

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN TIPO BENCHMARK DE UNA MICRO-RED  
HÍBRIDA EN AC/DC BASADO EN CO-SIMULACIÓN PIECEWISE LINEAR  
ELECTRICAL CIRCUIT SIMULATION (PLECS) Y MATLAB/SIMULINK.**





**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN TIPO BENCHMARK DE UNA MICRO-RED  
HÍBRIDA EN AC/DC BASADO EN CO-SIMULACIÓN PIECEWISE LINEAR  
ELECTRICAL CIRCUIT SIMULATION (PLECS) Y MATLAB/SIMULINK.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: CHRISTOPHER FERNANDO GÓMEZ SALAZAR

TUTOR: LEONY ORTIZ MATOS

Quito -Ecuador

2023

Christopher Fernando Gómez Salazar

**SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN TIPO BENCHMARK DE UNA MICRO-RED HÍBRIDA EN AC/DC BASADO EN CO-SIMULACIÓN PIECEWISE LINEAR ELECTRICAL CIRCUIT SIMULATION (PLECS) Y MATLAB/SIMULINK.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Christopher Fernando Gómez Salazar (Y'1998 – M'02).** Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Federico Engels de la ciudad de Quito. Egresado de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en simulación y validación tipo benchmark de una Micro-red híbrida en AC/DC basado en co-simulación PLECS y Matlab/Simulink. [cgomez4@est.ups.edu.ec](mailto:cgomez4@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Leony Ortiz Matos (Y'1982).** Recibió el título de MSc. e Ingeniería en Automática por el Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) de la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana-Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador. Sus principales intereses de investigación Automatización y Control, Control robusto y Control Tolerante a Fallos, Micro-redes Eléctricas Inteligentes híbrida, CA/CC. [lortiz@ups.edu.ec](mailto:lortiz@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Christopher Fernando Gómez Salazar con documento de identificación N<sup>o</sup> 1722216692 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 de diciembre del año 2023

Atentamente,



---

Christopher Fernando Gómez Salazar

1722216692

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Christopher Fernando Gómez Salazar con documento de identificación N<sup>o</sup> 1722216692, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Simulación y validación tipo benchmark de una micro-red híbrida en AC/DC basado en co-simulación Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) y Matlab/Simulink”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de diciembre del año 2023

Atentamente,



---

Christopher Fernando Gómez Salazar

1722216692

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Leony Ortiz Matos con documento de identificación N<sup>o</sup> 1754230389, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN TIPO BENCHMARK DE UNA MICRORED HÍBRIDA EN AC/DC BASADO EN CO-SIMULACIÓN PIECEWISE LINEAR ELECTRICAL CIRCUIT SIMULATION (PLECS) Y MATLAB/SIMULINK, realizado por Christopher Fernando Gómez Salazar con documento de identificación N<sup>o</sup> 1722216692, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de diciembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Leony Ortiz Matos, Ph.D

1754230389

## ÍNDICE GENERAL

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introducción .....   | 2  |
| 2     | Marco teórico .....  | 3  |
| 2.1   | Micro-red.....   | 3  |
| 2.1.1 | Tipologías de Micro-redes.....   | 3  |
| 2.2   | Simulación digital para Micro-redes eléctricas .....   | 4  |
| 2.3   | Simulación digital para Micro-redes Híbridas en PLECS .....                                    | 4  |
| 2.3.1 | Ventajas y desventajas de la simulación en PLECS.....  | 4  |
| 2.4   | Co-simulación digital.....   | 5  |
| 2.5   | Sistemas tipo Benchmark.....   | 5  |
| 3     | Metodología .....  | 5  |
| 3.1   | Sistema de almacenamiento de energía por baterías (SAEB).....                                  | 6  |
| 3.2   | Sistema solar fotovoltaico (SF).....   | 7  |
| 3.3   | Inversores de voltaje CA/CC.....   | 7  |
| 3.4   | Cargas.....  | 8  |
| 3.4.1 | Cargas Lineales.....   | 8  |
| 3.4.2 | Cargas No Lineales .....   | 8  |
| 3.5   | Método de cálculo .....  | 8  |
| 4     | Caso de estudio.....   | 8  |
| 5     | Análisis de resultados.....  | 10 |
| 5.1   | Análisis de Perfiles de voltaje .....  | 10 |
| 5.2   | Balance de potencia activa por barra.....  | 13 |
| 5.3   | Potencia reactiva por barra y análisis angular .....   | 14 |
| 5.4   | Pérdidas de potencia por línea.....  | 16 |
| 5.5   | Factor de potencia por bus .....   | 18 |
| 5.6   | Índice de Distorsión Armónica (TDH) por bus.....   | 20 |
| 5.7   | Diferencias ente la simulación Matlab/Simulink y la co-simulación PLECS y Matlab/Simulink..... | 22 |
| 6     | Trabajos futuros.....  | 26 |
| 7     | Conclusiones .....   | 26 |
| 8     | Referencias.....   | 27 |
| 8.1   | Matriz de Estado del Arte.....   | 32 |
| 8.2   | Resumen de Indicadores.....  | 35 |
| 9     | Anexos.....  | 38 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Elementos de la Micro-Red. ....   | 3  |
| Figura 2. Micro-red aislada. ....   | 3  |
| Figura 3. Micro-red interconectada. ....  | 3  |
| Figura 4. Micro-red Híbrida ....  | 4  |
| Figura 5. Sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías 1 y 2, implementados en el software PLECS. .... | 6  |
| Figura 6. Sistemas Solares Fotovoltaicos 1 y 2, implementados en el software PLECS. ....                          | 7  |
| Figura 7. MRH de 14 barras IEEE en el software PLECS. ....  | 9  |
| Figura 8. Voltaje L-L en p.u. máxima demanda Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                    | 11 |
| Figura 9. Voltaje L-L en p.u. mínima demanda Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                    | 12 |
| Figura 10. Potencia activa, demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                   | 13 |
| Figura 11. Potencia activa, demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                   | 14 |
| Figura 12. Potencia reactiva, demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                 | 15 |
| Figura 13. Potencia reactiva demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [7]. ....                                  | 16 |
| Figura 14. Pérdidas por línea demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                | 17 |
| Figura 15. Pérdidas por línea demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                | 18 |
| Figura 16. Factor de potencia máxima demanda Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                   | 19 |
| Figura 17. Factor de potencia mínima demanda Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                   | 20 |
| Figura 18. THD en % de demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                       | 21 |
| Figura 19. THD en % de demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [26]. ....                                       | 22 |
| Figura 20. Resumen de la temática del estado del arte. ....   | 35 |
| Figura 21. Indicador de la formulación del problema. ....   | 36 |
| Figura 22. Indicador de la solución dada. ....  | 37 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Ventajas y desventajas de la simulación en PLECS. ....   | 4  |
| Tabla 2. Datos de cargas para la MR.....  | 8  |
| Tabla 3. Diferencia algebraica de perfiles de voltaje en p.u. demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS..... | 23 |
| Tabla 4. Diferencia algebraica de perfiles de voltaje en p.u. demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS..... | 23 |
| Tabla 5. Diferencia algebraica de potencia activa en kW demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS.....       | 23 |
| Tabla 6. Diferencia algebraica de potencia activa en kW demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS.....       | 23 |
| Tabla 7. Diferencia algebraica de potencia reactiva en kVAr demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS.....   | 24 |
| Tabla 8. Diferencia algebraica de potencia reactiva en kVAr demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS.....   | 24 |
| Tabla 9. Diferencia algebraica pérdidas de línea en kW demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS.....        | 24 |
| Tabla 10. Diferencia algebraica de pérdidas de línea en kW demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS.....    | 24 |
| Tabla 11. Diferencia algebraica de factor de potencia en demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS.....      | 25 |
| Tabla 12. Diferencia algebraica de factor de potencia en demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS.....      | 25 |
| Tabla 13. Diferencia THD% en demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS.....                                  | 25 |
| Tabla 14. Diferencia THD% en demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS.....                                  | 25 |
| Tabla 15. Matriz estado del arte.....   | 32 |
| Tabla 16. Perfiles de voltaje en p.u. demanda máxima, caso base.....  | 38 |
| Tabla 17. Potencia activa en kW demanda máxima, caso base. ....   | 38 |
| Tabla 18. Potencia reactiva en kVAr demanda máxima, caso base. ....   | 38 |
| Tabla 19. Pérdidas de línea en kW demanda máxima, caso base. ....   | 38 |
| Tabla 20. Factor de potencia en demanda máxima, caso base. ....   | 38 |
| Tabla 21. THD% en demanda máxima, caso base. ....   | 39 |
| Tabla 22. Perfiles de voltaje en p.u. demanda mínima, caso base. ....   | 39 |
| Tabla 23. Potencia activa en kW demanda mínima, caso base. ....   | 39 |
| Tabla 24. Potencia reactiva en kVAr demanda mínima, caso base.....  | 39 |
| Tabla 25. Pérdidas de línea en kW demanda mínima, caso base. ....   | 39 |
| Tabla 26. Factor de potencia en demanda mínima, caso base.....  | 40 |
| Tabla 27. THD% en demanda mínima, caso base.....  | 40 |

# **SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN TIPO BENCHMARK DE UNA MICRO-RED HÍBRIDA EN AC/DC BASADO EN CO-SIMULACIÓN PIECEWISE LINEAR ELECTRICAL CIRCUIT SIMULATION (PLECS) Y MATLAB/SIMULINK.**

## **Resumen**

En el artículo presente se utiliza el programa Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) para diseñar y evaluar un sistema tipo benchmark de una Micro-red Híbrida en AC y DC. La Micro-red tipo en estudio fue diseñada previamente usando Matlab/Simulink y basada en el sistema de 14 barras de la IEEE. El desarrollo fue realizado usando una programación muy similar al caso de estudio, la cual fue evaluada comparando los resultados de PLECS con los de Matlab/Simulink del sistema original. La realización de esta comparación es crucial para comprender los posibles cambios que podrían surgir al utilizar un nuevo entorno de simulación, así como para analizar las ventajas y desventajas relacionadas. La diferencia de tiempo de simulación entre el presente trabajo comparado con el tiempo de simulación del caso de estudio original no representativa.

**Palabras Clave:** Micro-redes, Generación Distribuida, Simulación de sistemas de energía, PLECS, Matlab/Simulink.

## **Abstract**

This article uses the Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) program to design and evaluate a benchmark type system for a Micro-net Hybrid in AC and DC. The study-type micro-network was previously designed using Matlab / Simulink and based on the IEEE 14-bar system. The development was carried out using a programming very similar to the case study, which was evaluated by comparing PLECS results with Matlab/Simulink results from the original system. Making this comparison is crucial to understanding the possible changes that could arise when using a new simulation environment, as well as the related advantages and disadvantages. The difference in simulation time between the present work and the original case study is due to the non-representative simulation of the original case study.

**Keywords:** Microgrids, Distributed Generation, Power System Simulation, PLECS, Matlab/Simulink.

# 1 Introducción

Las personas a menudo buscan optimizar las fuentes de energía convencionales y no convencionales para evitar diversas pérdidas debido a las interrupciones del suministro eléctrico [1]–[8]. Los logros en el campo de la electrónica proporcionaron un crecimiento significativo en el desarrollo de la generación distribuida (GD). En respuesta a esta necesidad, surge la Micro-red (MR), la cual puede funcionar en diferentes configuraciones, ya sea de manera independiente o conectadas a la red principal [9]–[12]. La MR alimenta las cargas asociadas y buscan gestionar eficientemente la variedad de generación presente en las mismas, utilizando MR en corriente continua (DC) y MR en corriente alterna (AC), utilizando rectificadores, inversores y convertidores bidireccionales, para así evitar transferencias repentinas de energía [10], [13]–[15].

Algunas ventajas de MR incluyen la combinación flexible de diferentes tipos de generación, soporte del sistema durante períodos de alta demanda, fácil recuperación después de fallas, ausencia de armónicos y potencia reactiva, e intercambio de energía oportuno [10], [15]–[18]. Sin embargo, las MR deben ser relacionadas y superar los obstáculos, como su diversidad e intermitencia, ya que actualmente dependen en gran medida de fuentes primarias [19], [20].

Los simuladores son herramientas que ayudan a estimar cálculos cercanos al entorno real [21]. Cuando se combinan con métodos de ingeniería, son muy importantes para el estudio del flujo de energía, la compensación, el análisis armónico, la optimización y otros aspectos, lo que conduce a una reducción significativa en el tiempo de cálculo [22].

En la Micro-red Híbrida (MRH) existe un elemento fundamental para la integración de todos los elementos, estos elementos son los convertidores, un error

puede afectar toda la operación del sistema. Por lo tanto, es muy importante buscar e implementar nuevas tácticas de control [23], [24].

El desarrollo continuo de la GD conduce a cambios en los niveles y direcciones de corriente durante las fallas, lo que aumenta la posibilidad de esquemas de protección sean insuficientes. A largo plazo, el incremento de MRH puede causar dificultades para las reservas rotativas, por lo que es necesario explorar diversas alternativas para satisfacer esta instancia [25]. También, nuevas tácticas de control, el rediseño de protección y la atención a las reservas rotativas son aspectos que se plantean como interrogantes para futuras indagaciones [18].

El objetivo de este trabajo es simular y comprobar el comportamiento dinámico del sistema y sus requisitos máximos y mínimos a través de la co-simulación digital de PLECS y el software Matlab/Simulink basado en un sistema de prueba (benchmark). El sistema de ensayo, específicamente diseñado para la MRH de corriente alterna/corriente continua (AC/DC), se elaboró previamente en Matlab/Simulink y se publicó en revistas arbitradas. De acuerdo con el modelo IEEE de 14 barras, la MRH funciona a los niveles de voltaje siguientes: sistema principal de 13,8 kV y sistema secundario de 0,22 kV. Se evalúan comparando el flujo de potencia en las condiciones de máxima y mínima demanda. La curva de tensión, la potencia activa, la potencia reactiva, el factor de potencia, la distorsión armónica total de tensión y corriente son algunas de las variables que se analizan para cada barra del sistema.

La estructura del documento es la siguiente: La introducción se presenta en la Sección 1 y el marco teórico se detalla en la Sección 2 para comprender mejor el progreso de las MR y cómo se conforman. La Sección 3 describe la metodología a alcanzar y las modificaciones más

importantes que se han hecho en el modelo de investigación para una comparación de datos más confiable. El caso fundamental de la investigación se presenta en la Sección 4, que también compara dos tipos distintos de software. Los resultados se discuten en la Sección 5. La Sección 6 presenta el trabajo futuro, la Sección 7 presenta las conclusiones y, por último, la Sección 8 contiene las referencias.

## 2 Marco teórico

Una red eléctrica es responsable de la transmisión y operación de la energía eléctrica. Su objetivo es suministrar electricidad a los consumidores y también es responsable de garantizar una seguridad, calidad y su continuidad [18].

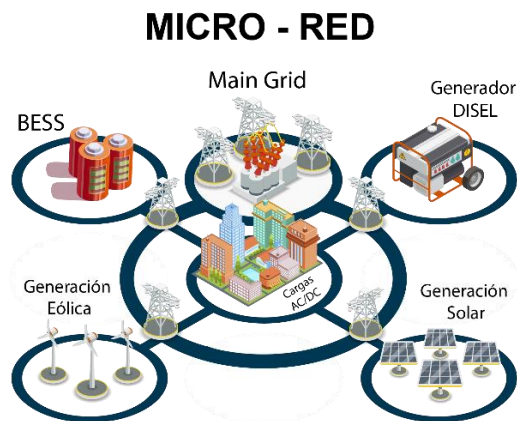


Figura 1. Elementos de la Micro-Red.

### 2.1 Micro-red

Una MR es un grupo de elementos enfocados en la generación y repartición de energía eléctrica a pequeña escala, que puede ser utilizado para abastecer las necesidades energéticas de un grupo de personas en una zona rural o remota, o en un entorno urbano. Estos sistemas suelen ser autónomos y pueden estar compuestos por una combinación de generadores eléctricos, paneles solares, baterías y otros componentes necesarios para suministrar energía eléctrica [1], [26]–[30].

#### 2.1.1 Tipologías de Micro-redes

La definición de topología de un sistema

- **Micro-redes Aisladas.**

Son aquellas que no están conectadas a la red eléctrica principal y funcionan de manera independiente. Estas Micro-redes se utilizan en áreas remotas o rurales donde la conexión a la red eléctrica principal no está disponible o es costosa. Pueden utilizar una combinación de fuentes de energía [1], [31]–[39].

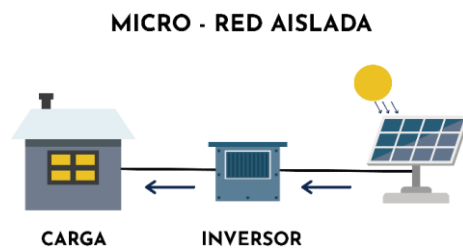


Figura 2. Micro-red aislada.

- **Micro-redes interconectadas**

Estas MR están conectadas a la red eléctrica principal y comparten recursos de energía. Esto permite una mejor gestión de la energía y una reducción de costos al compartir los costos de transmisión y generación de energía entre varias Micro-redes [1], [15], [40]–[44].

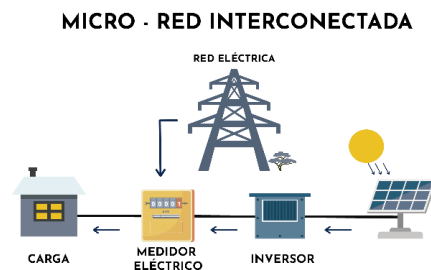


Figura 3. Micro-red interconectada.

- **Micro-redes en AC y DC**

Las Micro-redes en Corriente Alterna (AC) utilizan la misma corriente eléctrica que la red eléctrica principal, lo que permite una fácil integración y una interconexión con la red eléctrica principal. Por otro lado, las Micro-redes en Corriente Continua (DC) utilizan una corriente eléctrica diferente a la

de la red eléctrica principal. La corriente continua almacena y transmite energía de manera más eficiente, lo que reduce la pérdida y el costo [1], [10], [15], [40].

- **Micro-redes Híbridas**

Es un sistema que combina fuentes de energía renovable y no renovable para proveer electricidad a una comunidad o zona específica. La combinación de diferentes fuentes de energía permite una mayor flexibilidad y resiliencia en la gestión de la energía [10], [15].

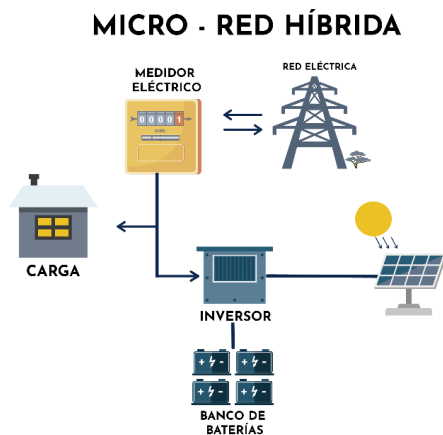


Figura 4. Micro-red Híbrida

## 2.2 Simulación digital para Micro-redes eléctricas

La simulación digital para Micro-redes eléctricas es el proceso de utilizar programas de software para modelar y analizar el comportamiento de una micro-red eléctrica en un ambiente virtual. Estos programas de simulación permiten a los diseñadores y operadores de micro-redes evaluar diferentes escenarios y opciones, y tomar decisiones informadas sobre el diseño y operación de sus sistemas [12], [15], [45]–[48].

La simulación digital se utiliza para:

- Modelar la generación de energía.
- Modelar el almacenamiento de energía.

- Modelar la repartición de energía en una Micro-red.
- Analizar el impacto de diferentes factores, como la inestabilidad de la generación de energía renovable, el uso de la carga.
- Interacción con la red eléctrica principal.

Los programas de simulación también pueden simular eventos de fallas y emergencias para evaluar la resiliencia de la microrred [26].

## 2.3 Simulación digital para Micro-redes Híbridas en PLECS

Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) es un software de simulación digital específico para la simulación de sistemas de control y diseño de MRH en CA/CC.

Este programa permite a los usuarios simular y modelar el procedimiento de los sistemas de conversión, almacenamiento y distribución de energía en MR.

### 2.3.1 Ventajas y desventajas de la simulación en PLECS.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la simulación en PLECS.

| Ventajas   | Desventajas   |
|--|---|
| <p><b>Evaluación detallada:</b><br/>Permite a los usuarios evaluar detalladamente el comportamiento de sus sistemas en diferentes escenarios, lo que ayuda a mejorar la eficiencia, fiabilidad y costo de los sistemas [28].</p> | <p><b>Complejidad:</b><br/>La simulación digital puede ser complicada para aquellos sin experiencia en el campo de la energía eléctrica, ya que requiere un conocimiento técnico avanzado y habilidades de programación [29].</p> |
| <p><b>Modelado preciso:</b><br/>La simulación digital permite a los usuarios modelar detalladamente los componentes de sus sistemas, incluyendo inversores, controladores,</p>   | <p><b>Tiempo y costo:</b><br/>La simulación digital puede requerir mucho tiempo y costo para configurar y ejecutar correctamente, lo que puede ser un obstáculo para algunos proyectos[29].</p>                                   |

| Ventajas  | Desventajas   |
|---|---|
| baterías, generadores y cargas [28].  |   |
| <b>Pruebas de concepto:</b><br>PLECs permite a los usuarios probar una variedad de conceptos de sistemas y control de energía antes de la implementación real, lo que reduce la inseguridad y el valor asociados con la implementación de soluciones no probadas. [28]. | <b>Limitaciones en la precisión:</b><br>La simulación digital es solo una representación aproximada de la realidad, por lo que puede haber diferencias entre los resultados de la simulación y el comportamiento real de los sistemas [29]. |

## 2.4 Co-simulación digital.

La co-simulación es un enfoque que consiste en simular conjuntamente dos o más sistemas distintos. Este método se utiliza principalmente para abordar la simulación de sistemas complejos que involucran múltiples disciplinas o para evaluar la interacción y el rendimiento entre diferentes sistemas [30]. Una ventaja significativa de la co-simulación radica en su capacidad para simular sistemas complejos que presentan una combinación de disciplinas, lo cual es difícil de lograr mediante simulaciones individuales. Además, permite evaluar el rendimiento y la interacción en diversos escenarios, lo que resulta útil para identificar problemas y mejorar el diseño [30].

No obstante, la co-simulación también presenta algunas desventajas. En primer lugar, puede ser un proceso complicado y costoso debido a la complejidad inherente de los sistemas involucrados. Garantizar la precisión de la simulación puede resultar desafiante. Además, la simulación de sistemas complejos puede requerir mayores recursos computacionales, lo que implica un mayor tiempo para obtener los resultados deseados. Por último, la sincronización y comunicación entre los diferentes sistemas de simulación pueden plantear dificultades adicionales [31].

## 2.5 Sistemas tipo prueba (Benchmark)

El término "benchmark" se refiere a un punto de referencia o medida de comparación para evaluar el rendimiento de un sistema o producto. En el contexto de la tecnología, una prueba (benchmark) puede ser un conjunto de pruebas que miden el rendimiento de un hardware o software, y se utiliza para comparar los productos con sus competidores [15], [26], [45].

Los sistemas de prueba (benchmark) son sistemas estandarizados que se utilizan como punto de partida para evaluar y comparar el rendimiento de otro sistema o tecnología [15], [26].

## 3 Metodología

Se propone la modelización y la co-simulación de la MRH en CA/CC tipo prueba (benchmark) utilizando los softwares PLECS y MATLAB/Simulink. En este proceso, se desarrolla el diagrama general del modelo original de la IEEE de 14 barras que fue elaborado previamente en MATLAB/Simulink según el artículo citado en la referencia [7].

El voltaje línea-línea por barra, la potencia activa y reactiva, las pérdidas por cada línea, el factor de potencia y el valor de THD por barra, se verifican y comparan utilizando los datos obtenidos en condiciones de demanda máxima y mínima. El objetivo es analizar las variaciones entre los resultados obtenidos de los distintos softwares mencionados anteriormente, con el fin de establecer similitudes y divergencias entre ellos.

A continuación, se muestran los datos conseguidos en los escenarios de funcionamiento para las condiciones de demanda máxima y mínima. De la configuración original se mantuvo los datos de líneas y transformadores, no se

modificaron en la réplica realizada con los softwares PLECS y Matlab/Simulink.

### 3.1 Sistema de almacenamiento de energía por baterías (SAEB)

Los SAEB son capaces de gestionar el suministro de energía en una MR [7], permitiendo mantener la estabilidad de la frecuencia y del voltaje en cuestión de que la red principal falle. Estos sistemas tienen una respuesta rápida y ofrecen flexibilidad en la conmutación [5].

En este estudio, se ha implementado un SAEB. El SAEB 1 está conectado a la barra CC (DC Bus) y utiliza una batería Li-ion R-model, que es una batería de iones de litio diseñada con un modelo de resistencia interna específica (R-model). Esta batería

presenta características especiales para considerar su resistencia interna durante su funcionamiento.

El SAEB 1 tiene un voltaje nominal de 129,4 VCC (VDC). Por otro lado, el SAEB 2 se conecta a la Barra 1 en la sección de Baja Tensión y tiene un voltaje nominal de 646.1 VCC (VDC). El SAEB 1 se encuentra conectado a un convertidor elevador (Boost) que opera con una entrada de 120 V en CC y una salida de 300 VCC, enlazada a la Barra CC (DC Bus). El sistema SAEB 2 está equipado con un inversor que aumenta la tensión de 650 VCC (VDC) a 900 VCA (VAC), como se puede observar en la Figura 5.

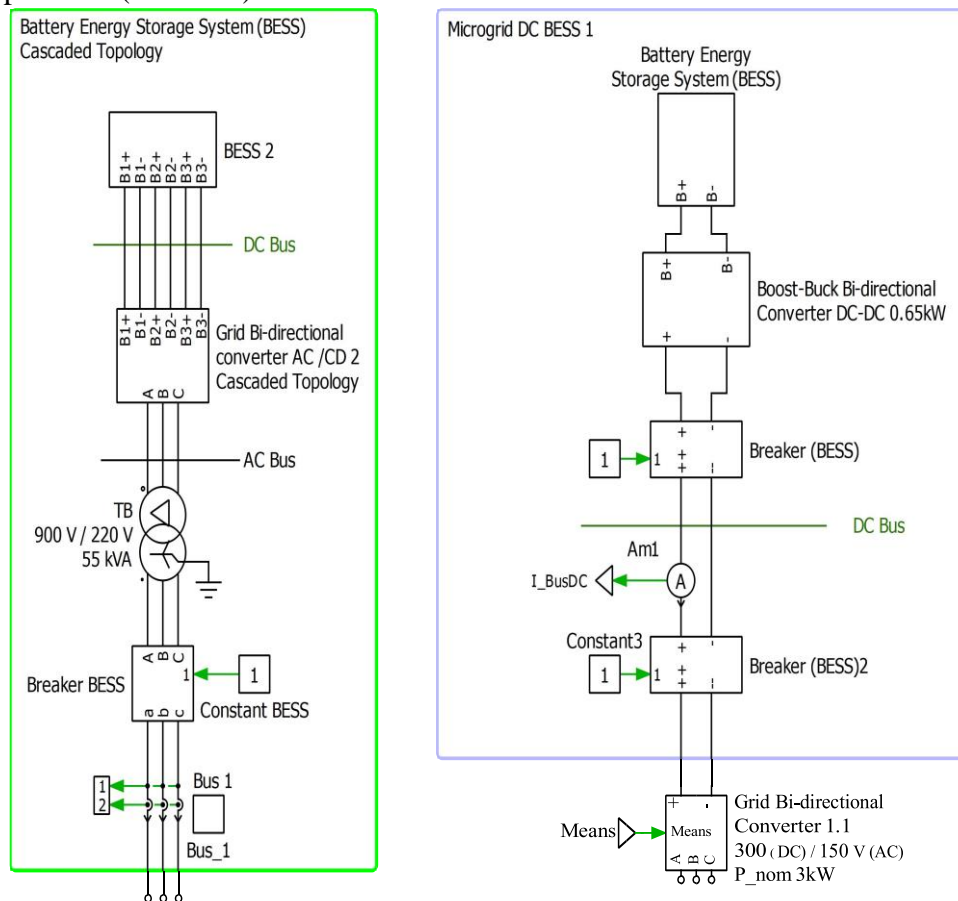


Figura 5. Sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías 1 y 2, implementados en el software PLECS.



### 3.2 Sistema solar fotovoltaico (SF)

Se utilizan dos sistemas fotovoltaicos (SF) siguiendo con la irradiancia del diseño original, con una temperatura de 25 °C y una radiación solar de  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  [7]. El SF Arreglo 1 (PV Array 1) consta de 4 paneles conectados en serie, cada uno con 96 celdas y 7 celdas en paralelo, generando un voltaje de 191,2066 V en CC. Por otro lado, el SF Arreglo 2 (PV Array 2) está compuesto por 5 paneles conectados en serie, cada uno con 250 celdas y 127 celdas en paralelo, generando un voltaje de 482,8714 V en CC.

El SF Arreglo 1 se encuentra enlazado a un convertidor elevador (Boost) que opera con una entrada de 192 V y una salida de 280 V, y se conecta a la barra CC (DC). Por otro lado, el SF Array 2 maneja un PWM como inversor para convertir el voltaje de 480 VCC (VDC) a 250 VCA (VAC). Como se muestra en la Figura 6.

Estas adaptaciones en cuanto al número y potencia de los paneles se deben a las restricciones de ejemplos y librerías disponibles en el software PLECS.

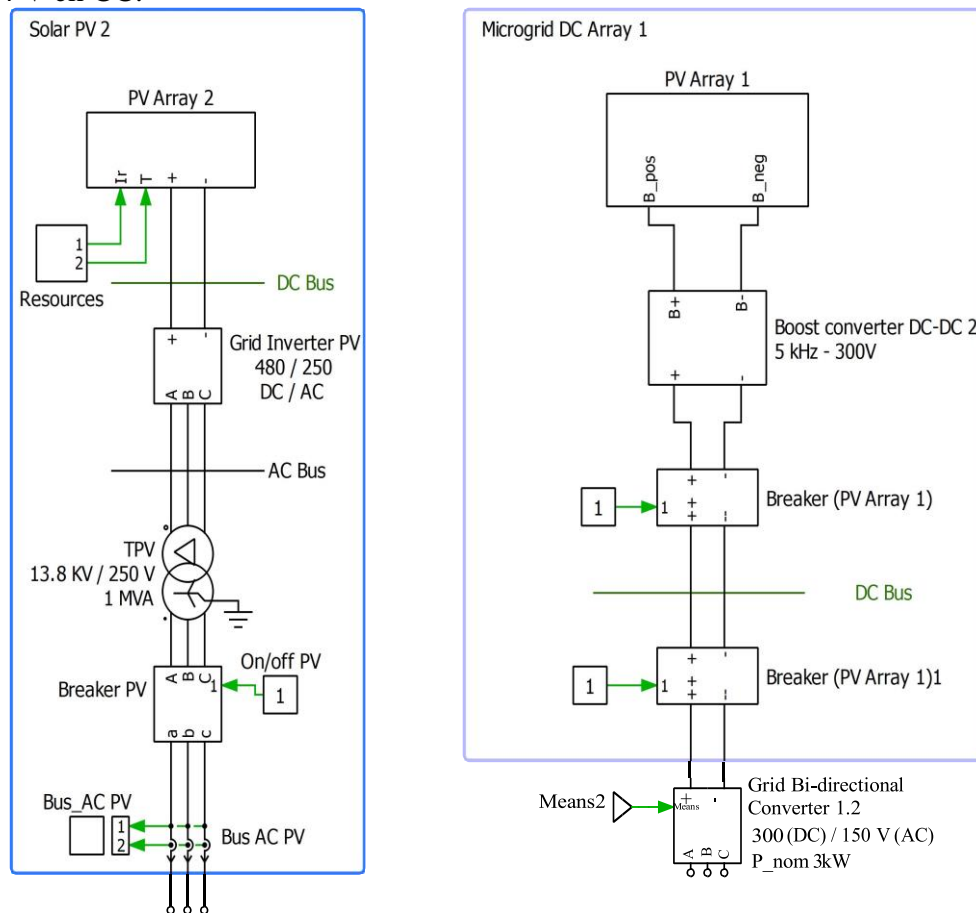


Figura 6. Sistemas Solares Fotovoltaicos 1 y 2, implementados en el software PLECS.

### 3.3 Inversores de voltaje AC/DC

El SF Arreglo 2 está enlazado al sistema de CA de 13,8 kV mediante un inversor que convierte el voltaje de 480 VCC a 250 VCA. Para facilitar la conexión al sistema

de distribución primaria de la MR, se utiliza el transformador TPV. El convertidor está modelado con un puente de transistores IGBT de 3 niveles controlado por modulación de ancho de pulso (PWM).

Por otro lado, el SAEB 2 está interconectado al sistema de CA de 0,22 kV a través de un inversor que aumenta la tensión de 650 VCC a 900 VCA. Para realizar la conexión al sistema de distribución secundaria de la Micro-red, se emplea el transformador TB, como se puede observar en la Figura 7.

### 3.4 Cargas

La Tabla 2 presenta la información sobre las cargas conectadas al sistema, incluyendo sus factores de potencia y los porcentajes de desequilibrio de voltaje.

Tabla 2. Datos de cargas para la MR.

| Cargas         | Tipo          | Max (KVA) | Min (KVA) | PF   | Desbalance (%) |
|----------------|---------------|-----------|-----------|------|----------------|
| <b>Load 2</b>  | Desbalanceada | 40        | 12        | 0,9  | 13             |
| <b>Load 3</b>  | Desbalanceada | 30        | 9         | 0,85 | 12             |
| <b>Load 4</b>  | Lineal        | 50        | 15        | 0,9  | 0              |
| <b>Load 9</b>  | No-Lineal     | 320       | 96        | 1    | 0              |
| <b>Load 10</b> | Lineal        | 800       | 240       | 0,8  | 0              |
| <b>Load 11</b> | Lineal        | 400       | 120       | 0,8  | 0              |
| <b>Load 12</b> | Lineal        | 800       | 240       | 0,8  | 0              |
| <b>Load 14</b> | Lineal        | 1600      | 480       | 0,8  | 0              |
| <b>DC Load</b> | -             | 2         | 0.6       | 1    | -              |

#### 3.4.1 Cargas Lineales.

Las cargas lineales, tanto balanceadas como desbalanceadas, se modelan como impedancias constantes en el sistema. Las cargas balanceadas no presentaron dificultades al transferir sus mediciones al

software. Sin embargo, las cargas desbalanceadas conectadas a las barras 2 y 3 contienen componentes monofásicos que perturban la simetría de voltajes y corrientes en el sistema, lo que resulta en un cambio en su funcionamiento.

#### 3.4.2 Cargas No Lineales

Se agregó un puente rectificador trifásico controlado con SCR en la carga no lineal de la barra 9, el cual funciona como una carga no lineal siguiendo el modelo original de la simulación.

### 3.5 Método de cálculo

Se utiliza la siguiente operación para establecer la diferencia de resultados entre la simulación de Matlab/Simulink y la co-simulación PLECS y Matlab/Simulink.

$$Diferencia = ||A| - |B|| \quad (1)$$

Donde:

*Diferencia*: Representa el valor obtenido a la resta algebraica.

*A*: Valor original en simulación Matlab/Simulink.

*B*: Valor obtenido en la co-simulación PLECS y Matlab/Simulink.

## 4 Caso de estudio

El caso de estudio se refiere a un modelo de prueba de referencia de una MRH en corriente CA/CC desarrollado en Matlab/Simulink. Este modelo de referencia se basa en el sistema de 14 barras del estándar IEEE y se centra específicamente en los escenarios de demanda máxima y demanda mínima.

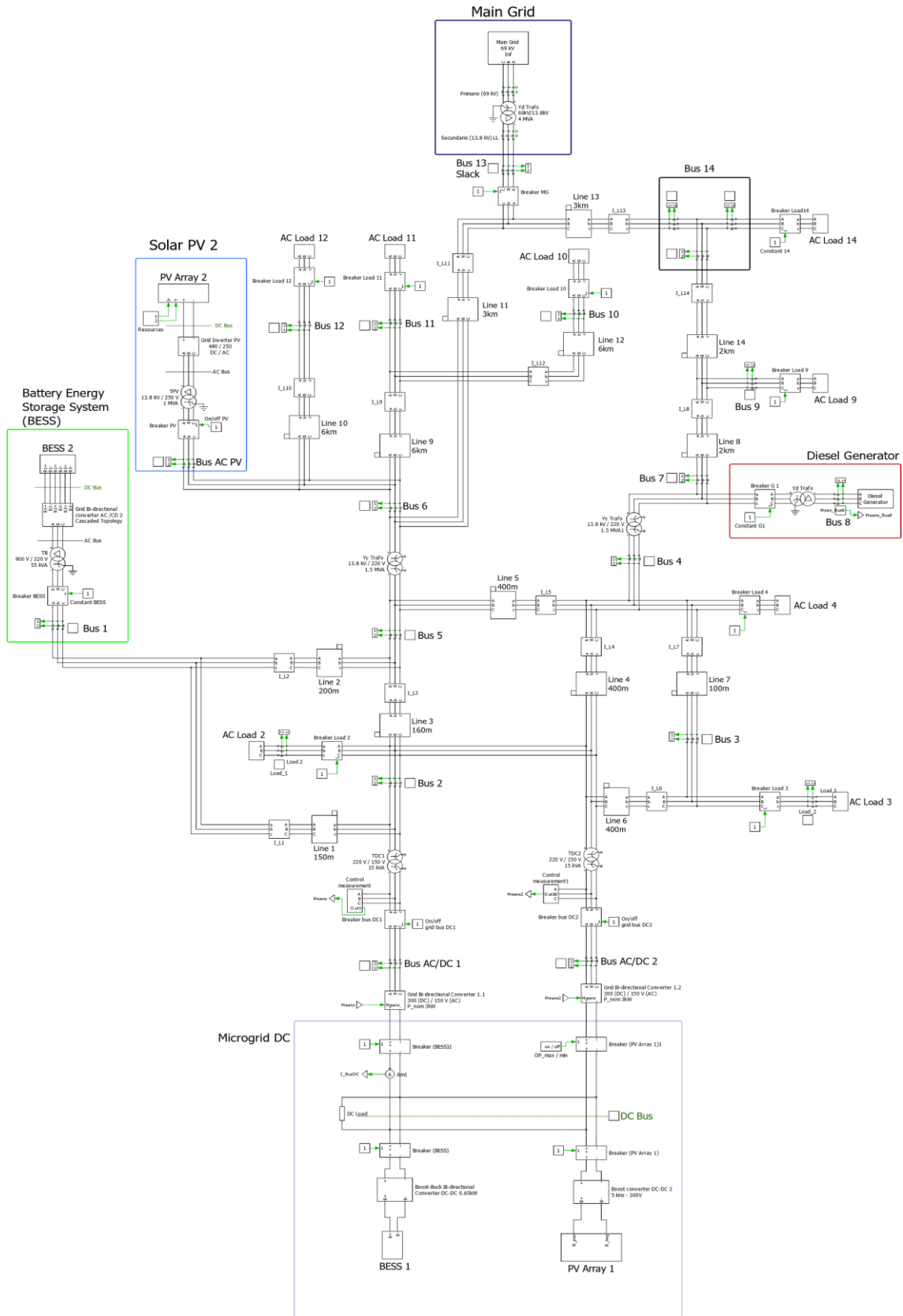


Figura 7. MRH de 14 barras IEEE en el software PLECS.

Se simula y valida verificando la precisión y rendimiento del modelo mediante el contraste de los resultados conseguidos de la co-simulación y los datos de referencia, ya sea en su máxima demanda que equivale al 100% de la carga o su mínima demanda al 30% de la carga del sistema. El proceso de simulación se lleva a cabo utilizando las capacidades combinadas de PLECS y Matlab/Simulink. PLECS se utiliza para modelar y simular los componentes eléctricos y electrónicos del sistema, como se indica en la Figura 7. Por otro lado, Matlab/Simulink se utiliza para implementar algoritmos de control, realizar análisis de datos y facilitar la integración de diferentes sistemas y componentes.

## 5 Análisis de resultados

Al finalizar la representación de la MRH en el modelo de las 14 barras del estándar IEEE, se procede a comparar los datos de voltaje línea-línea, potencia activa y reactiva, las pérdidas por línea, el factor de potencia y el valor de THD de la simulación realizada originalmente en Matlab/Simulink y en la co-simulación entre PLECS y Matlab/Simulink. Se busca identificar las diferencias en los resultados obtenidos utilizando cada software, con el objetivo de destacar las disparidades entre

ellos. Se analizan dos escenarios para el estudio: uno con una carga del 100% para simular la máxima demanda, y otro con una carga del 30% de esa misma máxima demanda, con el fin de realizar el análisis en condiciones de demanda mínima. Con el objetivo de realizar un análisis exhaustivo, se seleccionan específicamente 6 parámetros para su estudio detallado en cada escenario.

### 5.1 Análisis de Perfiles de voltaje

Esta sección muestra los resultados de los perfiles de voltaje, que se obtuvieron en los escenarios de carga máxima (Figura 8) y carga mínima (Figura 9). Los perfiles de voltaje se representan en forma de fases debido a la presencia de cargas desequilibradas que generan componentes de carga monofásica. En ambos casos, se puede observar que los perfiles de voltaje se mantienen dentro de los límites aceptables de operación. Ambas figuras incluyen indicadores que evalúan la calidad del perfil de voltaje, los cuales fueron considerados en el estudio original. Para el cálculo en la co-simulación, se utilizaron las mismas ecuaciones (2) y (3) implementadas en el estudio previo.

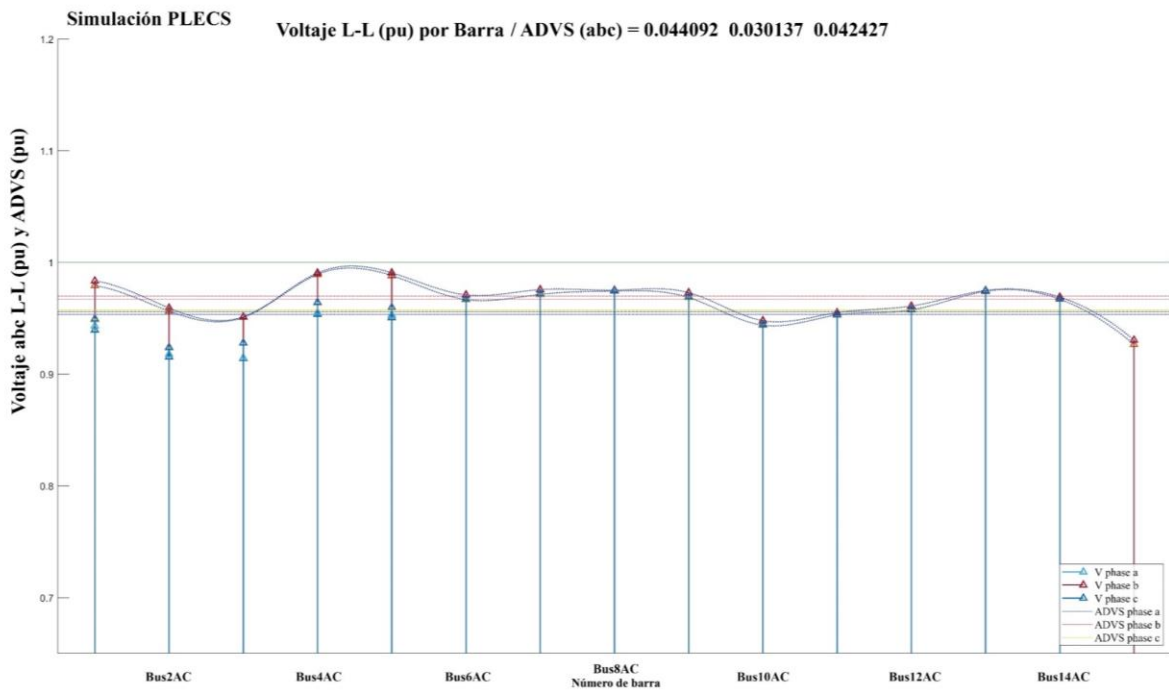
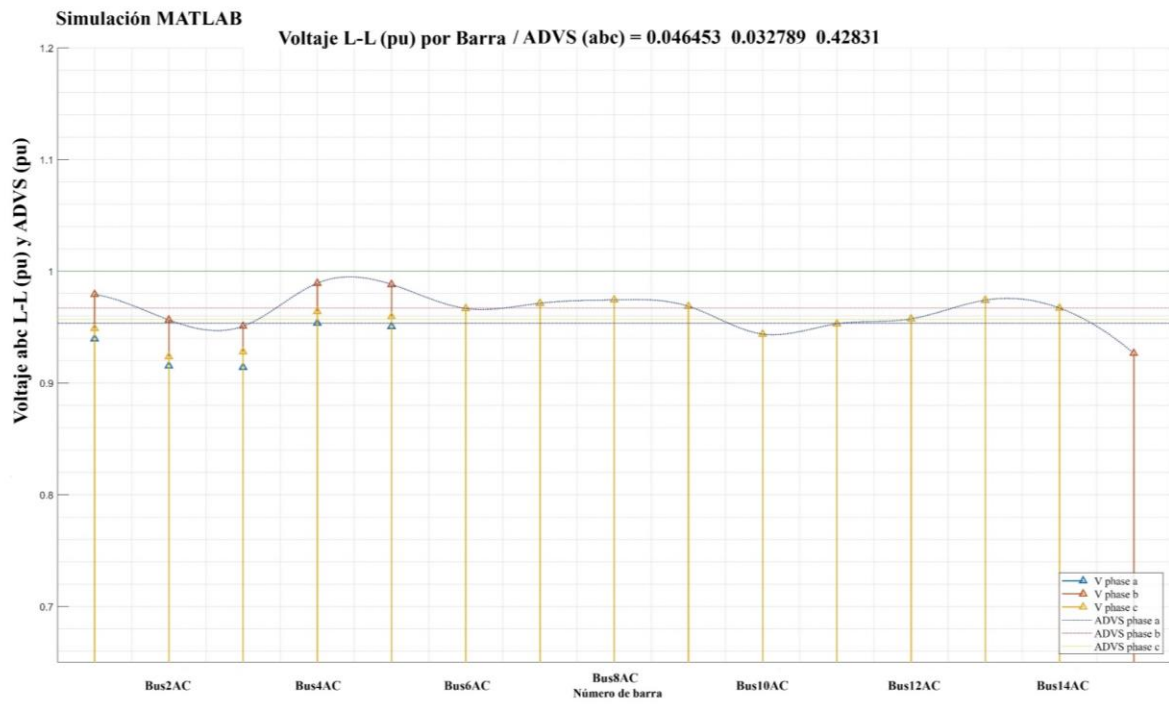


Figura 8. Voltaje L-L en p.u. máxima demanda Matlab/Simulink y PLECS [7].

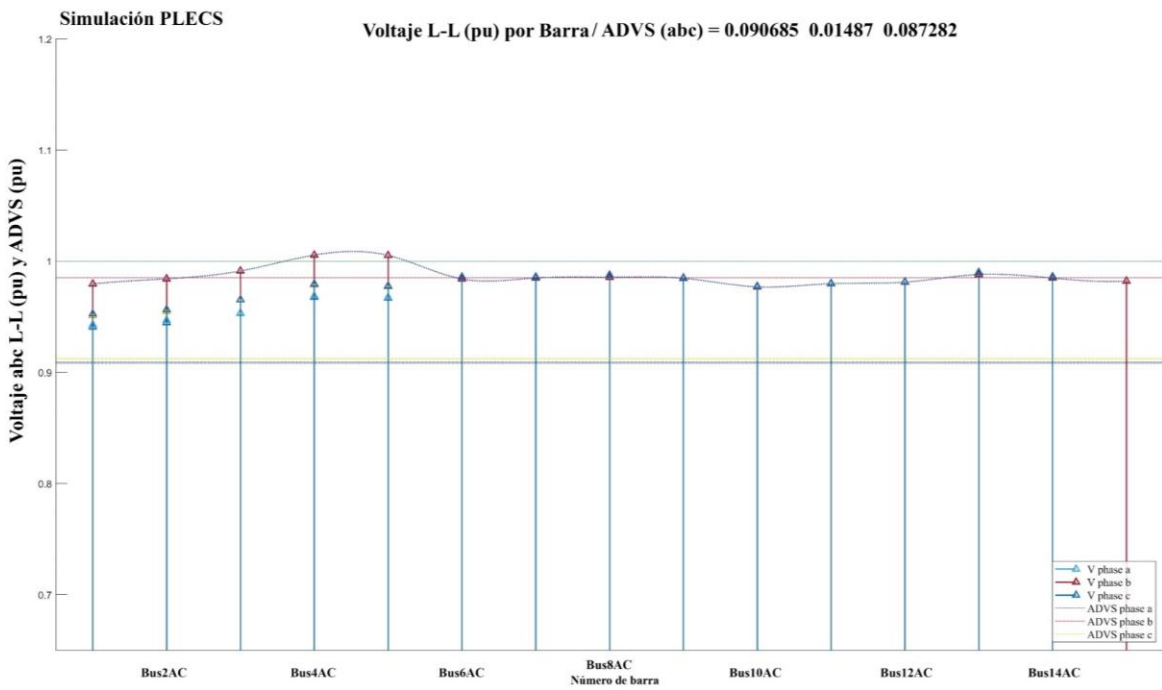
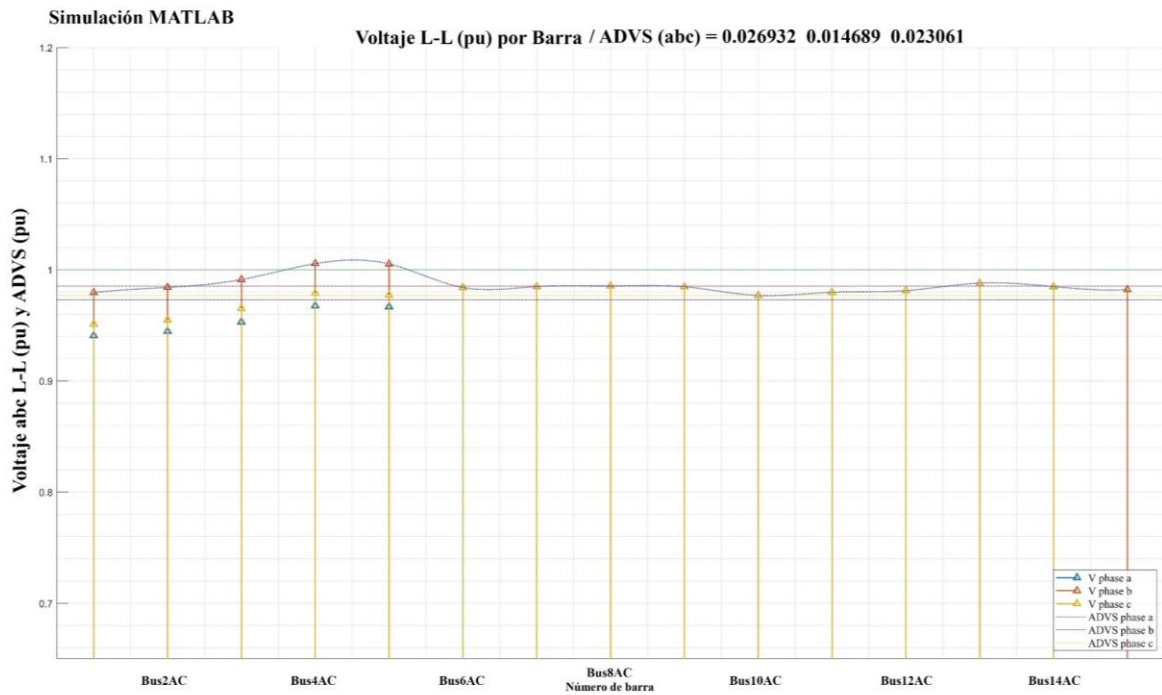


Figura 9. Voltaje L-L en p.u. mínima demanda Matlab/Simulink y PLECS [7].

- Desviación media del voltaje dentro del sistema.

$$ADVS = \frac{\sum_{i=1}^n |Vd_i - V_i|}{n} \quad (2)$$

- Máximo valor de la desviación de la tensión.

$$MVS = \max_{1 < i < n} |Vd_i - V_i| \quad (3)$$

Donde:

$n$ : es el número de barras en la MG

$V_i$ : es el voltaje real en p.u. de las barras

$V_{di}$ : es el voltaje deseado de las barras en p.u.

## 5.2 Balance de potencia activa por barra

En este punto se muestra la contribución de las potencias en kVA generadas y consumidas en cada una de las barras del

sistema, incluyendo la potencia en kW en la barra CC. Las gráficas, tanto de mínima (Figura 11) como de máxima demanda (Figura 10) indican secciones positivas de potencia la cual significa la presencia de cargas conectadas a la barra o la transferencia de potencia, se debe tener en cuenta que las potencias negativas indican la cantidad de potencia activa entregada, ya sea por la red principal, el generador o el sistema fotovoltaico.

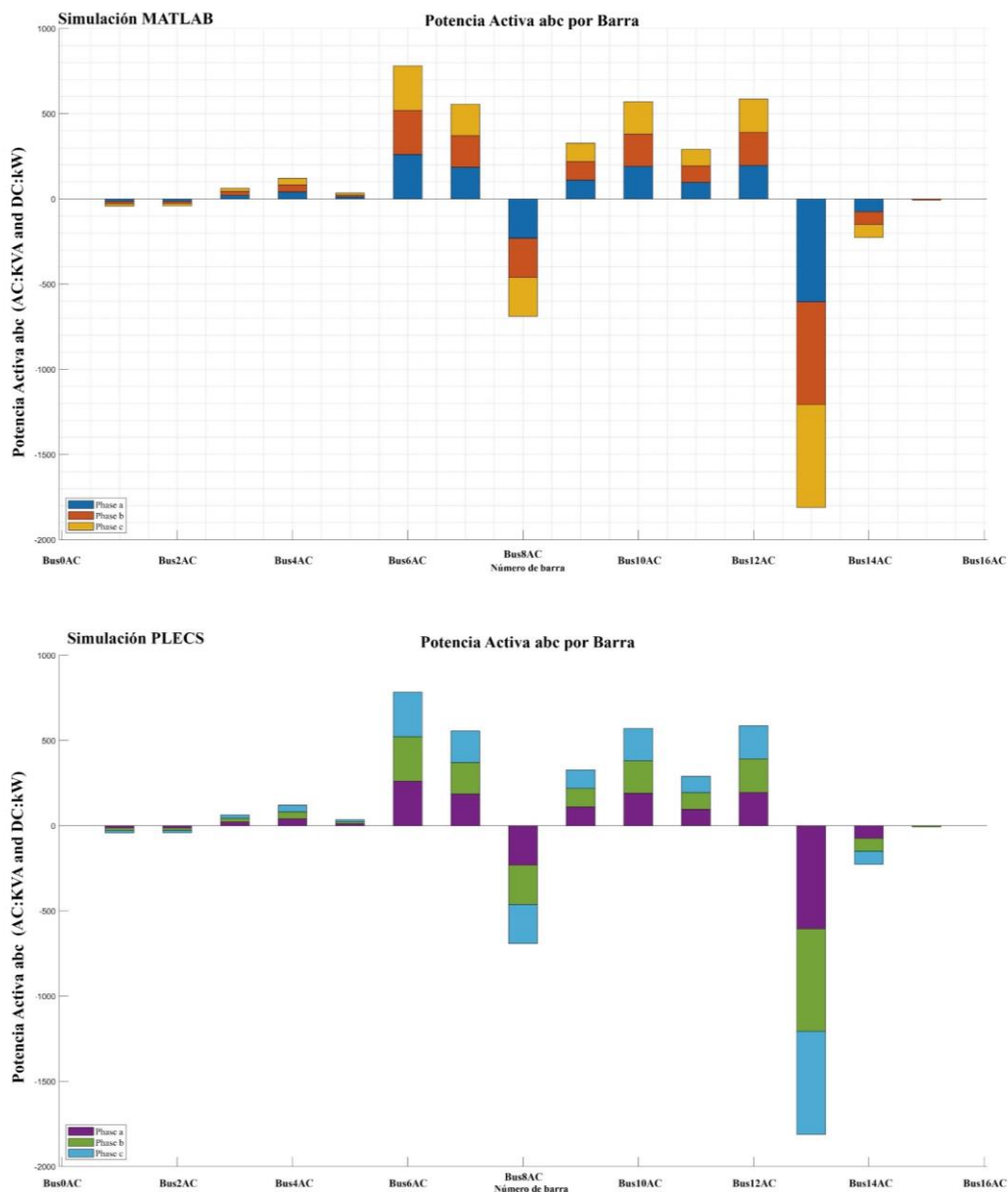


Figura 10. Potencia activa, demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [7].

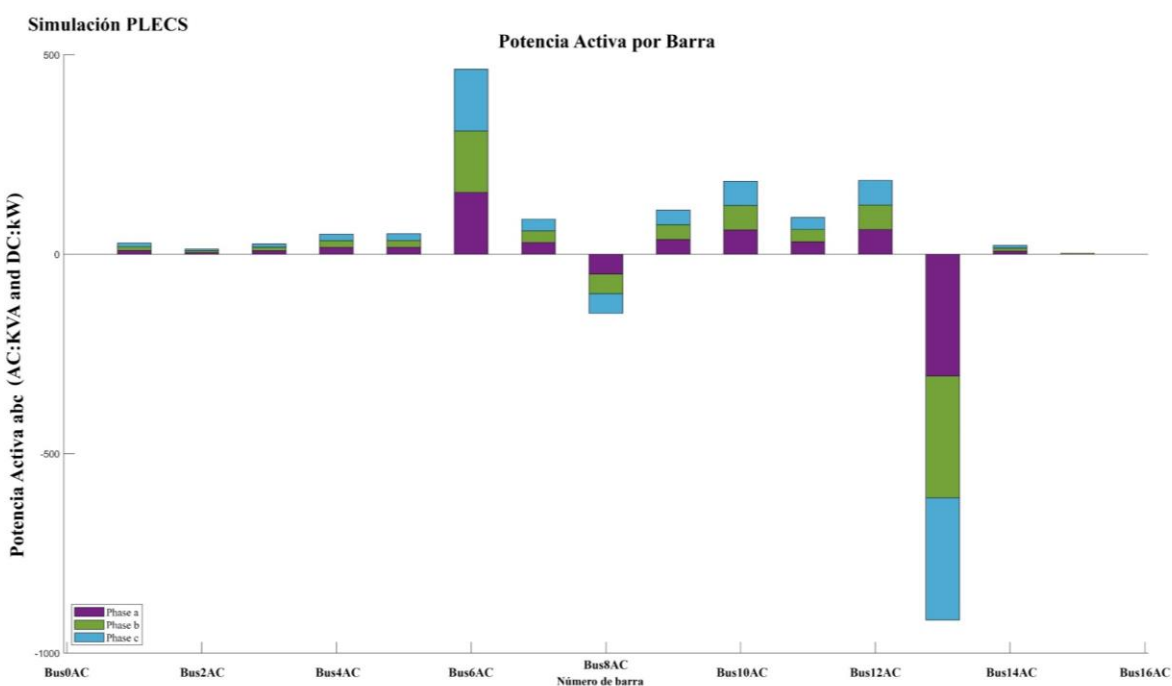
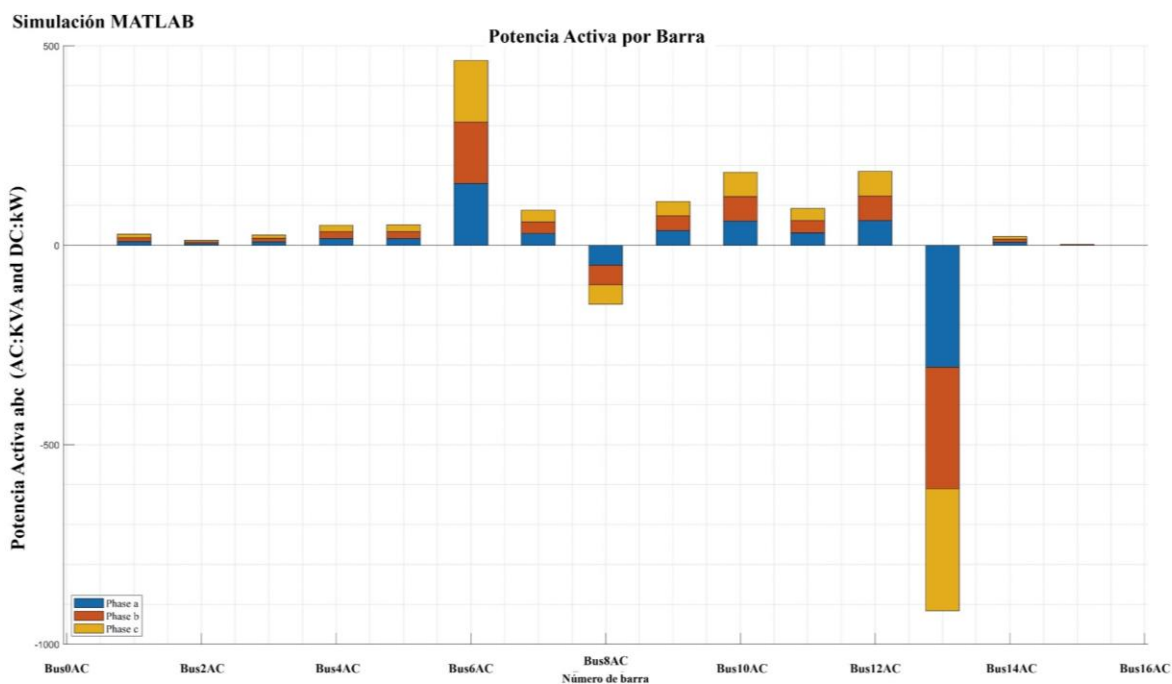


Figura 11. Potencia activa, demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [7].

### 5.3 Potencia reactiva por barra y análisis angular

Las Figuras 12 y 13 muestran la potencia reactiva por barra y su balance, el perfil de voltaje y la variación de desfase por los ángulos de voltaje en las barras del sistema

en los casos de demanda máxima y demanda mínima, respectivamente. La contribución de potencia reactiva en este sistema se encuentra en la barra 8 con el generador diésel y en la barra 13 con la contribución de la red externa.



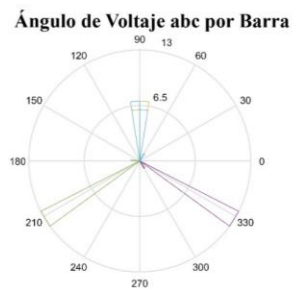
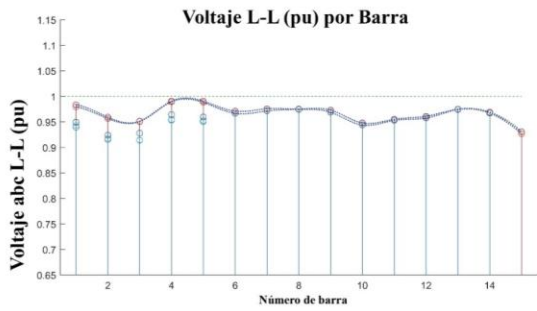
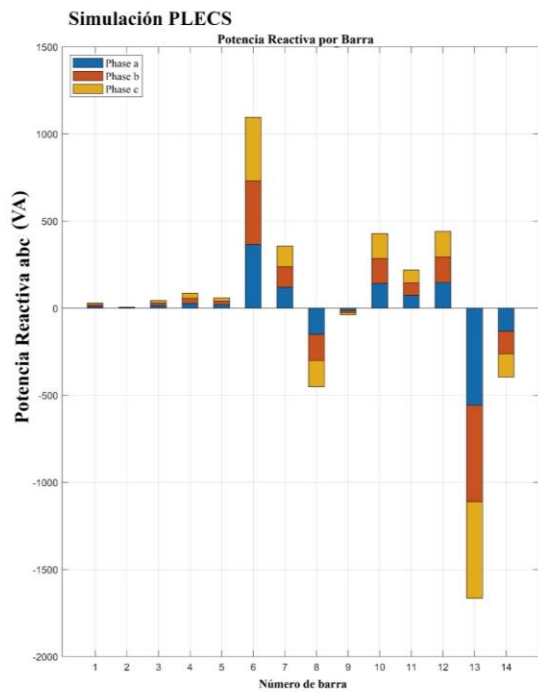
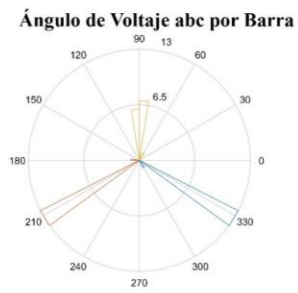
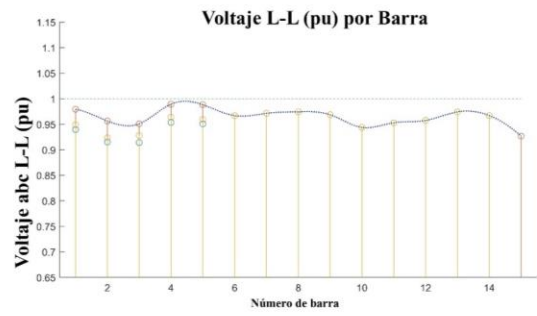
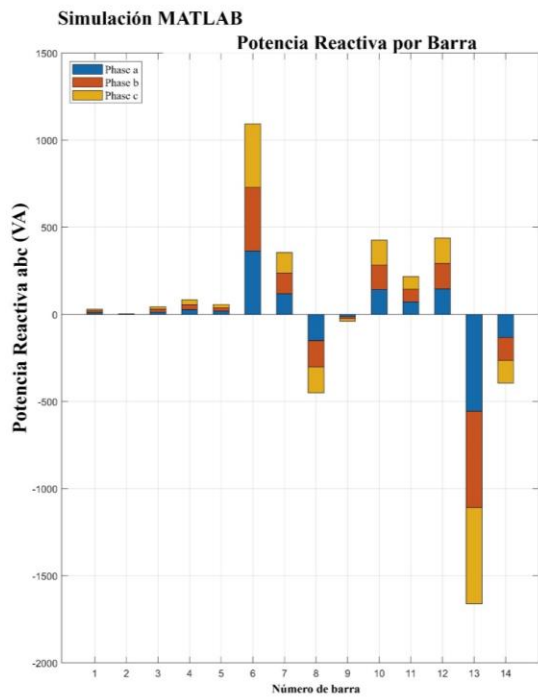


Figura 12. Potencia reactiva, demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [7].

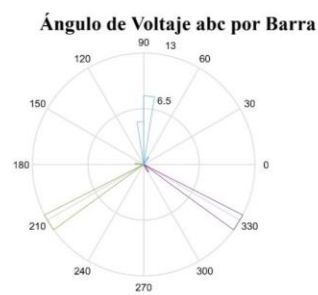
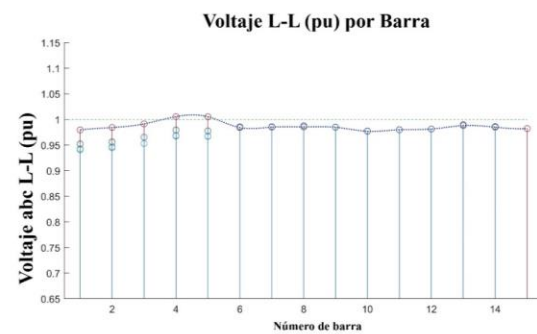
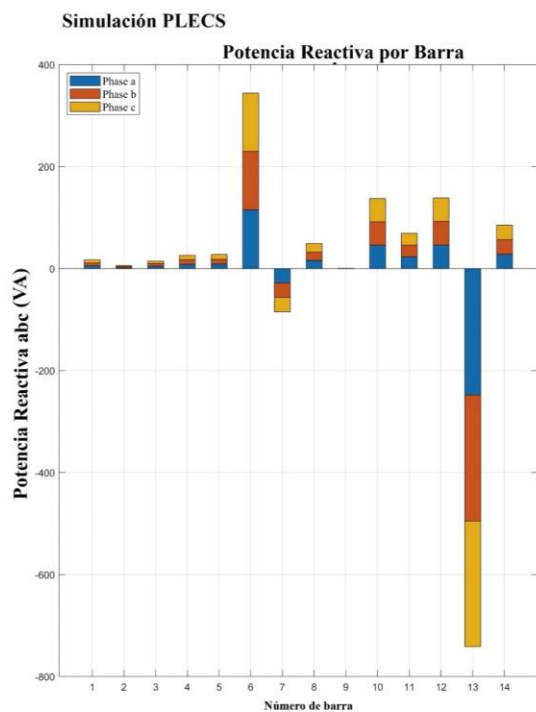
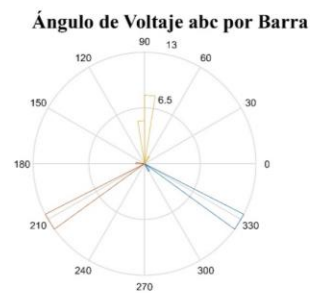
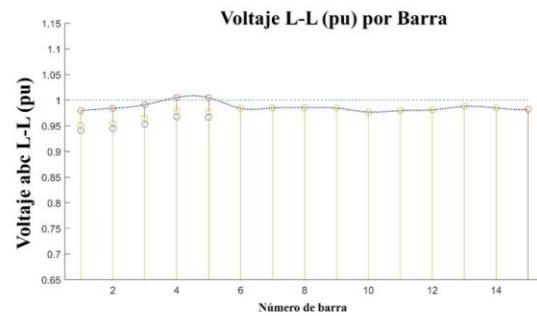
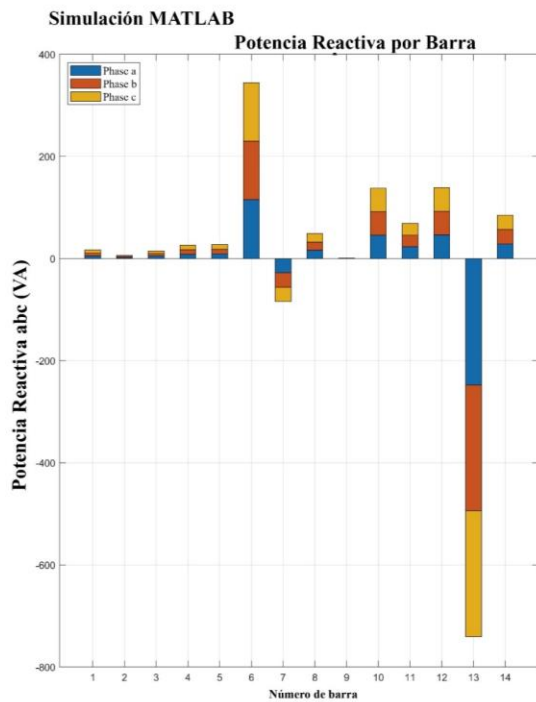


Figura 13. Potencia reactiva demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [7].

### 5.4 Pérdidas de potencia por línea

Las Figuras 14 y 15 muestran las pérdidas por fase en las diferentes líneas del sistema, tanto en el caso de demanda máxima como en el de demanda mínima. En ambas

gráficas se puede observar que las líneas que suministran energía a las barras de la red de baja tensión presentan las mayores pérdidas. Estas pérdidas desequilibradas de potencia activa son resultado de la carga

desequilibrada conectada a las barras, debido a la presencia de cargas monofásicas en la red de baja tensión del sistema.

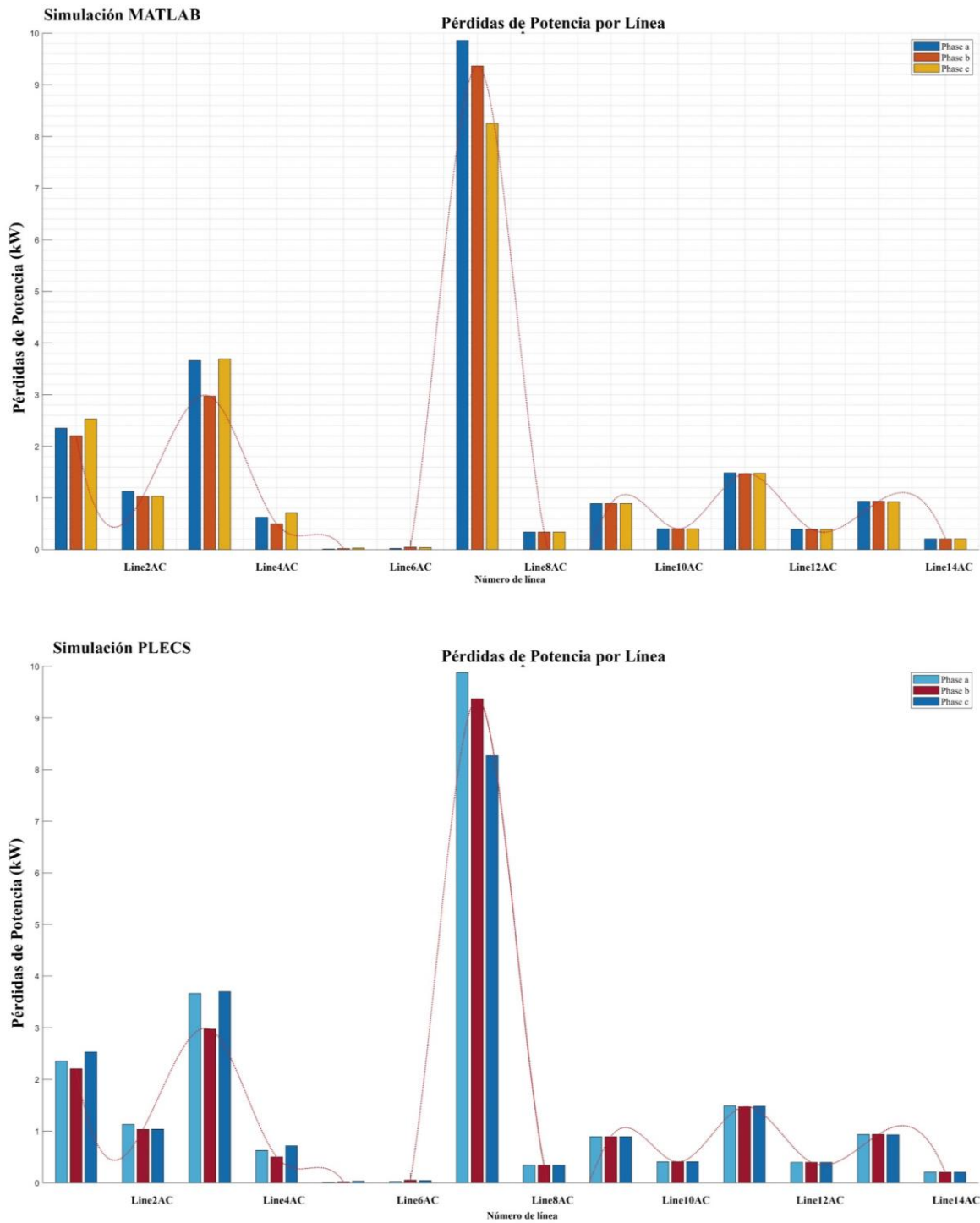


Figura 14. Pérdidas por línea demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [26].

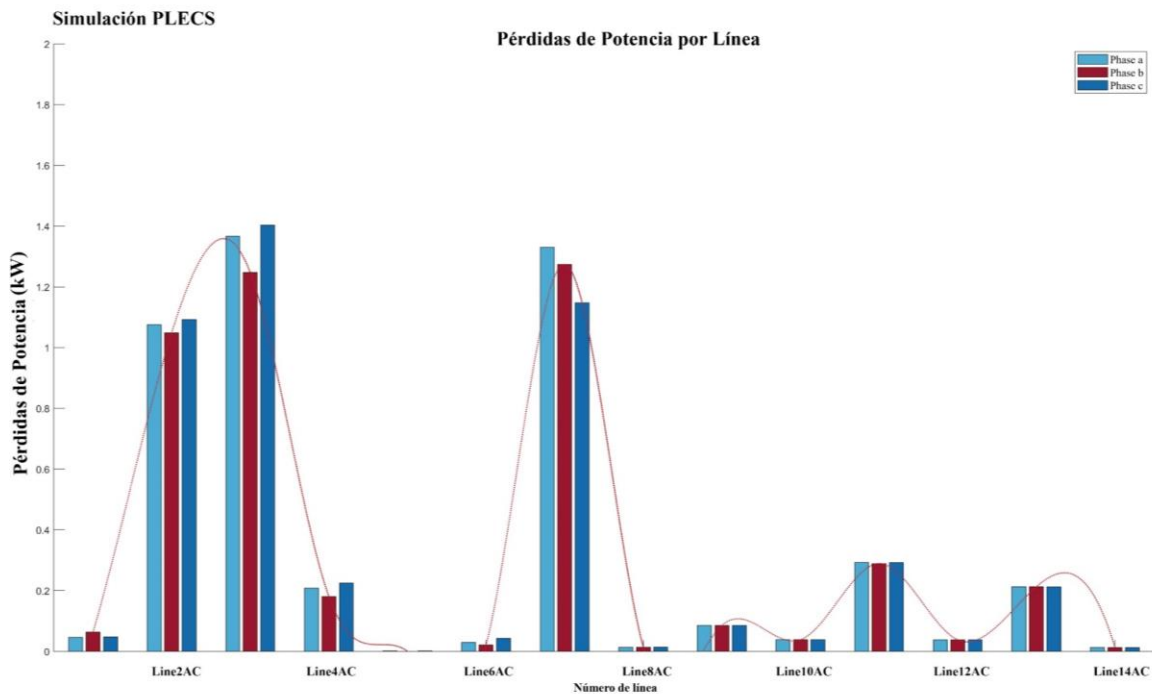
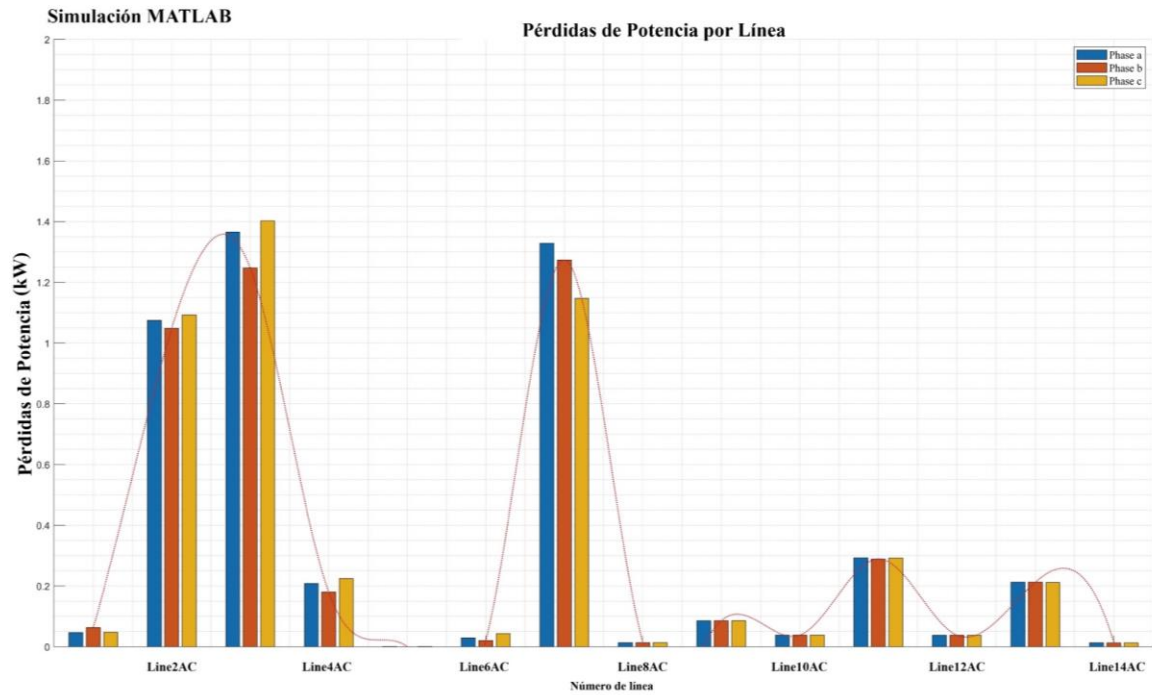


Figura 15. Pérdidas por línea demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [26].

### 5.5 Factor de potencia por barra

Las Figuras 16 y 17 muestran el factor de potencia para cada barra del sistema en los escenarios de demanda máxima y demanda mínima, respectivamente. En ambos casos,

se puede apreciar un significativo deterioro del factor de potencia en la barra 14, el cual actúa como una barra de transferencia en el sistema.

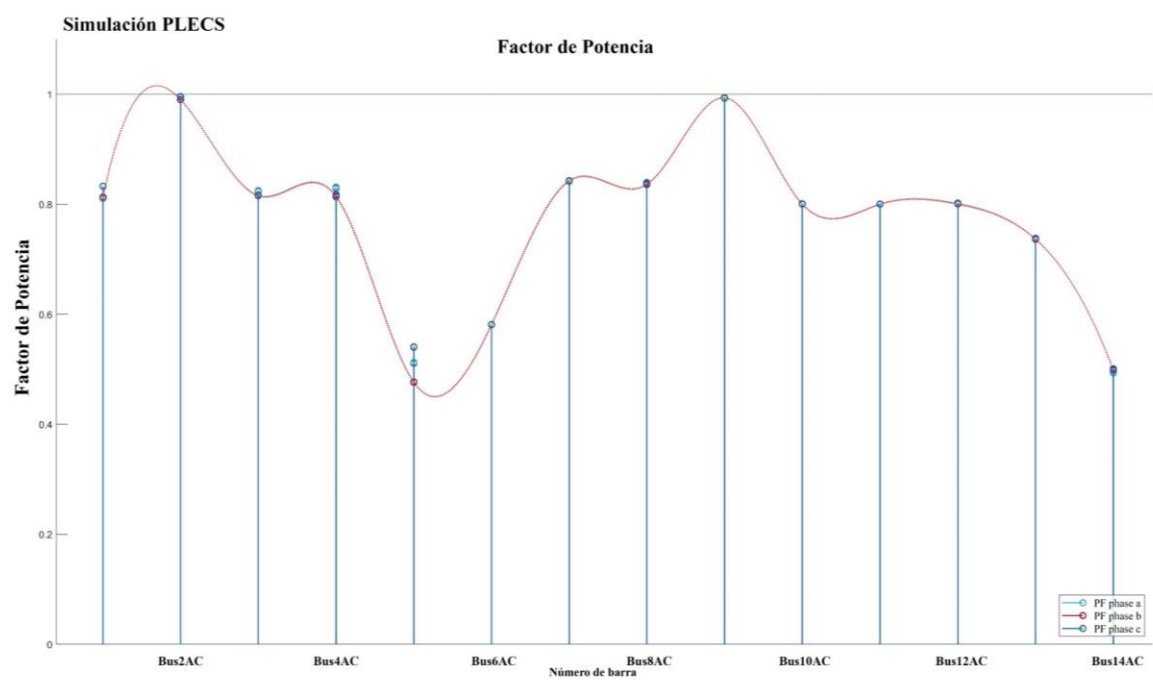
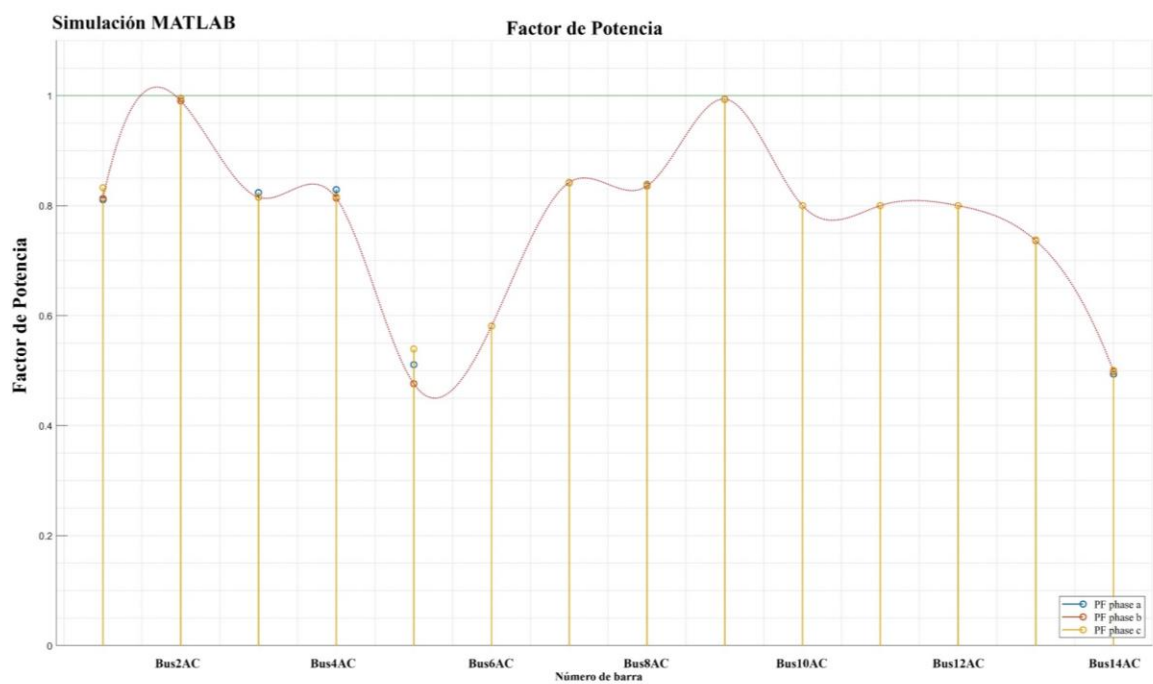


Figura 16. Factor de potencia máxima demanda Matlab/Simulink y PLECS [26].

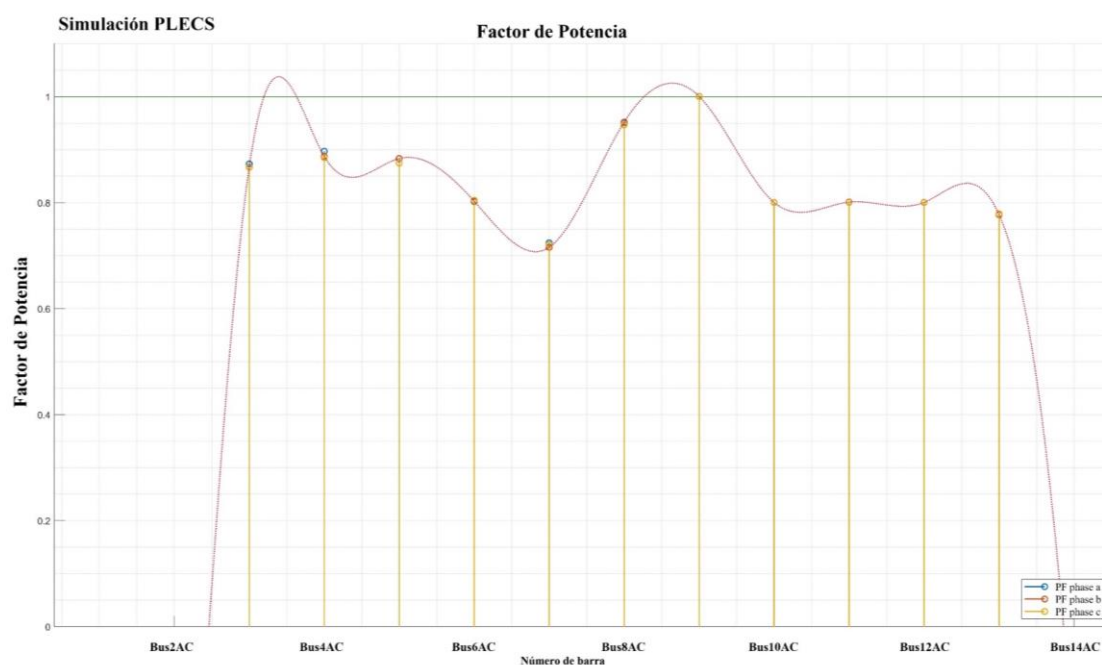
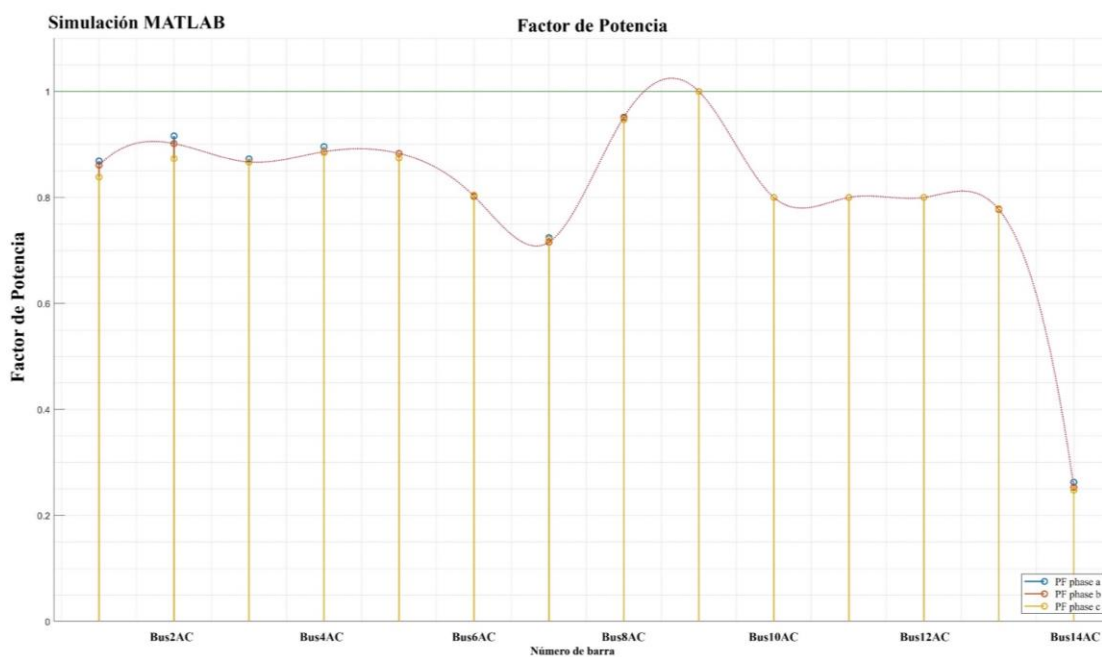


Figura 17. Factor de potencia mínima demanda Matlab/Simulink y PLECS [26].

## 5.6 Índice de Distorsión Armónica (TDH) por barra

En esta sección se realiza el análisis de la distorsión de la forma de onda del voltaje, que afecta significativamente la calidad de la energía eléctrica. Los resultados del THD

de la tensión para cada una de las barras del sistema y cada una de las fases correspondientes se presentan en las Figuras 18 y 19. Las figuras siguientes muestran los casos de máxima y mínima demanda, respectivamente.

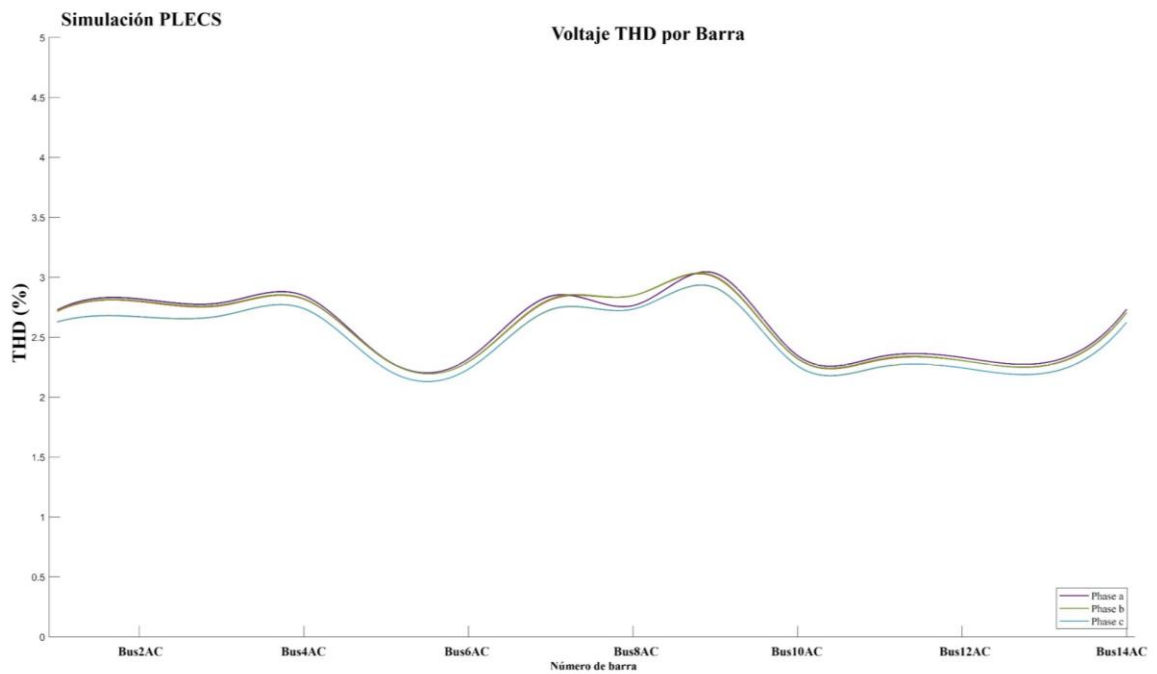
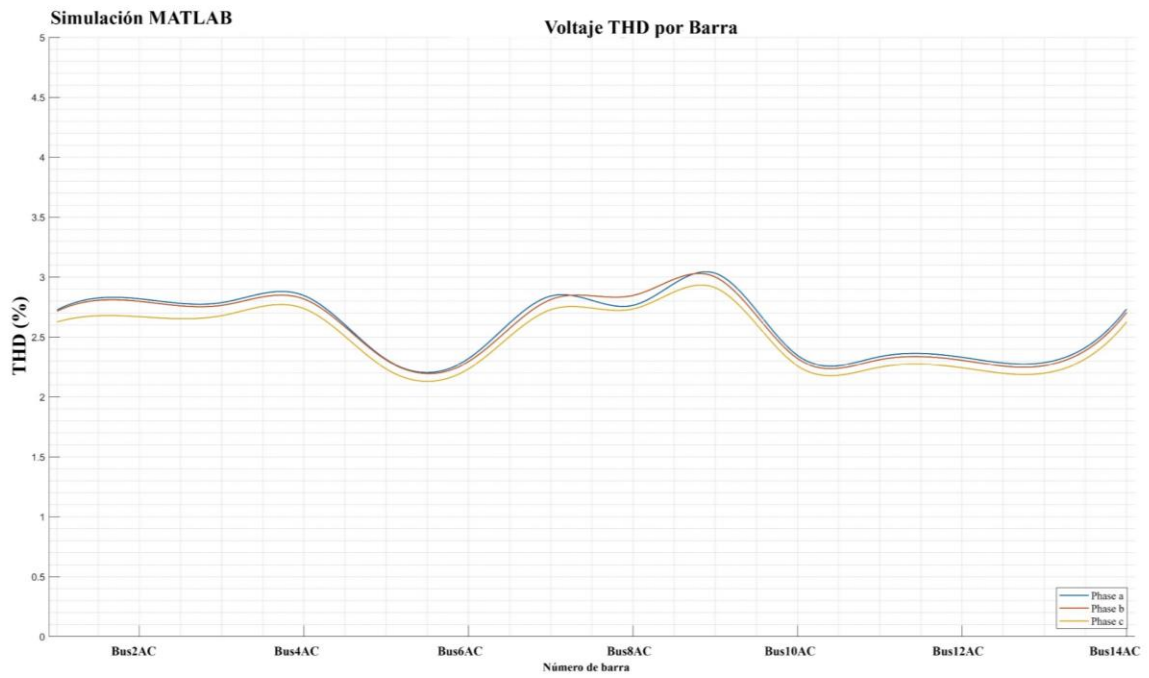


Figura 18. THD en % de demanda máxima en Matlab/Simulink y PLECS [26].

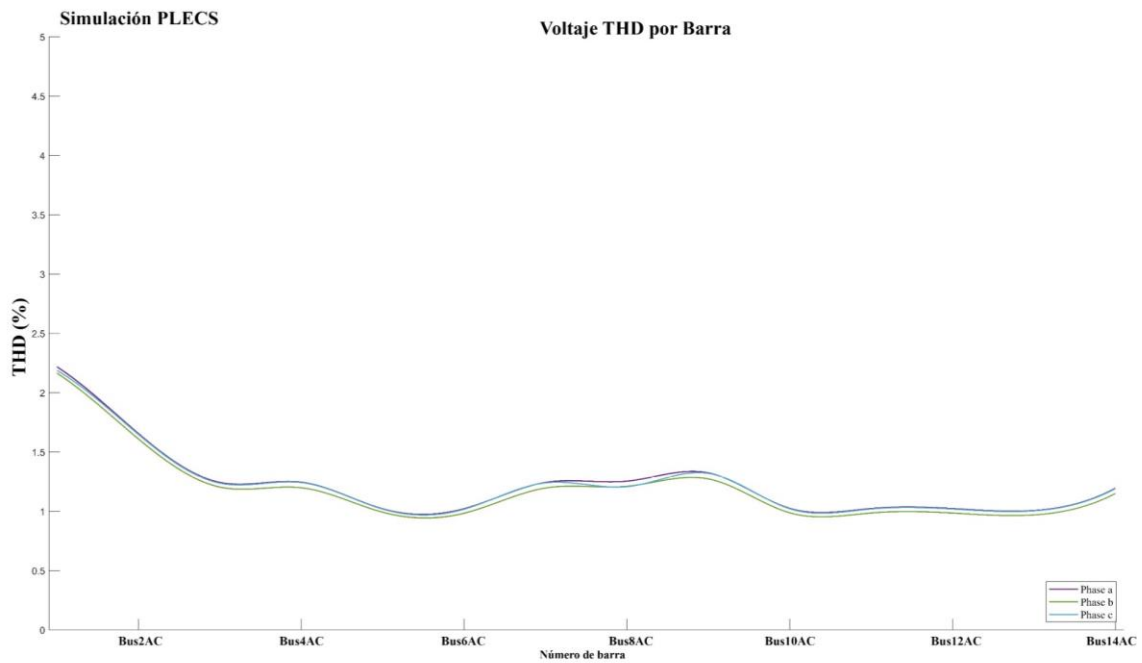
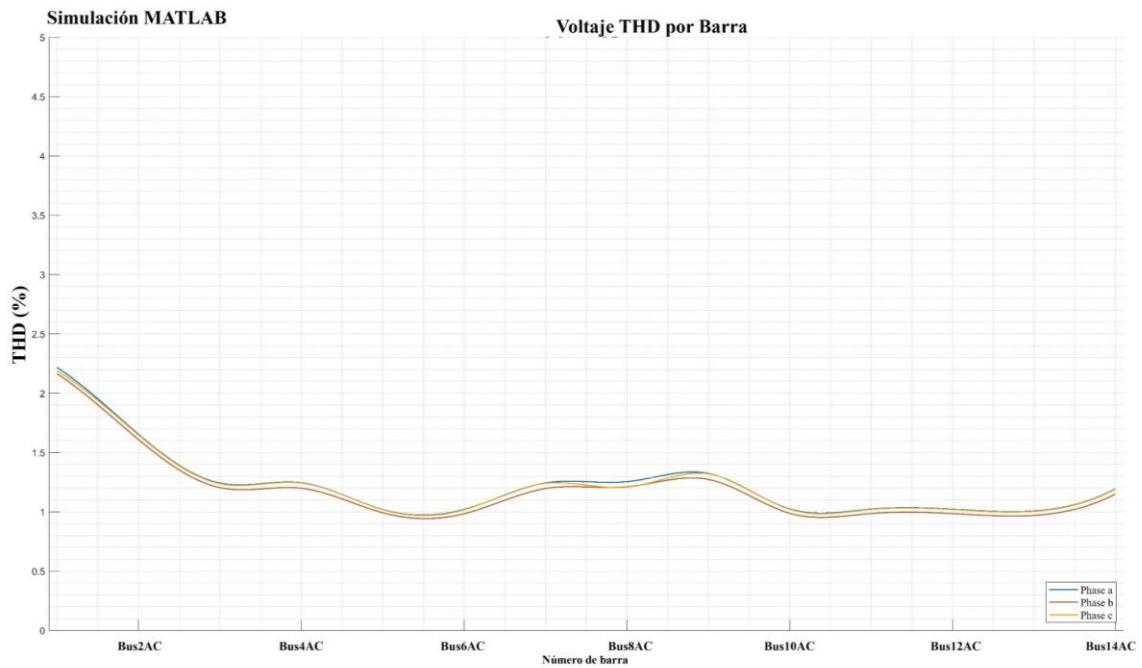


Figura 19. THD en % de demanda mínima en Matlab/Simulink y PLECS [26].

### 5.7 Diferencias entre la simulación Matlab/Simulink y la co-simulación PLECS y Matlab/Simulink

Se realiza una comparación mediante la resta algebraica de los valores absolutos de los resultados de la simulación de

Matlab/Simulink y la co-simulación de PLECS y Matlab/Simulink para determinar las diferencias entre ambos softwares de simulación. Esta comparación se aplica a cada uno de los parámetros, como el voltaje línea- línea, la potencia reactiva, las pérdidas de potencia por línea y el valor de THD, entre otras, utilizando la ecuación (2).



Durante este proceso, se asegura que las unidades y el orden de fases se mantengan.

En la tabla 3 y tabla 4 se presentan las diferencias en los perfiles de voltaje entre la simulación original y la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. Para evaluar el error, se consideró el valor con la mayor diferencia entre las simulaciones. En el caso de la demanda máxima, se observó una diferencia máxima de 0,0043 p.u., lo que corresponde a un error del 0,4439%. Por otro lado, en el caso de la demanda mínima, se registró una diferencia máxima de 0,0022 p.u., resultando en un error del 0,2271%.

Tabla 3. Diferencia algebraica de perfiles de voltaje en p.u. demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,0035 | 0,0041 | 0,0006 |
| 2   | 0,0024 | 0,0028 | 0,0004 |
| 3   | 0,0004 | 0,0005 | 0,0001 |
| 4   | 0,0011 | 0,0013 | 0,0002 |
| 5   | 0,0022 | 0,0025 | 0,0004 |
| 6   | 0,0038 | 0,0042 | 0,0007 |
| 7   | 0,0039 | 0,0043 | 0,0007 |
| 8   | 0,0007 | 0,0008 | 0,0001 |
| 9   | 0,0039 | 0,0043 | 0,0007 |
| 10  | 0,0037 | 0,0041 | 0,0006 |
| 11  | 0,0019 | 0,0021 | 0,0003 |
| 12  | 0,0032 | 0,0035 | 0,0005 |
| 13  | 0,0006 | 0,0007 | 0,0001 |
| 14  | 0,0017 | 0,0019 | 0,0003 |
| DC  | 0      | 0,0039 | 0      |

Tabla 4. Diferencia algebraica de perfiles de voltaje en p.u. demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b        | c      |
|-----|--------|----------|--------|
| 1   | 0,0019 | 5,05E-05 | 0,0016 |
| 2   | 0,0021 | 5,39E-05 | 0,0017 |
| 3   | 0,0002 | 6,38E-06 | 0,0002 |
| 4   | 0,0010 | 2,60E-05 | 0,0008 |
| 5   | 0,0007 | 1,73E-05 | 0,0005 |
| 6   | 0,0020 | 4,97E-05 | 0,0016 |
| 7   | 0,0011 | 2,74E-05 | 0,0009 |
| 8   | 0,0023 | 5,65E-05 | 0,0018 |
| 9   | 0,0005 | 1,22E-05 | 0,0004 |
| 10  | 0,0007 | 1,71E-05 | 0,0006 |

|    |        |          |        |
|----|--------|----------|--------|
| 11 | 0,0004 | 9,99E-06 | 0,0003 |
| 12 | 0,0004 | 9,43E-06 | 0,0003 |
| 13 | 0,0022 | 5,41E-05 | 0,0017 |
| 14 | 0,0014 | 3,64E-05 | 0,0012 |
| DC | 0      | 3,45E-05 | 0      |

En las tablas 5 y 6 se muestran las diferencias en la potencia activa entre la simulación original y la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. En ambos casos, se obtuvieron diferencias máximas de 0,9413 kW y 0,3397 kW para la demanda máxima y mínima, respectivamente. Estas diferencias representan errores inferiores al 0,5% en ambos casos.

Tabla 5. Diferencia algebraica de potencia activa en kW demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,0027 | 0,0034 | 0,0024 |
| 2   | 0,0464 | 0,0566 | 0,0403 |
| 3   | 0,0799 | 0,0968 | 0,0611 |
| 4   | 0,1117 | 0,1338 | 0,0898 |
| 5   | 0,0361 | 0,0382 | 0,0313 |
| 6   | 0,7794 | 0,9413 | 0,6477 |
| 7   | 0,2973 | 0,3594 | 0,2475 |
| 8   | 0,6104 | 0,7339 | 0,5042 |
| 9   | 0,0802 | 0,0967 | 0,0661 |
| 10  | 0,5405 | 0,6527 | 0,4491 |
| 11  | 0,0176 | 0,0213 | 0,0147 |
| 12  | 0,2249 | 0,2716 | 0,1869 |
| 13  | 0,1443 | 0,1739 | 0,1199 |
| 14  | 0,0329 | 0,0399 | 0,0278 |
| DC  | 0      | 0,0323 | 0      |

Tabla 6. Diferencia algebraica de potencia activa en kW demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,0014 | 0,0078 | 0,0054 |
| 2   | 0,0009 | 0,0053 | 0,0034 |
| 3   | 0,0015 | 0,0081 | 0,0055 |
| 4   | 0,0007 | 0,0036 | 0,0025 |
| 5   | 0,0018 | 0,0097 | 0,0072 |
| 6   | 0,0091 | 0,0482 | 0,0356 |
| 7   | 0,0025 | 0,0129 | 0,0097 |
| 8   | 0,0053 | 0,0279 | 0,0205 |

|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 9  | 0,0067 | 0,0348 | 0,0258 |
| 10 | 0,0018 | 0,0093 | 0,0068 |
| 11 | 0,0117 | 0,0619 | 0,0455 |
| 12 | 0,0245 | 0,1297 | 0,0954 |
| 13 | 0,0644 | 0,3397 | 0,2509 |
| 14 | 0,0016 | 0,0083 | 0,0059 |
| DC | 0      | 0,0015 | 0      |

En las tablas 7 y 8 se presentan las diferencias en la potencia reactiva entre la simulación original y la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. La diferencia máxima obtenida en el caso de máxima demanda es de 1,8139 kVAr, lo que corresponde a un error del 0,3279%. Para el caso de mínima demanda, se registró una diferencia de 0,4792 kVAr, representando un error del 0,3953%.

Tabla 7. Diferencia algebraica de potencia reactiva en kVAr demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,0017 | 0,0008 | 0,0022 |
| 2   | 0,0022 | 0,0014 | 0,0028 |
| 3   | 0,0202 | 0,0098 | 0,0260 |
| 4   | 0,0745 | 0,0366 | 0,1030 |
| 5   | 0,0559 | 0,0251 | 0,0737 |
| 6   | 0,2549 | 0,1191 | 0,3467 |
| 7   | 0,2082 | 0,0971 | 0,2833 |
| 8   | 0,2394 | 0,1127 | 0,3250 |
| 9   | 0,0302 | 0,0132 | 0,0399 |
| 10  | 0,3581 | 0,1674 | 0,4871 |
| 11  | 0,1940 | 0,0907 | 0,2639 |
| 12  | 0,1479 | 0,0691 | 0,2011 |
| 13  | 1,3373 | 0,6241 | 1,8139 |
| 14  | 0,3065 | 0,1420 | 0,4158 |

Tabla 8. Diferencia algebraica de potencia reactiva en kVAr demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,0097 | 0,0045 | 0,0015 |
| 2   | 0,0017 | 0,0009 | 0,0003 |
| 3   | 0,0029 | 0,0013 | 0,0004 |
| 4   | 0,0082 | 0,0037 | 0,0012 |
| 5   | 0,0024 | 0,0010 | 0,0004 |
| 6   | 0,0403 | 0,0169 | 0,0057 |
| 7   | 0,0618 | 0,0265 | 0,0090 |
| 8   | 0,0367 | 0,0151 | 0,0054 |

|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 9  | 0,0004 | 0,0002 | 0,0000 |
| 10 | 0,0084 | 0,0036 | 0,0012 |
| 11 | 0,0135 | 0,0057 | 0,0019 |
| 12 | 0,0397 | 0,0168 | 0,0057 |
| 13 | 0,4792 | 0,2020 | 0,0680 |
| 14 | 0,0023 | 0,0010 | 0,0003 |

Adicionalmente, en la tabla 9 y tabla 10 se establecen los valores de diferencia de pérdidas de línea entre la simulación original con la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. El valor máximo de la diferencia en el caso de máxima demanda es 0,0201 kW que representa un error de 0,2038%. por otro lado, en el caso de mínima demanda se tiene un valor de 1,76E-03 kW equivalente a 0,1324%.

Tabla 9. Diferencia algebraica pérdidas de línea en kW demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| LINEA | a      | b      | c      |
|-------|--------|--------|--------|
| 1     | 0,0025 | 0,0007 | 0,0026 |
| 2     | 0,0045 | 0,0013 | 0,0040 |
| 3     | 0,0056 | 0,0014 | 0,0055 |
| 4     | 0,0006 | 0,0001 | 0,0006 |
| 5     | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6     | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 |
| 7     | 0,0201 | 0,0060 | 0,0163 |
| 8     | 0,0005 | 0,0002 | 0,0005 |
| 9     | 0,0031 | 0,0010 | 0,0031 |
| 10    | 0,0010 | 0,0003 | 0,0010 |
| 11    | 0,0035 | 0,0011 | 0,0034 |
| 12    | 0,0015 | 0,0005 | 0,0015 |
| 13    | 0,0012 | 0,0004 | 0,0011 |
| 14    | 0,0007 | 0,0002 | 0,0006 |

Tabla 10. Diferencia algebraica de pérdidas de línea en kW demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| LINEA | a        | b        | c        |
|-------|----------|----------|----------|
| 1     | 4,32E-05 | 3,75E-05 | 2,53E-05 |
| 2     | 6,98E-04 | 4,33E-04 | 4,06E-04 |
| 3     | 1,44E-03 | 8,35E-04 | 8,45E-04 |
| 4     | 2,20E-04 | 1,21E-04 | 1,36E-04 |
| 5     | 2,25E-06 | 3,07E-07 | 1,08E-06 |
| 6     | 4,78E-05 | 2,16E-05 | 4,00E-05 |
| 7     | 1,76E-03 | 1,07E-03 | 8,68E-04 |
| 8     | 1,07E-05 | 6,73E-06 | 6,20E-06 |

|    |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|
| 9  | 1,41E-04 | 9,00E-05 | 8,10E-05 |
| 10 | 4,20E-05 | 2,68E-05 | 2,41E-05 |
| 11 | 2,16E-04 | 1,36E-04 | 1,23E-04 |
| 12 | 7,23E-05 | 4,61E-05 | 4,14E-05 |
| 13 | 3,79E-04 | 2,41E-04 | 2,16E-04 |
| 14 | 1,46E-05 | 9,08E-06 | 8,27E-06 |

En la tabla 11 y tabla 12 se establecen los valores de diferencia del factor de potencia de cada barra entre la simulación original con la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. Para ambos casos se obtuvieron valores de diferencia máxima de 0,0025 y 0,0012 para la demanda máxima y mínima, respectivamente. Estas diferencias representan errores de 0,3015% y 0,1500% respectivamente.

Tabla 11. Diferencia algebraica de factor de potencia en demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BARRA | a      | b      | c      |
|-------|--------|--------|--------|
| 1     | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 2     | 0,0003 | 0,0001 | 0,0002 |
| 3     | 0,0017 | 0,0009 | 0,0013 |
| 4     | 0,0025 | 0,0012 | 0,0018 |
| 5     | 0,0018 | 0,0009 | 0,0015 |
| 6     | 0,0003 | 0,0002 | 0,0002 |
| 7     | 0,0018 | 0,0009 | 0,0014 |
| 8     | 0,0015 | 0,0008 | 0,0012 |
| 9     | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| 10    | 0,0011 | 0,0005 | 0,0008 |
| 11    | 0,0005 | 0,0003 | 0,0004 |
| 12    | 0,0024 | 0,0013 | 0,0018 |
| 13    | 0,0009 | 0,0005 | 0,0007 |
| 14    | 0,0010 | 0,0005 | 0,0008 |

Tabla 12. Diferencia algebraica de factor de potencia en demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BARRA | a      | b      | c      |
|-------|--------|--------|--------|
| 1     | 0,0004 | 0,0004 | 0,0002 |
| 2     | 0,0007 | 0,0007 | 0,0002 |
| 3     | 0,0004 | 0,0003 | 0,0001 |
| 4     | 0,0012 | 0,0012 | 0,0004 |
| 5     | 0,0003 | 0,0003 | 0,0001 |
| 6     | 0,0003 | 0,0003 | 0,0001 |
| 7     | 0,0002 | 0,0002 | 0,0001 |
| 8     | 0,0004 | 0,0004 | 0,0001 |
| 9     | 0,0007 | 0,0007 | 0,0003 |
| 10    | 0,0004 | 0,0004 | 0,0002 |

|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 11 | 0,0012 | 0,0011 | 0,0004 |
| 12 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0002 |
| 13 | 0,0003 | 0,0002 | 0,0001 |
| 14 | 0,0004 | 0,0004 | 0,0001 |

Por último, la tabla 13 y tabla 14 se establecen los valores de TDH de la simulación original con la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink. En el caso de la demanda máxima, se observó una diferencia máxima de 0,0070%, lo que corresponde a un error del 0,3030%. Por otro lado, en el caso de la demanda mínima, se registró una diferencia máxima de 0,0019%, resultando en un error del 0,1529%.

Tabla 13. Diferencia THD% en demanda máxima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BARRA | a      | b      | c      |
|-------|--------|--------|--------|
| 1     | 0,0016 | 0,0055 | 0,0024 |
| 2     | 0,0017 | 0,0059 | 0,0026 |
| 3     | 0,0019 | 0,0064 | 0,0028 |
| 4     | 0,0012 | 0,0040 | 0,0017 |
| 5     | 0,0002 | 0,0007 | 0,0003 |
| 6     | 0,0005 | 0,0017 | 0,0007 |
| 7     | 0,0023 | 0,0079 | 0,0034 |
| 8     | 0,0004 | 0,0014 | 0,0006 |
| 9     | 0,0022 | 0,0076 | 0,0033 |
| 10    | 0,0011 | 0,0039 | 0,0017 |
| 11    | 0,0021 | 0,0070 | 0,0031 |
| 12    | 0,0002 | 0,0006 | 0,0003 |
| 13    | 0,0009 | 0,0031 | 0,0014 |
| 14    | 0,0003 | 0,0010 | 0,0004 |

Tabla 14. Diferencia THD% en demanda mínima entre Matlab/Simulink y PLECS

| BARRA | a      | b      | c        |
|-------|--------|--------|----------|
| 1     | 0,0015 | 0,0007 | 0,0002   |
| 2     | 0,0018 | 0,0008 | 0,0002   |
| 3     | 0,0019 | 0,0008 | 0,0002   |
| 4     | 0,0009 | 0,0004 | 0,0001   |
| 5     | 0,0016 | 0,0007 | 0,0002   |
| 6     | 0,0019 | 0,0008 | 0,0002   |
| 7     | 0,0008 | 0,0003 | 9,83E-05 |
| 8     | 0,0004 | 0,0002 | 5,44E-05 |
| 9     | 0,0010 | 0,0005 | 0,0001   |
| 10    | 0,0009 | 0,0004 | 0,0001   |
| 11    | 0,0011 | 0,0005 | 0,0001   |
| 12    | 0,0013 | 0,0006 | 0,0002   |

|    |        |        |          |
|----|--------|--------|----------|
| 13 | 0,0003 | 0,0001 | 3,47E-05 |
| 14 | 0,0008 | 0,0004 | 0,0001   |

Cabe mencionar que los resultados anteriores se obtuvieron en una estación de trabajo con las siguientes características: Procesador Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1,80GHz 1,99 GHz. Una RAM instalada 16,0 GB (15,9 GB utilizable). Sistema operativo de 64 bits, procesador x64. GPU Radeon (TM) 530 con 4,0 GB y 11,9 GB de memoria GPU total.

## 6 Trabajos futuros

En el futuro, se pueden llevar a cabo modelados y análisis de fallas, lo que no solo brinda la comprensión de los diferentes modos de fallas, incluyendo sus causas y efectos, sino también la oportunidad de estudiar metodologías óptimas para tomar medidas oportunas de detección, diagnóstico y localización. Adicional, la adopción a softwares de simulación diversos permite aproximarse a escenarios de demanda o fallos más realistas. Es también necesario analizar cómo puede afectar el aumento de la generación distribuida a las reservas disponibles del sistema y encontrar una solución adecuada. Adicional, es factible analizar los indicadores de confiabilidad y las propuestas de expansión de la red para el futuro crecimiento de la carga.

## 7 Conclusiones

Se llevó a cabo la replicación y modelado del sistema de prueba tipo benchmark para la MRH AC/DC de 14 barras IEEE utilizando el software PLECS en conjunto con Matlab/Simulink. Se validó la efectividad de la co-simulación al obtener resultados altamente similares a los conseguidos originalmente en Matlab/Simulink, con una diferencia inferior al 1%. Durante este proceso, se realizaron estimaciones de modificaciones

en la estructura original, enfocándose principalmente en la adaptación de las cargas, los sistemas fotovoltaicos y las baterías.

Se realizaron comparaciones exhaustivas entre los resultados obtenidos en la co-simulación PLECS y Matlab/Simulink, y los generados exclusivamente en Matlab/Simulink. Estas comparaciones revelaron diferencias máximas en los diferentes parámetros evaluados.

En relación con los perfiles de voltaje, se observó una diferencia máxima del 0,4439% en la demanda máxima, mientras que, en la demanda mínima, esta diferencia fue del 0,2271%. Por otro lado, la potencia activa mostró una diferencia máxima del 0,3979% en la demanda máxima y del 0,3362% en la demanda mínima.

En cuanto a la potencia reactiva, se registró una diferencia del 0,3279% en la demanda máxima y del 0,3953% en la demanda mínima. Además, las pérdidas por línea presentaron una diferencia máxima del 0,2038% en la demanda máxima, y en la demanda mínima, esta diferencia fue inferior al 0,1324%.

El factor de potencia exhibió una diferencia del 0,3015% en la demanda máxima y del 0,1500% en la demanda mínima. Por último, el THD presentó una diferencia mínima del 0,3030% en la demanda máxima y del 0,1529% en la demanda mínima.

Aunque se observaron estas diferencias, se mantuvieron dentro de rangos aceptables y se consideraron dentro de los límites apropiados para las simulaciones. Estos resultados indican que la co-simulación realizada en PLECS y Matlab/Simulink es efectiva y puede generar resultados similares a los obtenidos exclusivamente en Matlab/Simulink.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad y utilidad de la co-simulación utilizando PLECS, lo cual abre oportunidades para ampliar el estudio y considerar aplicaciones prácticas, como incremento de las MRH,

también el diseño de sistemas de carga para vehículos eléctricos y otros estudios relevantes en el campo de la generación distribuida (GD). En general, estos resultados son prometedores y fomentan la investigación y el avance en el ámbito de la generación distribuida y las energías renovables.

## 8 Referencias

- [1] P. Kayal and C. K. Chanda, "Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 2013, pp. 795–809, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.047.
- [2] D. Carrión and L. Ortiz, "Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos," *Ingenius*, vol. 10, pp. 44–48, 2013.
- [3] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, "Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7483497.
- [4] A. Téllez, A. Robayo, G. López, L. Ortiz, I. Isaac, and J. González, "Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm," 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [5] L. Ortiz Matos, A. Aguila Tellez, R. C. Hincapié Reyes, and J. . González Sanchez, "Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012020, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.
- [6] A. T. Aguila, L. M. Ortiz, and R. Orizondo, "Optimal Location and Dimensioning of Capacitors in Microgrids Using a Multicriteria Decision Algorithm," *Heliyon*, vol. 7, no. August, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [7] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonzalez, I. Isaac, and J. L. Gabriel, "Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode," *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [8] L. O. Matos, J. Wilson, and G. Sanchez, "Reconfiguration Strategy for Fault Tolerance of Power Distribution Systems Using Petri Net," in *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, 2016, doi: 10.1109/ETCM.2016.7750820.
- [9] Á. J. Pérez Pazmiño and L. Ortiz Matos, "Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico," *Ser. Científica la Univ. Ilas Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 1, pp. 80–96, 2022, [Online]. Available: <https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/1013>.
- [10] L. Ortiz, J. W. Gonzalez, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-santiago, "A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids," *Heliyon*, vol. 6, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [11] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116–122, 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.03.002.

- [12] T. Ackermann and T. Ackermann, "Distributed generation: a definition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 7796, no. August 2016, pp. 195–204, 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [13] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 66–74, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023.
- [14] M. M. Aman, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar, "Optimal placement and sizing of a DG based on a new power stability index and line losses," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 1296–1304, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.053.
- [15] A. Rengel, A. A. Téllez, L. Ortiz, and M. Ruiz, "Optimal Insertion of Energy Storage Systems Considering the Economic Dispatch and the Minimization of Energy," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 26, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16062593>.
- [16] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2197227.
- [17] M. A. Kashem and G. Ledwich, "Multiple distributed generators for distribution feeder voltage support," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 3, pp. 676–684, 2005, doi: 10.1109/TEC.2004.832090.
- [18] N. C. Sahoo, S. Ganguly, and D. Das, "Fuzzy-Pareto-dominance driven possibilistic model based planning of electrical distribution systems using multi-objective particle swarm optimization," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 881–893, 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2011.07.086.
- [19] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 360–370, 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030276.
- [20] M. Gomez-Gonzalez, A. López, and F. Jurado, "Optimization of distributed generation systems using a new discrete PSO and OPF," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 84, no. 1, pp. 174–180, 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2011.11.016.
- [21] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation Units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm," *Energy*, vol. 66, pp. 202–215, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.12.037.
- [22] N. S. Rau and Y. H. Wan, "Optimum Location of Resources in Distributed Planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2014–2020, 1994, doi: 10.1109/59.331463.
- [23] S. K. Injeti and N. Prema Kumar, "A novel approach to identify optimal access point and capacity of multiple DGs in a small, medium and large scale radial distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 142–151, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.043.
- [24] A. El-Fergany, "Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, no. 2015, pp. 1197–1205, 2015, doi:

- 10.1016/j.ijepes.2014.09.020.
- [25] A. F. Crossland, D. Jones, and N. S. Wade, "Planning the location and rating of distributed energy storage in LV networks using a genetic algorithm with simulated annealing," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 59, no. 2014, pp. 103–110, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.001.
- [26] A. Bayat, A. Bagheri, and R. Noroozian, "Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, no. 2016, pp. 360–371, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.039.
- [27] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, "A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets," *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [28] M. I. Stoilkova, "Análisis de las Prestaciones de simuladores para Estudio de Pérdidas y modelado Térmico de convertidores de potencia," *Handle Proxy*, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10017/49551>. [Accessed: 25-Apr-2023].
- [29] Electrical circuits, Plexim. [Online]. Available: <https://www.plexim.com/products/pl-ecs/electrical>. [Accessed: 25-Apr-2023].
- [30] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Aguila Tellez, "An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation," in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, p. 6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [31] A. T. Aguila, L. M. Ortiz, M. Ruiz, and S. Varela, "Optimal Location of Reclosers in Electrical Distribution Systems Considering Multicriteria Decision Through the Generation of Scenarios Using the Montecarlo Method," *SSRN Electron. J.*, vol. XX, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4121092.
- [32] J. L. M. Bastidas and L. O. Matos, "Localización de fallas en microredes eléctricas basado en un modelo Markoviano.," Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [33] D. R. Cruz Alvarez and L. Ortiz Matos, "Control de sistema de distribución eléctrica usando técnica descubrimiento de patrón (Pattern discovery technique)," Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [34] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, "Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC," Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [35] B. E. Ramírez Velasco and L. Ortiz Matos, "Estudio comparativo de métodos de detección e identificación de fallas (FDI) de sensado sobre el Control Local de micro redes Electricas Híbridas AC/DC," Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [36] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, "Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución," Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [37] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, "Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG," Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [38] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz

- Matos, “Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto  $H_\infty$  y estrategias de tolerancia a fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [39] S. I. Freire Piedra and L. Ortiz Matos, “Modelado y simulación de un sistema automático de adquisición de datos en centrales hidroeléctricas pequeñas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [40] L. Ortiz-Matos, L. B. Gutierrez-Zea, and J. W. Gonzalez-Sanchez, “A Methodology of Sensor Fault-tolerant Control on a Hierarchical Control for Hybrid Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 11, no. June, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3279821.
- [41] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, “Impact of voltage sensor faults on two-level hierarchical control required for Grid-forming VSCs in isolated Microgrids,” *It is Submitt. J. Rev.*, 2023.
- [42] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, “Mejoramiento de la fiabilidad en microredes mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [43] B. Ramírez, L. Ortiz, and W. Pavón, “Análisis Dinámico Comparativo de Métodos de Detección e identificación de Fallas de Sensado sobre el Control Local de Micro-redes,” *RISTI – Rev. Ibérica Sist. e Tecnol. Informação*, vol. E45, no. 44, pp. 1–17, 2021, [Online]. Available: <http://www.risti.xyz/issues/ristie45.pdf>.
- [44] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [45] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonzalez, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC/DC & DC microgrid test system simulation (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation>),” MATLAB Central File Exchange, 2020, [Online]. Available: [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation?s_tid=srchtitle).
- [46] F. A. Urgiles Navarrete and L. Ortiz Matos, “Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [47] F. Urgiles, L. Ortiz, and A. Aguila, “Estrategia de identificación no-lineal para Fuentes de Generación Distribuida acopladas electrónicamente a Micro-redes en CA / CC basada en NARX,” *RISTI – Rev. Ibérica Sist. e Tecnol. Informação*, no. E48, pp. 576–593, 2021, [Online]. Available: <http://www.risti.xyz/issues/ristie48.pdf>.
- [48] L. Ortiz and A. Aguila, “Modeling and Control of an Automated System in Surgical Microscopy Based on Petri Nets,” *IEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 96–101, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7430067.
- [49] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D’haeseleer, “Distributed generation: definition, benefits and issues,” *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.



- [50] I. Edmundo, M. Monroy, and D. Romero Romero, “Estudio Estocástico de Cargabilidad en Líneas de Transmisión,” Instituto Politécnico Nacional, 2008.
- [51] G. José, *Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión*, Tercera. España: Thomson Paraninfo, 2003.
- [52] S. M. Dawoud, X. Lin, and M. I. Okba, “Optimal placement of different types of RDGs based on maximization of microgrid loadability,” *J. Clean. Prod.*, vol. 168, no. 2017, pp. 63–73, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.003.

## 8.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 15. Matriz estado del arte

| Simulación y validación tipo benchmark de una micro-red híbrida en AC/DC basado en co-simulación Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) y Matlab/Simulink. |                    |   |                                     |           |            |                         |                         |                |                          |                  |                              |                        |                            |                     |                           |                                      |                                |                        |                             |                          |                            |                                |                                   |
|--|--------------------|---|-------------------------------------|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| DATOS  |                    |   |                                     | TEMÁTICA  |            |                         |                         |                | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA |                  |                              |                        | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA |                     |                           | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA |                                |                        | SOLUCIÓN PROPUESTA          |                          |                            |                                |                                   |
| ITEM   | AÑO DE PUBLICACIÓN | TÍTULO DEL ARTÍCULO   | NÚMERO DE CITAS PUBLISHED OR PERISH | Micro-red | Tipologías | Simulación digital para | Simulación digital para | Co-simulación. | Sistemas tipo            | Validar mediante | Estimar cambios en el modelo | Evaluar los resultados | Pérdidas en la             | Modelación en PLECS | Operación de la Micro-red | Comparación de resultados.           | Adaptación de la co-simulación | Análisis de resultados | Comparación de simulaciones | Réplica de la simulación | Analizar resultados de las | Modo de operación de la Micro- | Diferencia entre los softwares de |
| 1  | 2022               | Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico                       | 6                                   | ☒         | ☐          | ☒                       | ☒                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☒                            | ☒                      | ☒                          | ☒                   | ☒                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☒                           | ☒                        | ☒                          | ☐                              | ☐                                 |
| 2  | 2016               | A literature review of Microgrids: A functional layer based classification  | 258                                 | ☒         | ☒          | ☐                       | ☐                       | ☐              | ☒                        | ☒                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☒                   | ☒                         | ☒                                    | ☒                              | ☐                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☒                              | ☒                                 |
| 3  | 2018               | Transient Analysis of Distributed Generation AC Microgrid using ETAP  | 14                                  | ☐         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☒                      | ☐                          | ☒                   | ☒                         | ☒                                    | ☐                              | ☐                      | ☒                           | ☒                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 4  | 2017               | A review on control strategies of AC/DC micro grid  | 38                                  | ☒         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☐                            | ☒                      | ☐                          | ☐                   | ☒                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☐                        | ☒                          | ☒                              | ☐                                 |
| 5  | 2015               | Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures–A Comprehensive Review   | 285                                 | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☒                            | ☒                      | ☐                          | ☒                   | ☐                         | ☒                                    | ☒                              | ☐                      | ☒                           | ☒                        | ☒                          | ☒                              | ☐                                 |
| 6  | 2013               | Microgrids concept, 1st ed.   | 114                                 | ☒         | ☐          | ☐                       | ☐                       | ☒              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☒                      | ☐                          | ☐                   | ☒                         | ☐                                    | ☐                              | ☐                      | ☒                           | ☒                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 7  | 2020               | Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode  | 64                                  | ☒         | ☒          | ☒                       | ☒                       | ☒              | ☒                        | ☒                | ☒                            | ☒                      | ☒                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☒                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 8  | 2020               | A review on control and faulttolerant control systems of AC/DC microgridreded transmission line switching for congestion management of interconnected power systems | 64                                  | ☒         | ☒          | ☒                       | ☒                       | ☒              | ☒                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☒                          | ☒                   | ☒                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☒                           | ☐                        | ☒                          | ☒                              | ☐                                 |
| 9  | 2017               | A Review on Microgrid Technology with Distributed Energy  | 89                                  | ☒         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☒                      | ☒                          | ☒                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☒                           | ☐                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 10   | 2020               | Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC              | 2                                   | ☒         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☒                      | ☐                          | ☐                   | ☒                         | ☒                                    | ☒                              | ☐                      | ☐                           | ☒                        | ☒                          | ☐                              | ☐                                 |
| 11   | 2020               | A review on control and faulttolerant control systems of AC/DC microgrids.  | 64                                  | ☒         | ☒          | ☒                       | ☒                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☒                      | ☒                           | ☐                        | ☒                          | ☒                              | ☒                                 |
| 12   | 2016               | Power flow monitoring and analysis for 24.6 MW at 6.9 kV  | 9                                   | ☒         | ☐          | ☒                       | ☒                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☒                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |

## Simulación y validación tipo benchmark de una micro-red híbrida en AC/DC basado en co-simulación Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) y Matlab/Simulink.

| ITEM | AÑO DE PUBLICACIÓN | DATOS   |                                     |   | TEMÁTICA  |            |                         |                         |                | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA |                  |                              |                        | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA |                     |                           | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA |                                |                        | SOLUCIÓN PROPUESTA          |                          |                            |                                |                                   |
|------|--------------------|---|-------------------------------------|---|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
|      |                    | TÍTULO DEL ARTÍCULO   | NÚMERO DE CITAS PUBLISHED OR PERISH |   | Micro-red | Tipologías | Simulación digital para | Simulación digital para | Co-simulación. | Sistemas tipo            | Validar mediante | Estimar cambios en el modelo | Evaluar los resultados | Pérdidas en la             | Modelación en PLECS | Operación de la Micro-red | Comparación de resultados.           | Adaptación de la co-simulación | Análisis de resultados | Comparación de simulaciones | Réplica de la simulación | Analizar resultados de las | Modo de operación de la Micro- | Diferencia entre los softwares de |
|      |                    | bus Diesel Power Plant(DPP) using ETAP  |                                     |   |           |            |                         |                         |                |                          |                  |                              |                        |                            |                     |                           |                                      |                                |                        |                             |                          |                            |                                |                                   |
| 13   | 2019               | An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC/DC Microgrid Simulation  | 18                                  | ☒ | ☐         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☒                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 14   | 2018               | Hierarchical Reliability Modeling of an Islanded Hybrid AC/DC Microgrid   | 4                                   | ☒ | ☐         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☒                   | ☐                         | ☒                                    | ☐                              | ☒                      | ☒                           | ☒                        | ☒                          | ☐                              | ☐                                 |
| 15   | 2011               | Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review   | 479                                 | ☒ | ☐         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☒                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 16   | 2020               | A Novel Incentive Mechanism for CCHP-Based Microgrids in Spinning Reserve   | 13                                  | ☐ | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 17   | 2019               | Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC   | 1                                   | ☒ | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☒                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☐                          | ☒                   | ☐                         | ☐                                    | ☐                              | ☐                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 18   | 2015               | AC and DC technology in microgrids: A review  | 3                                   | ☐ | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☒                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 19   | 2019               | Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto H <sub>∞</sub> y estrategias de tolerancia a fallas                     | 12                                  | ☒ | ☐         | ☒          | ☐                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 20   | 2018               | Techno-economic potential of a renewable energybased microgrid system for a sustainable large-scale residential community in Beijing, China | 97                                  | ☐ | ☐         | ☒          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☒                      | ☐                          | ☒                   | ☐                         | ☒                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 21   | 2020               | Review of Switching and Control Techniques of Solar Microgrids  | 6                                   | ☒ | ☐         | ☒          | ☐                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 22   | 2016               | Effects of cyber attacks on islanded microgrid frequency control  | 18                                  | ☐ | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☒                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☒                              | ☐                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☒                              | ☐                                 |
| 23   | 2019               | Nanogrid for Energy Aware Buildings   | 13                                  | ☐ | ☐         | ☒          | ☐                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☒                            | ☐                      | ☐                          | ☒                   | ☐                         | ☐                                    | ☐                              | ☒                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☐                              | ☒                                 |
| 24   | 2016               | Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections   | 23                                  | ☒ | ☐         | ☐          | ☒                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☒                | ☐                            | ☐                      | ☒                          | ☐                   | ☐                         | ☒                                    | ☐                              | ☐                      | ☐                           | ☒                        | ☐                          | ☐                              | ☐                                 |
| 25   | 2017               | Optimization of Renewable Energy Resources in Hybrid Energy Systems   | 63                                  | ☒ | ☐         | ☒          | ☐                       | ☐                       | ☐              | ☐                        | ☐                | ☐                            | ☒                      | ☐                          | ☐                   | ☐                         | ☐                                    | ☐                              | ☐                      | ☐                           | ☐                        | ☐                          | ☐                              | ☒                                 |

## Simulación y validación tipo benchmark de una micro-red híbrida en AC/DC basado en co-simulación Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (PLECS) y Matlab/Simulink.

| ITEM      | DATOS              |  |                                     | TEMÁTICA                            |                          |                                     |                                     |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA            |                                     |                          |                                     | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA |                                     |                            | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA |                                     |                             | SOLUCIÓN PROPUESTA       |                                     |                                     |                                     |
|-----------|--------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|           | AÑO DE PUBLICACIÓN | TÍTULO DEL ARTÍCULO  | NÚMERO DE CITAS PUBLISHED OR PERISH | Micro-red                           | Tipologías               | Simulación digital para             | Simulación digital para             | Co-simulación.                      | Sistemas tipo                       | Validar mediante                    | Estimar cambios en el modelo        | Evaluar los resultados   | Pérdidas en la                      | Modelación en PLECS        | Operación de la Micro-red           | Comparación de resultados. | Adaptación de la co-simulación       | Análisis de resultados              | Comparación de simulaciones | Réplica de la simulación | Análisis de resultados de las       | Modo de operación de la Micro-      | Diferencia entre los softwares de   |
| 26        | 2014               | GridLAB-D: An Agent-Based Simulation Framework for Smart Grids                                       | 23                                  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 27        | 2020               | PLEXIM   | 1                                   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 28        | 2021               | Prestaciones de simuladores para Estudio de Pérdidas y modelado Térmico de convertidores de potencia | 6                                   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input checked="" type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| 29        | 2019               | Electrical circuits, Plexim  | 1                                   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| 30        | 2017               | Co-Simulation  | 234                                 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 31        | 2017               | A Review of Co-Simulation Methodologies and Tools for Multi-Disciplinary Systems                     | 28                                  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| 32        | 2016               | Benchmarking electrical methods for rapid estimation of root biomass.                                | 46                                  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 33        | 2022               | Revisión de metodologías y aplicaciones de Benchmarking Energético en la industria                   | 0                                   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| CANTIDAD: |                    |  |                                     | 21                                  | 6                        | 20                                  | 17                                  | 7                                   | 6                                   | 11                                  | 16                                  | 15                       | 10                                  | 10                         | 13                                  | 4                          | 13                                   | 8                                   | 16                          | 10                       | 13                                  | 15                                  | 7                                   |

8.2 Resumen de Indicadores

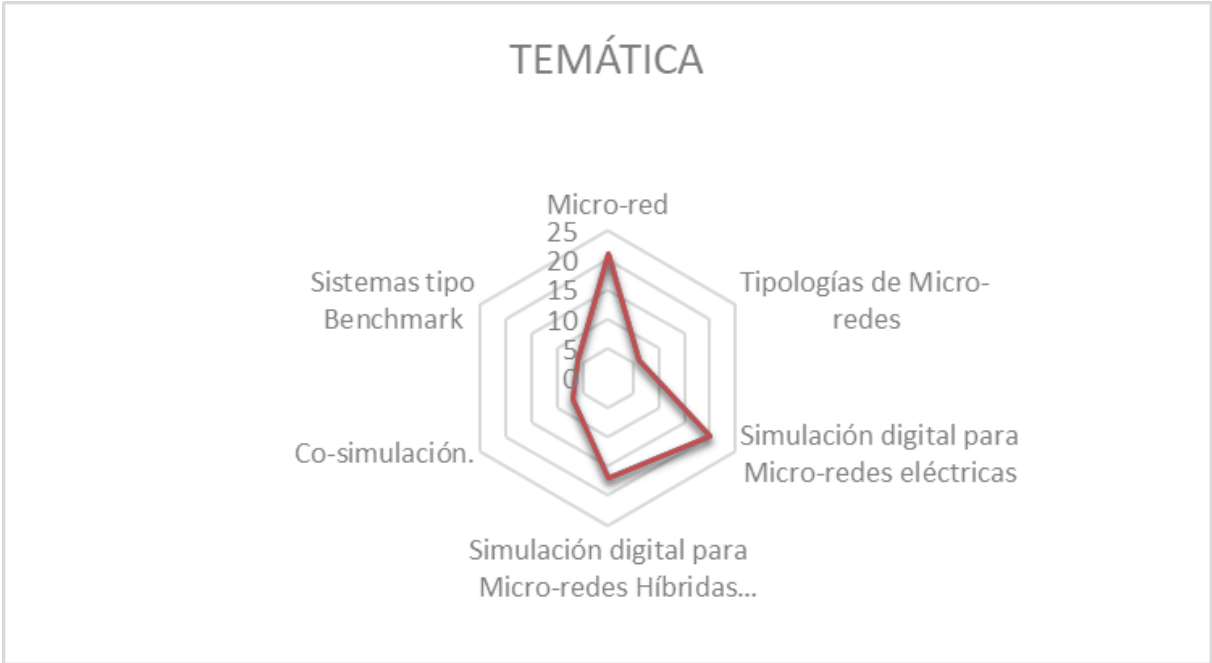


Figura 20. Resumen de la temática del estado del arte.

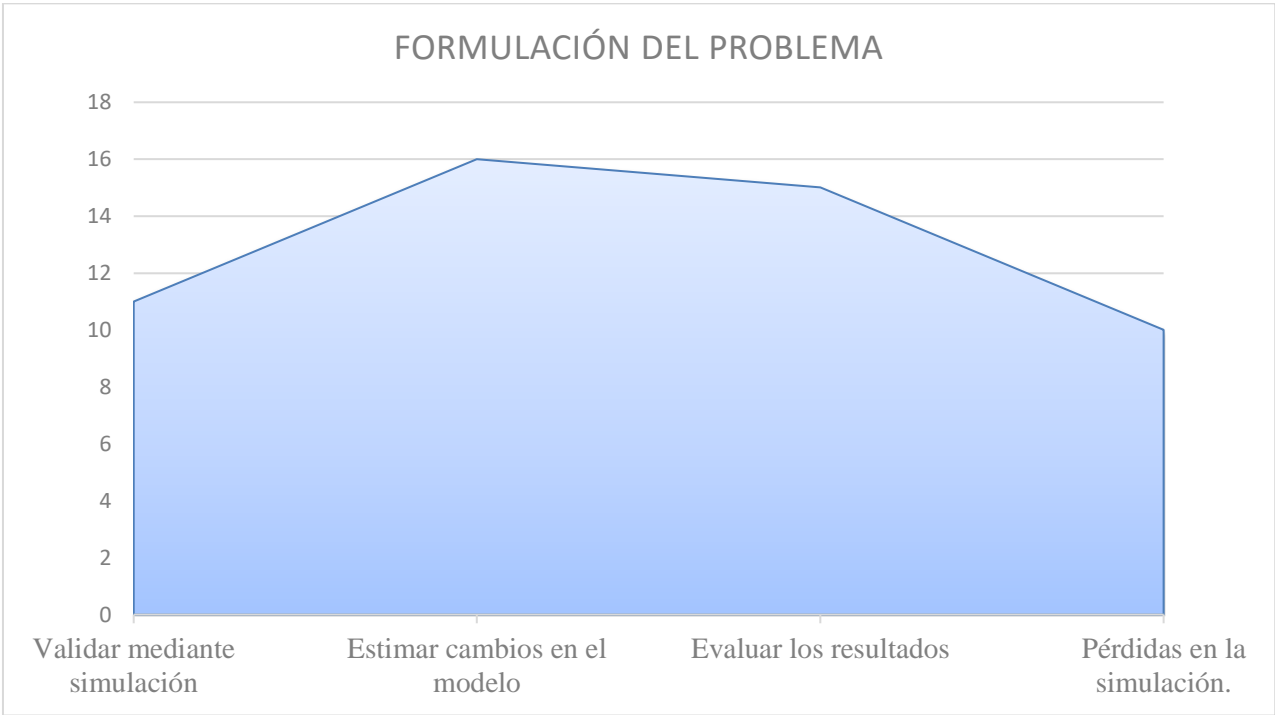


Figura 21. Indicador de la formulación del problema.

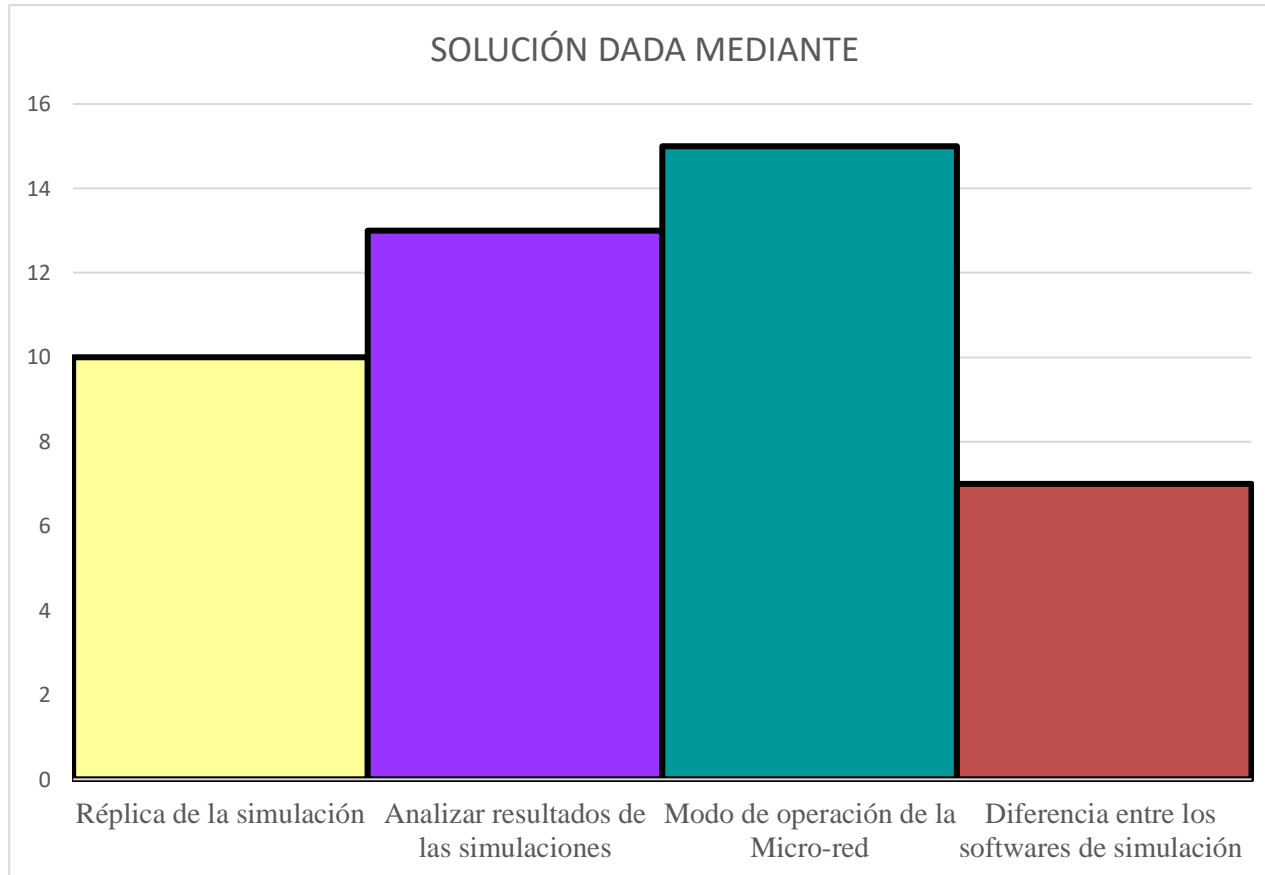


Figura 22. Indicador de la solución dada.

## 9 Anexos

### Demanda máxima.

Tabla 16. Perfiles de voltaje en p.u. demanda máxima, caso base.

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,9396 | 0,9793 | 0,9489 |
| 2   | 0,9154 | 0,9565 | 0,9236 |
| 3   | 0,9141 | 0,9508 | 0,9279 |
| 4   | 0,9536 | 0,9893 | 0,9640 |
| 5   | 0,9507 | 0,9883 | 0,9593 |
| 6   | 0,9667 | 0,9668 | 0,9667 |
| 7   | 0,9714 | 0,9714 | 0,9714 |
| 8   | 0,9744 | 0,9744 | 0,9745 |
| 9   | 0,9686 | 0,9686 | 0,9687 |
| 10  | 0,9437 | 0,9438 | 0,9437 |
| 11  | 0,9529 | 0,9529 | 0,9529 |
| 12  | 0,9574 | 0,9575 | 0,9574 |
| 13  | 0,9742 | 0,9742 | 0,9742 |
| 14  | 0,9671 | 0,9671 | 0,9671 |
| DC  | 0      | 0,9266 | 0      |

Tabla 17. Potencia activa en kW demanda máxima, caso base.

| BUS | a         | b         | c         |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1   | -13,7453  | -14,4320  | -14,3801  |
| 2   | -13,5922  | -13,7305  | -14,2030  |
| 3   | 21,3290   | 21,4039   | 19,6176   |
| 4   | 40,7851   | 40,4670   | 39,4666   |
| 5   | 11,8171   | 10,3588   | 12,3399   |
| 6   | 260,3916  | 260,4437  | 260,4707  |
| 7   | 185,0905  | 185,2942  | 185,4805  |
| 8   | -230,6209 | -229,6407 | -229,2726 |
| 9   | 109,3663  | 109,3094  | 108,6021  |
| 10  | 189,8815  | 189,9135  | 189,8997  |
| 11  | 96,7949   | 96,8112   | 96,8042   |
| 12  | 195,4278  | 195,4606  | 195,4465  |
| 13  | -603,9773 | -602,6702 | -604,0953 |
| 14  | -74,7820  | -75,0462  | -75,9334  |
| DC  | 0         | -8,0814   | 0         |

Tabla 18. Potencia reactiva en kVAr demanda máxima, caso base.

| BUS | a       | b       | c       |
|-----|---------|---------|---------|
| 1   | 9,9305  | 10,3380 | 9,5590  |
| 2   | 1,4281  | 1,9332  | 1,3309  |
| 3   | 14,6864 | 15,2021 | 13,9178 |

|    |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 4  | 27,5013   | 28,9207   | 27,9437   |
| 5  | 19,8891   | 19,1270   | 19,2634   |
| 6  | 364,7078  | 364,7200  | 364,7226  |
| 7  | 118,8984  | 118,6101  | 118,9307  |
| 8  | -149,8500 | -150,8578 | -149,5483 |
| 9  | -13,1506  | -12,2848  | -12,7789  |
| 10 | 142,4111  | 142,4389  | 142,4241  |
| 11 | 72,5964   | 72,6105   | 72,6030   |
| 12 | 146,5709  | 146,5994  | 146,5842  |
| 13 | -554,5918 | -553,8131 | -553,0491 |
| 14 | -131,7698 | -130,6169 | -131,4295 |

Tabla 19. Pérdidas de línea en kW demanda máxima, caso base.

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 2,3540 | 2,2062 | 2,5286 |
| 2   | 1,1266 | 1,0306 | 1,0346 |
| 3   | 3,6626 | 2,9716 | 3,6949 |
| 4   | 0,6259 | 0,4998 | 0,7131 |
| 5   | 0,0101 | 0,0204 | 0,0292 |
| 6   | 0,0244 | 0,0483 | 0,0424 |
| 7   | 9,8590 | 9,3642 | 8,2533 |
| 8   | 0,3397 | 0,3396 | 0,3396 |
| 9   | 0,8897 | 0,8898 | 0,8897 |
| 10  | 0,4043 | 0,4044 | 0,4044 |
| 11  | 1,4847 | 1,4705 | 1,4787 |
| 12  | 0,3929 | 0,3929 | 0,3929 |
| 13  | 0,9340 | 0,9352 | 0,9272 |
| 14  | 0,2069 | 0,2047 | 0,2044 |

Tabla 20. Factor de potencia en demanda máxima, caso base.

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,8106 | 0,8129 | 0,8328 |
| 2   | 0,9945 | 0,9902 | 0,9956 |
| 3   | 0,8236 | 0,8153 | 0,8156 |
| 4   | 0,8291 | 0,8136 | 0,8161 |
| 5   | 0,5108 | 0,4762 | 0,5394 |
| 6   | 0,5811 | 0,5811 | 0,5812 |
| 7   | 0,8414 | 0,8422 | 0,8418 |
| 8   | 0,8385 | 0,8358 | 0,8376 |
| 9   | 0,9928 | 0,9937 | 0,9931 |
| 10  | 0,8000 | 0,8000 | 0,8000 |
| 11  | 0,8000 | 0,8000 | 0,8000 |
| 12  | 0,8000 | 0,8000 | 0,8000 |
| 13  | 0,7366 | 0,7363 | 0,7376 |
| 14  | 0,4936 | 0,4982 | 0,5003 |



Tabla 21. THD% en demanda máxima, caso base.

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 2,7258 | 2,7154 | 2,6255 |
| 2   | 2,8182 | 2,7974 | 2,6690 |
| 3   | 2,7865 | 2,7638 | 2,6778 |
| 4   | 2,8454 | 2,8168 | 2,7369 |
| 5   | 2,3129 | 2,3079 | 2,2336 |
| 6   | 2,3194 | 2,2942 | 2,2335 |
| 7   | 2,8413 | 2,8117 | 2,7274 |
| 8   | 2,7637 | 2,8463 | 2,7336 |
| 9   | 3,0317 | 3,0003 | 2,9105 |
| 10  | 2,3460 | 2,3204 | 2,2590 |
| 11  | 2,3352 | 2,3099 | 2,2487 |
| 12  | 2,3301 | 2,3048 | 2,2437 |
| 13  | 2,2856 | 2,2611 | 2,1981 |
| 14  | 2,7334 | 2,7048 | 2,6257 |

**Demanda mínima.**

Tabla 22. Perfiles de voltaje en p.u. demanda mínima, caso base.

| BUS | a      | b      | c      |
|-----|--------|--------|--------|
| 1   | 0,9408 | 0,9796 | 0,9510 |
| 2   | 0,9448 | 0,9842 | 0,9549 |
| 3   | 0,9531 | 0,9913 | 0,9652 |
| 4   | 0,9677 | 1,0055 | 0,9788 |
| 5   | 0,9668 | 1,0053 | 0,9772 |
| 6   | 0,9840 | 0,9841 | 0,9840 |
| 7   | 0,9849 | 0,9849 | 0,9849 |
| 8   | 0,9856 | 0,9855 | 0,9856 |
| 9   | 0,9846 | 0,9847 | 0,9847 |
| 10  | 0,9769 | 0,9770 | 0,9769 |
| 11  | 0,9797 | 0,9798 | 0,9798 |
| 12  | 0,9812 | 0,9812 | 0,9812 |
| 13  | 0,9880 | 0,9880 | 0,9880 |
| 14  | 0,9848 | 0,9849 | 0,9849 |
| DC  | 0      | 0,9822 | 0      |

Tabla 23. Potencia activa en kW demanda mínima, caso base.

| BUS | a        | b        | c        |
|-----|----------|----------|----------|
| 1   | 9,2242   | 9,6873   | 9,0424   |
| 2   | 4,1872   | 4,5718   | 4,0067   |
| 3   | 8,6541   | 8,7514   | 8,0857   |
| 4   | 16,9024  | 16,9947  | 16,5337  |
| 5   | 16,9916  | 17,1496  | 17,1894  |
| 6   | 154,5399 | 153,9639 | 154,9098 |

|    |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 7  | 29,3193   | 29,0324   | 29,5346   |
| 8  | -49,8978  | -49,1569  | -49,1389  |
| 9  | 36,9804   | 36,5002   | 36,7369   |
| 10 | 61,0691   | 61,0789   | 61,0737   |
| 11 | 30,7128   | 30,7177   | 30,7151   |
| 12 | 61,6033   | 61,6131   | 61,6079   |
| 13 | -305,7042 | -304,7070 | -305,9924 |
| 14 | 7,6930    | 7,5001    | 7,2347    |
| DC | 0         | 1,9703    | 0         |

Tabla 24. Potencia reactiva en kVAr demanda mínima, caso base.

| BUS | a         | b         | c         |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1   | 5,2538    | 5,7239    | 5,8745    |
| 2   | 1,8324    | 2,1936    | 2,2347    |
| 3   | 4,8406    | 5,0311    | 4,6542    |
| 4   | 8,3832    | 8,8855    | 8,7169    |
| 5   | 9,0307    | 9,1109    | 9,5332    |
| 6   | 115,2459  | 114,5000  | 114,3491  |
| 7   | -27,9280  | -28,3433  | -28,3880  |
| 8   | 16,3372   | 15,8832   | 16,7524   |
| 9   | 0,3282    | 0,3340    | -0,0883   |
| 10  | 45,8038   | 45,8096   | 45,8052   |
| 11  | 23,0356   | 23,0385   | 23,0363   |
| 12  | 46,2044   | 46,2103   | 46,2059   |
| 13  | -247,6570 | -246,7801 | -246,3291 |
| 14  | 28,2656   | 28,6868   | 28,3093   |

Tabla 25. Pérdidas de línea en kW demanda mínima, caso base.

| BUS | a      | b          | c      |
|-----|--------|------------|--------|
| 1   | 0,0465 | 0,0634     | 0,0475 |
| 2   | 1,0747 | 1,0482     | 1,0920 |
| 3   | 1,3658 | 1,2473     | 1,4023 |
| 4   | 0,2082 | 0,1801     | 0,2249 |
| 5   | 0,0014 | 2,8965e-04 | 0,0011 |
| 6   | 0,0295 | 0,0210     | 0,0431 |
| 7   | 1,3286 | 1,2729     | 1,1468 |
| 8   | 0,0134 | 0,0133     | 0,0136 |
| 9   | 0,0855 | 0,0855     | 0,0855 |
| 10  | 0,0382 | 0,0382     | 0,0382 |
| 11  | 0,2926 | 0,2888     | 0,2921 |
| 12  | 0,0379 | 0,0379     | 0,0379 |
| 13  | 0,2127 | 0,2126     | 0,2119 |
| 14  | 0,0129 | 0,0126     | 0,0127 |

Tabla 26. Factor de potencia en demanda mínima, caso base.

| <b>BUS</b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b> |
|------------|----------|----------|----------|
| 1          | 0,8689   | 0,8609   | 0,8386   |
| 2          | 0,9161   | 0,9016   | 0,8733   |
| 3          | 0,8728   | 0,8669   | 0,8667   |
| 4          | 0,8959   | 0,8862   | 0,8846   |
| 5          | 0,8830   | 0,8831   | 0,8745   |
| 6          | 0,8016   | 0,8024   | 0,8045   |
| 7          | 0,7241   | 0,7155   | 0,7210   |
| 8          | 0,9504   | 0,9516   | 0,9465   |
| 9          | 1,0000   | 1,0000   | 1,0000   |
| 10         | 0,8000   | 0,8000   | 0,8000   |
| 11         | 0,8000   | 0,8000   | 0,8000   |
| 12         | 0,8000   | 0,8000   | 0,8000   |
| 13         | 0,7770   | 0,7771   | 0,7790   |
| 14         | 0,2626   | 0,2529   | 0,2476   |

Tabla 27. THD% en demanda mínima, caso base.

| <b>BUS</b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b> |
|------------|----------|----------|----------|
| 1          | 2,2162   | 2,1632   | 2,1868   |
| 2          | 1,6533   | 1,6090   | 1,6472   |
| 3          | 1,2420   | 1,2039   | 1,2369   |
| 4          | 1,2448   | 1,1981   | 1,2423   |
| 5          | 1,0196   | 0,9917   | 1,0180   |
| 6          | 1,0206   | 0,9836   | 1,0174   |
| 7          | 1,2430   | 1,1963   | 1,2399   |
| 8          | 1,2540   | 1,2110   | 1,2078   |
| 9          | 1,3228   | 1,2729   | 1,3192   |
| 10         | 1,0241   | 0,9870   | 1,0210   |
| 11         | 1,0227   | 0,9856   | 1,0195   |
| 12         | 1,0220   | 0,9849   | 1,0188   |
| 13         | 1,0067   | 0,9693   | 1,0038   |
| 14         | 1,1951   | 1,1502   | 1,1918   |