poseen en el netlist. Por último, se ingresan las señales en el formato visto según LTspice. Es el caso de corrientes y tensión usando corriente de elemento *I(R1)* y definición de tensión de nodo *V(n004)*. Estas señales se analizan por el usuario para que correspondan con las señales adquiridas para contrastar una por una por la métrica fitness.

```
%%Pre process class to configure the case
```

```
sim_name='trafo_single'
sim_raw='/' + sim_name + '.raw'
netlist_path= r'C:\Users\user\Desktop\python_spice\trafo\trafo_single.net'
parameters=['R1','R2','L1','L2','L3']
signals2=['I(R1)','V(n004)','I(L4)']

simu_data=SimulationInfo(netlist_path,sim_raw,parameters,signals2,norm=True)
```

3) Método de algoritmo genético(G.A)

En esta sección se definen las características para trabajar o dar convergencia de la estimación según el algoritmo genético.

Se declara la función objetivo o fitness que utilizará el algoritmo genético. Para ello se utiliza la función fitness general expuesta anteriormente.

Por último, se definen los operadores genéticos y parámetros de un algoritmo genético. Es el caso del tamaño de la población, tasa de cruce, tasa de mutación, bits de definición, criterio de parada en iteraciones. También se incluye la información relacionada con los parámetros y su búsqueda, es el caso de indicar el número de parámetros y el rango de las variables para realizar el proceso de estimación.

```
##%-----GA-----
popu_size=100
xover_rate=0.98
mut_rate=0.02
bit_n=10
stop_criteria=20
fitness_fcn= 'fitnessGeneral'
var_n=5
rango=np.array([[1e-3,10],
                [1e-3,2000],
                [1e-6,2],
                [1e-6,2],
                [1e-6,2]])
```

```
popu,upper=geneticAlgorithm(fitness_fcn, var_n, rango, popu_size, xover_r
ate,
                           mut_rate, bit_n, stop_criteria)
```

Autores y reconocimiento

Este repositorio fue desarrollado por Johan Castiblanco, ingeniero electrónico. Se reconoce al grupo de investigación GICEP de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, por su formación y acompañamiento en temáticas relacionadas con electrónica de potencia y modelado y simulación. Se agradece también por la colaboración a los doctores Andres Felipe Guerrero y Armando Ustariz en el proceso.

Licencia

MIT

I.2 Netlist de escenarios de LTspice

A continuación, se exponen los Netlist de los escenarios validados por este trabajo de grado. En color rojo se diferencian los parámetros que el algoritmo de control modifica y envían como “strings” y que van iterando en cada simulación en LTspice. El valor numérico que se muestra en este color también corresponde al parámetro final o solución que propone este trabajo de grado.

II.2.1 Netlist de LTspice de escenario de Transformador

```
* C:\Users\user\Desktop\python_spice\_trafo\trafo_single.asc
R1 N001 N002 1.28142
L1 N002 N003 0.007821132942326491
V1 N001 0 SINE(0 3398.2945299964877 60)
R2 N003 0 1012.7082160312805
R3 N005 0 100
L2 N003 0 0.9931578836754644
L3 N004 0 0.009776166177908113
L4 N004 N005 0.2m
.tran 6.510416666666664e-05 0.04993489583333333 0
K L2 L3 1
.options
.backanno
.end
```

Figura 34. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso transformador

II.2.2 Netlist de LTspice de escenario de modulo fotovoltaico

```
* C:\Users\user\Desktop\python_spice\pv_single_diode\pv.asc
R1 N001 0 2887.1
R2 N001 N002 0.16239
D1 N001 0 DPV
V1 N002 0 0
I1 0 N001 0.02646
.model DPV D(Is=1.2984e-10 N=4.1216 Tnom=20)
.lib C:\Users\user\Documents\LTspiceXVII\lib\cmp\standard.dio
.dc V1 0.0 2.0 0.010000000000000002
.backanno
.end
```

Figura 35. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso módulo fotovoltaico.

II.2.3 Netlist de LTspice de escenario CFL

```
* C:\Users\user\Desktop\python_spice\cfl_lamp\cfl_equiv.asc
R1 N001 0 1946.52168
D1 N003 N001 D
D2 N004 N001 D
D3 0 N003 D
D4 0 N004 D
C1 N001 0 12.017359e-6
R2 N002 N003 18.8819
V1 N002 N004 SINE(0 170.83060321432882 60 0 0 -240.84000000000003)
.model D D
.lib C:\Users\user\Documents\LTspiceXVII\lib\cmp\standard.dio
.options maxstep=1.25-5
.tran 0 0.0512
.backanno
.end
```

Figura 36. Configuración Netlist de individuo solución de metodología de estimación de parámetros caso CFL.

ANEXO II

II. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS

II.1 Selección de herramienta de simulación

II.1.1 Simuladores eléctricos de circuitos

Los simuladores eléctricos son una herramienta informática que permite reproducir sobre un computador el funcionamiento de circuitos eléctricos y electrónicos.

Un simulador eléctrico reproduce el comportamiento físico real de los circuitos y su comportamiento eléctrico. Esto se realiza a través de tensión e intensidades en las diversas ramas que componen el circuito disponiendo su respuesta a lo largo del tiempo. De tal manera se encuentra la respuesta real del circuito respecto a las distintas señales de entrada en donde se ve su respuesta en término como transitorios reales con distintas métricas como respuesta temporal, respuesta en frecuencia, barrido de valor DC, entre otros.

Los simuladores eléctricos se procesan a través del nivel eléctrico para ello utilizan las leyes de Kirchhoff para el análisis en nodos y mallas. Con ecuaciones de la forma $I = f(V)$ describen el comportamiento de los componentes circuitales. Para ello solucionan gran número de ecuaciones a través de matrices con relaciones I-V no necesariamente lineales, así basando en el cálculo de transitorios punto a punto a lo largo del eje del tiempo usando reglas como la trapezoidal [56]. Lo anterior conlleva a tiempo de cálculo (Tiempos de CPU) y capacidades de memoria (RAM)

El análisis de circuitos eléctricos por medio de simuladores eléctricos se caracteriza por [59]:

- Facilita el análisis de comportamientos de temporizadores, osciladores, multivibradores, en pocas palabras de cualquier etapa con retroalimentación.

- Permite el cálculo de en cada uno de los elementos que componen el circuito como su comportamiento temporal (transitorios, oscilaciones, tiempos de propagación, anticipación, mantenimiento, entre otros)
- Permite el cálculo de respuesta en casos digitales como respuesta en frecuencia(slew rate).
- En la práctica es una de las herramientas más efectiva para el modelamiento de circuitos analógicos.
- Presenta dificultades por razones de tiempo y memoria en cuanto a la complejidad con circuitos de enormes componentes, no obstante, con la evolución de la computación también se mejora la capacidad de abordar topologías más complejas.

La mayoría de estos están basados en el motor de Spice o con reglas de integración implementadas por sus propios lenguajes de programación con el cual trabajan conjuntamente como es el caso de Simulink con Matlab.

Para seleccionar la herramienta de simulación es de primordial importancia la facilidad para acceder y manipular los parámetros para simulación. Adicionalmente se debe tener en cuenta el tipo de licencia y las limitaciones de los softwares de simulación para seleccionar una herramienta que permita acercarse tanto a dispositivos de sector comercial como a la facilidad para implementar y ejecutar simulación sin tener que preocuparse por software de pago o licencias más restrictivas.

De ese modo en la TABLA 14 se presenta un resumen de algunas herramientas de simulación de transitorios [80] utilizados en ingeniería eléctrica tanto en área académica como laboral. Estos softwares presentan características para ser utilizados en el desarrollo de la metodología.

A partir de análisis comparativo y cualitativo de la TABLA 14, se selecciona la herramienta LTspice para la elaboración de la metodología. Se aclara que cualquiera de los simuladores puede ser usados teniendo en cuenta el propósito y restricciones correspondientes.

TABLA 14. COMPARACIÓN DE SIMULADORES ELÉCTRICOS DE USO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

SIMULADOR	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUIDOR	VERSIÓN
Simulink	Simulink es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).	Mathworks	Software propietario
NI Multisim	Hace parte del set de simulación NI Ultiboard. Está basado por el motor desarrollado en Berkeley de Spice. Incluye simulación de microcontroladores y se pueden exportar sus capas a software de PCB de NI Ultiboard. Su uso es muy común en la academia, en la industria de circuitos para educación y simulación Spice.	National Instruments	Software propietario
Pspice-OrCAD	Creado por la empresa orCad también conocido con ese mismo nombre. Combina las nociones de simulación para procesos análogos nativos, digitales, señales mixtas, un motor para desarrollar la completa simulación y posee verificación de solución. Tiene versión Lite para uso gratuito enfocado principalmente para alcance académico.	Cadence	Software propietario
SPICE-Based Analog Simulation TINA	Programa de simulación potente que permite simulación Spice y diseño de PCB para análisis y testeo en tiempo real de circuitos análogos, digitales o mixtos. usar, basado en un motor de SPICE. Es un método de simulación desarrollado por la universidad de California Berkeley desde 1973.	Texas Instrument	Software propietario, aunque con versión gratuita TINA-TI
LTspice XVII	LTspice es un simulador potente y de alto rendimiento con la facilidad de aplicar una interfaz gráfica para usar el motor de Spice. Fue desarrollado por Linear Technologies inicialmente, actualmente Analog Devices. Debido a que es freeware, artificialmente no esta sujeto a límites de capacidad (límite de nodos, límite de componente, límite de subcircuitos).	Linear Technology Analog Devices	Freeware
Qucs	Uno de los primeros programas con licencia abierta en el campo de simuladores electrónicos. Fue diseñado para ser amigable su utilización y cuenta con gran ventaja la de ser multiplataforma y ser instalado en múltiples sistemas operativos. Sopor simulación de circuitos digitales y de circuitos en modo de pequeña señal, gran señal y ruido eléctrico.	GNU/Linux systems	GNU
Proteus	Aplicación para la ejecución de proyectos de construcción de equipos electrónicos en todas sus etapas: diseño del esquema electrónico, programación del software, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción.	Labcenter Electronics	Software propietario
EMTP-ATP	Es un software de simulación diseñado especialmente para el análisis de circuitos eléctricos especialmente en régimen transitorio. Permite modelar sistemas eléctricos, mecánicos y de control, monofásico, polifásicos, entre otros.	EEUG "European EMTP-ATP Users Group"	Licencia gratis en ATP bajo aceptación del grupo EEUG

II.1.2 Herramienta de Simulación LTspice

LTspice es un software de simulación basado en SPICE desarrollado y mantenido por Linear Technologies (Anexo3), actualmente Analog Devices. Permite simulación de alto desempeño, visualización de formas de onda y captura de esquemáticos para facilitar el desarrollo de modelos de simulación de circuitos análogos. Incluye grandes librerías y macro modelos de la mayoría de dispositivos análogos como reguladores conmutadores, amplificadores y diversidad de librería basada en su empresa de desarrollo y soporte [52].

Adicionalmente, LTspice cuenta con ventajas respecto al resto de simuladores existentes que usan motor Spice, que aunque LTspice no fue la primera implementación de Spice y no es la única de licencia libre, es considerado como el mejor y más extenso en implementación [53], entre sus ventajas se encuentran las siguientes:

- Mejor desempeño en iteración de Newton para encontrar soluciones de elementos lineales.
- Mejores métodos de Sparse Matrix, lo que conlleva una mejor administración de direccionamiento de espacio de matrices de gran tamaño para ser usado en computadores prácticos.
- Integración Implícita que permite integrar ecuaciones diferenciales para plantear reactancias de circuitos.

Su selección también se basó en su tipo de licencia freeware que, aunque no es GNU que permite su modificación interna (programación interna) si se permite usar y manipular los circuitos que se desarrollen sobre este. Aparte de ser mantenido por una empresa como Analog Devices, una manufacturera de dispositivos integrados y elementos electrónicos que provee de varios modelos SPICE. Esto permite utilizarlo en escenarios de estimación de dispositivos y de optimización en diseño y rendimiento de topologías.

Por último, al estar basado en Spice el simulador LTspice XVII permite interactuar con los circuitos a través de Netlist para su manipulación de parámetros y se puede manipular con los flujos iterativos que dispone la metodología de estimación propuesta.

II.2 Selección herramienta de procesamiento de señales-algoritmo

Para la selección de la herramienta procesamiento se tienen en cuenta su uso como centro de control. De ese modo, existen diversos lenguajes de programación que pueden aportar en la implementación y control de ejecución de otras aplicaciones.

No obstante, en el área de la ingeniería existen lenguajes que cuentan con una comunidad y licencia que colaboran a la hora de sumergirse en el área de estimación de parámetros. Considerando lo anterior, se selecciona Python como lenguaje, el cual tiene una comunidad con un amplio desarrollo en la ciencia de datos y con ello en la aplicación computacional donde se encuentran diversas librerías y entorno enfocados de la inteligencia artificial. Estas características contribuyen en la selección de algoritmos o técnicas de estimación–optimización. De esa manera, se facilita el desarrollo de construcción de métricas de convergencia presentes en los problemas de manipulación de parámetros de dispositivos eléctricos vistos en ingeniería eléctrica.

Herramienta de programación Python

Python es un lenguaje de integración interpretado que tiene como énfasis la legibilidad del código. Este lenguaje de programación posee distintos paradigmas de programación de enfoque, entre ellos se encuentra orientación a objetos, enfoque imperativo y en menor medida programación funcional [8].

Este lenguaje es administrado por Python Software Foundation y posee una licencia de código abierto denominada con el mismo nombre Python Software Foundation.

Por otra parte, se aprovecha que luego de haber seleccionado LTspice como software de simulación existe una librería de extracción de datos de este simulador para manipulación en Python.

II.3 Selección de herramienta para extracción de datos

La adquisición de datos es flexible respecto a la naturaleza de obtener información de los dispositivos eléctricos. De esa forma no es tan importante la forma de extracción, lo importante es contar con la información eléctrica (señales o valores de tensión y corriente) para poder contrastar o validar los procesos de estimación de simulación con estas medidas. Por otra parte

debido al uso de circuitos como método de estimación con su respectivo equivalente de simulación en un computador, este trabajo recomienda hacer uso del dispositivo Analog Discovery por sus ventajas en una implementación relacionadas con estimación online debido a su conexión por medio USB a un computador de control para registro de las señales medidas.

II.3.1 Analog Discovery 2

Analog Discovery 2 es un instrumento multifunción desarrollado por DIGILENT que permite a los usuarios medir, visualizar, generar, guardar y controlar señales de varios tipos. Tiene dimensiones pequeñas y es portable por lo que puede ser guardado en un bolsillo. No obstante, tiene el potencial de reemplazar en algunos escenarios equipos de laboratorios de ingeniería eléctrica relacionados con visualización de señales como los osciloscopios. Tiene entradas y salidas que pueden ser usadas con simples puntas de pruebas o BNC de osciloscopio que permite registro de señales digitales y análogas.

Este dispositivo permite transferir sus señales por medio de puerto USB a un computador haciendo uso de un software también producido por DIGILENT llamado Waveforms.

II.3.2 Waveforms

Waveforms es un software libre que multiplataforma que puede trabajar en sistemas Windows, Mac OS, Linux y ARM. Su función radica en interconectar por medio de USB osciloscopios portables, analizadores lógicos y generadores de funciones. Es el caso de productos como Analog Discovery 2, Analog Discovery Studio, Digital Discovery, Electronics Explorer Board, entre otros.

Este software acoplado con instrumentación de hardware brinda un portafolio potente para trabajar en campos como diseño digital y análogo en un computador personal. Posee una interfaz para cada instrumento que facilita adquirir, visualiza, analizar, producir y reutilizar las señales eléctricas.

ANEXO III

III: ANÁLISIS DE VARIABILIDAD EN ESCENARIO CFL

Debido a la versatilidad del escenario se plantea una hipótesis respecto a la variabilidad de los parámetros estimados en función de un cambio de la señal de entrada, de ese modo teniendo en cuenta que el CFL se puede conectar a tensión de red, se puede observar si existe variación del comportamiento de sus parámetros respecto al cambio de la señal de tensión de entrada. Partiendo de lo anterior se realizó un muestreo de tensión de alimentación desde 125 V disminuyendo valores de a 5 V por motivos de precisión con el fin de observar el comportamiento de los parámetros en la estimación. Se aclara que la disminución no se puede realizar hasta 0 voltios debido a que el CFL presenta una tensión umbral de trabajo, en ese caso se disminuyó hasta 75 V.

En la TABLA 15 se muestran los resultados de los parámetros encontrados haciendo un cambio de la tensión de entrada haciendo uso de un autotransformador o Variac. De esa manera se puede graficar la relación entre parámetros y cambio de tensión de excitación. Cabe aclarar que, si no existiera dependencia con la tensión, los parámetros se mantendrían fijos y se obtendría una relación constante. Sin embargo, se encuentra variación del valor de cada parámetro encontrado contra cambio de tensión de entrada.

TABLA 15. REGISTRO DE CONVERGENCIA DE PARÁMETROS CFL EN CON MUESTREO DE TENSIÓN DE 5V

Tension(V)	Fitness	Rd(Ω)	R(Ω)	C(μF)
120	3.63495833	1946.52137	18.8819776	12.0173596
110	3.36434445	1723.28411	22.7878965	11.6053701
105	3.31130468	1978.25982	17.7376654	9.89942852
100	3.53631315	1402.69527	49.8241794	8.37048981
95	3.3796998	1144.5152	10.4445823	10.1756141
90	3.98122954	1220.65696	45.872488	8.91523145
85	3.28617969	1163.89396	21.5825544	8.08820073
80	4.26183178	753.582966	7.7134905	12.4003572
75	3.81552922	760.14428	21.7046143	8.20416814

Esto conlleva la posibilidad de ver relaciones entre los parámetros para así establecer funciones

de dependencia del criterio de estimación como una función $f(v)$. Para ello, se grafican en Figura 37 los resultados de estimación de los parámetros obtenidos según el cambio de tensión para encontrar su posible relación.

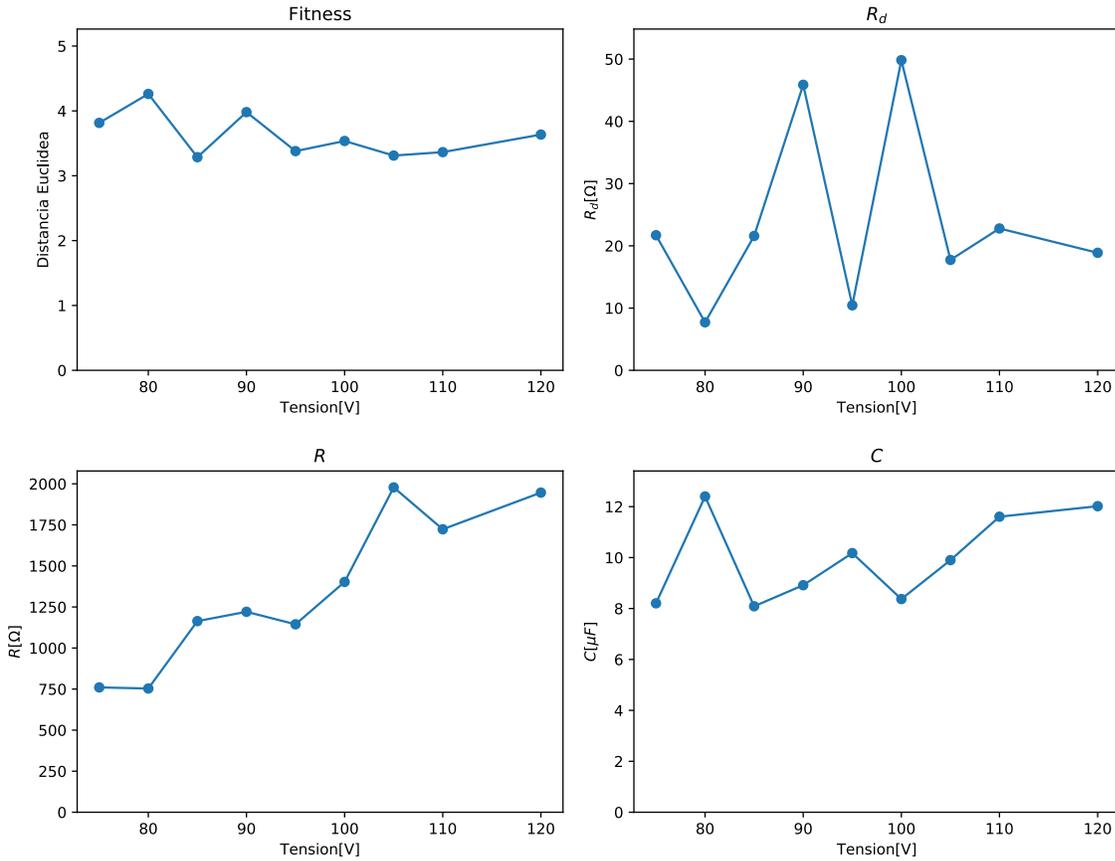


Figura 37. Relación de estimación de parámetros CFL respecto a muestra de tensión.

De la gráfica se observa que se encuentran funciones con complejidad de modelado analítico, no obstante, con el parámetro R se puede aproximar una relación con la tensión por medio de una función $f(V)$ lineal. De esa manera se encuentra la línea de tendencia de una regresión lineal con coeficiente de correlación $r^2 = 0.8709$ definida en la ecuación (28):

$$R(v) = 29.23v - 1449.4 \quad (28)$$

En la Figura 38 se observa que este parámetro R, pese a la baja cantidad de muestras, expresa una función de dependencia lineal respecto a la tensión de alimentación durante el proceso de estimación.

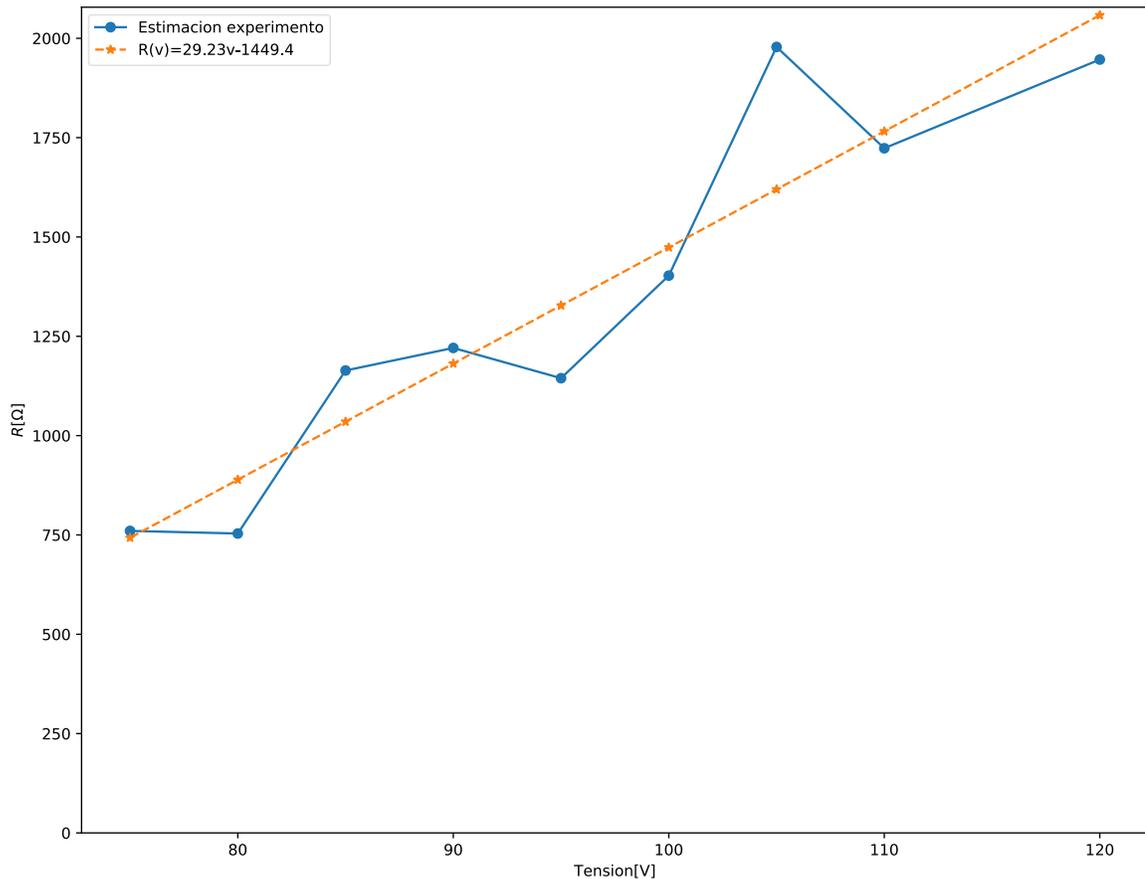


Figura 38. Grafica de función de estimación parámetro R(V) de carga CFL con grafica de estimación de la metodología.

Por otra parte, las demás variables podrían ser mejor expresadas si se tomara un paso de tensión(dv) menor y preciso en las medidas para alcanzar mayor cantidad de puntos. De ese modo, se podría utilizar la metodología para realizar una estimación de parámetros de tipo función que dependan de otras variables y otorguen más precisión a los modelos, en contraste con la típica estimación de parámetros de valor fijo y constante.