

2023

Método para la estimación de estado de la tensión en una microrred DC on-grid

Duván Darío Veloza Castro
Universidad de La Salle, Bogotá, dveloza05@unisalle.edu.co

Juan Diego García Fajardo
Universidad de La Salle, Bogotá, jgarcia48@unisalle.edu.co

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica



Part of the [Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Veloza Castro, D. D., & García Fajardo, J. D. (2023). Método para la estimación de estado de la tensión en una microrred DC on-grid. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/656

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LA TENSIÓN EN UNA
MICRORRED DC *ON-GRID***



**DUVAN DARIO VELOZA CASTRO
JUAN DIEGO GARCIA FAJARDO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2023**

**MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO DE LA TENSIÓN EN UNA
MICRORRED DC *ON-GRID***

**DUVAN DARIO VELOZA CASTRO
JUAN DIEGO GARCIA FAJARDO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
Andrés Felipe Panesso Hernández, M.Sc.
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2023**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Noviembre de 2023.

Este trabajo de grado está dedicado a Dios y a mis padres, quienes me han brindado su apoyo incondicional y su amor durante toda la carrera universitaria. Gracias por ser ejemplo de perseverancia y disciplina, por siempre estar ahí para animarme en los momentos más difíciles, por su sabiduría y consejos que me han guiado en la toma de decisiones importantes, por su comprensión y por ser mi fuente de inspiración y alegría en todo momento. También quiero agradecer a los profesores, quienes han compartido sus conocimientos, experiencias y han sido fundamentales en mi formación académica.

Duván Darío Veloz Castro

Quiero dedicar este logro, en primer lugar, a Dios y a mis padres, quienes siempre confiaron en mí y brindaron su apoyo incondicional en cada paso de este camino. Su amor y respaldo fueron la base sobre la cual construí este logro. Además, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que nos acompañaron y orientaron durante este proceso. Su contribución fue esencial y desempeñaron un papel crucial en la consecución de este gran objetivo. Sus valiosos consejos, orientación y amistad fueron cruciales en el camino hacia el éxito, y estoy profundamente agradecido por ello. Este logro no solo es mío, sino de todos los que creyeron en mí y me ayudaron a alcanzarlo.

Juan Diego García Fajardo

En adición, este trabajo es una muestra de nuestra gratitud hacia todos los que nos han acompañado en este camino. Esperamos que sea de utilidad para la comunidad académica y científica.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Dios por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional. También, quiero extender mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes han sido un apoyo incondicional a lo largo de este camino. Asimismo, no puedo pasar por alto mencionar al ingeniero Andrés Felipe Panesso, un profesional de indiscutible excelencia y destacada capacidad de liderazgo. Gracias a sus conocimientos, dedicación, esfuerzo y valiosa experiencia, se convirtió en un pilar fundamental que me permitió culminar exitosamente este proyecto y mis estudios de manera altamente productiva. Por último, deseo expresar mi gratitud a la Universidad de La Salle por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y a los docentes que, a lo largo de mi proceso de formación, han demostrado un compromiso constante al proporcionarme las herramientas necesarias para obtener una educación de alta calidad.

Duvan Darío Veloza Castro

Primordialmente, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, quien me brindó la oportunidad de llevar a cabo este proyecto y me otorgó la fuerza para superar cada desafío que se presentó durante su desarrollo. Cada obstáculo se convirtió en una oportunidad de aprendizaje y crecimiento. En segundo lugar, quiero extender mi más sincero agradecimiento al ingeniero Andrés Felipe Panesso, cuya orientación y apoyo fueron invaluableles en nuestro camino hacia el éxito en este proyecto. Su experiencia y conocimientos fueron un faro que nos guio a través de las dificultades, y su compromiso con nuestro desarrollo profesional fue fundamental. También, no puedo dejar de mencionar a la Universidad de La Salle, que ha sido el lugar donde he tenido la oportunidad de formarme como un futuro profesional competente. En conjunto, todas estas bendiciones y apoyos han sido esenciales en mi camino hacia el éxito, y estoy profundamente agradecido por cada uno de ellos.

Juan Diego García Fajardo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Descripción del problema.....	15
1.2 Justificación del proyecto.....	15
1.3 Alcance del proyecto.....	16
1.4 Aportes del proyecto.....	16
1.5 Estructura del documento.....	17
2. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO.....	19
2.1 Sistema de prueba.....	19
2.2 Rangos de operación de las variables.....	21
2.2.1 Cargas.....	21
2.2.2 Generadores.....	22
2.3 Barras seleccionadas para la estimación de estado.....	22
2.3.1 Barras 2 y 7.....	22
2.3.2 Barras 3, 4 y 9.....	22
3. METODOLOGÍA PROPUESTA DE ESTIMACIÓN DE ESTADOS.....	23
3.1 Perfil de tensión del sistema de prueba.....	23
3.2 Documentación y desarrollo matemático del método.....	24
3.2.1 Estimación de estado.....	24
3.2.2 Aplicación de la estimación de estado en un SEP en AC.....	25
3.2.3 Aplicación de la estimación de estado en un SEP en DC.....	26
3.2.4 Estimación de estado en una MR DC.....	27
3.2.5 Descarte de medidas erróneas a través Chi-cuadrado.....	31
3.3 Planteamiento del método.....	33
3.3.1 Mediciones de potencia y tensión.....	34
3.3.2 Metodología del estimador de estado.....	35
3.3.3 Variables de estado.....	39
3.3.4 Detección e identificación de errores.....	39
3.3.5 Variabilidad del sistema.....	40
4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	41
4.1 Ejecución del método.....	41
4.1.1 Medir tiempo de ejecución del método.....	41
4.1.2 Verificar convergencia del método.....	42
4.2 Comparación.....	43
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	49

5.1	Conclusiones generales	49
5.2	Recomendaciones	50
5.3	Trabajo futuro	50
6.	BIBLIOGRAFÍA	52
	ANEXO 1: PERFILES DE TENSIÓN PARA PRUEBAS	54
	ANEXO 2: PRUEBAS EXTENDIDAS – 10001 ESCENARIOS.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de la red LVDC.....	20
Tabla 2. Barras del sistema donde encuentran conectados generadores y carga.	21
Tabla 3. Tensiones nodales.	24
Tabla 4. Valores del área α a la derecha de $\chi^2 = \chi^2_k, \alpha^2$ para $k \leq 5$	33
Tabla 5. Algoritmo del estimador de estado.	38
Tabla 6. Algoritmo de Chi-cuadrado (χ^2).	40
Tabla 7. Algoritmo de variabilidad del sistema.	40
Tabla 8. Resumen de errores relativos estimados por barra.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de prueba.....	21
Figura 2. Modelo de estimación convencional AC.....	25
Figura 3. Modelo de estimación convencional DC.....	27
Figura 4. Función de densidad de probabilidad $p(\chi^2)$ de la distribución Chi-cuadrado.....	33
Figura 5. Metodología implementada para la estimación de estados en MR DC.....	34
Figura 6. Modelo de la MR de prueba.....	36
Figura 7. Tiempo de convergencia.....	42
Figura 8. Error mínimo cuadrático ponderado $J(x)$	43
Figura 9. Tensión en la barra 2.....	44
Figura 10. Tensión en la barra 3.....	45
Figura 11. Tensión en la barra 4.....	45
Figura 12. Tensión en la barra 7.....	46
Figura 13. Tensión en la barra 9.....	46
Figura 14. Error relativo entre el valor estimado y teórico.....	47
Figura 15. Error en la barra 2 con 50 y 100 iteraciones.....	48

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna (en. <i>Alternating Current</i>)
DC	Corriente Directa (en. <i>Direct Current</i>)
DG	Generador Distribuido (en. <i>Distributed Generator</i>)
MR	Microrred
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
STN	Sistema de Transmisión Nacional
UD	Distribución de probabilidad uniforme (en. <i>Uniform Distribution</i>)
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (en. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)

GLOSARIO

MICRORRED: Es un sistema eléctrico localizado que consta de una red de generación de energía distribuida, almacenamiento de energía y cargas eléctricas, que puede funcionar de manera independiente o estar conectado a una red eléctrica (Stevenson, Elements of Power System Analysis, 1955).

ESTIMACIÓN DE ESTADOS: Proceso fundamental en el que se calculan y estiman los valores no medidos o desconocidos en un sistema eléctrico. Esto incluye estimar las magnitudes de la tensión y ángulos de fase en las barras de una red eléctrica (Stevenson & Grainger, 1996).

PERFIL DE TENSIÓN: Se refiere a la representación gráfica o tabular de la variación de la tensión eléctrica en diferentes puntos de una red eléctrica en función del tiempo o de la posición. Estos perfiles se utilizan para visualizar cómo cambia la tensión en las barras o ubicaciones específicas de la red eléctrica (Stevenson & Grainger, 1996).

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD UNIFORME: Es un modelo matemático que describe un conjunto de eventos o resultados donde cada resultado es igualmente probable de ocurrir dentro de un rango o intervalo específico. En una distribución de probabilidad uniforme, todos los valores posibles tienen la misma probabilidad de ocurrencia, lo que significa que no hay sesgo hacia ningún resultado en particular (Wackerly, 2002).

BARRA SLACK: Es aquella donde la tensión se mantiene constante (generalmente se establece en 1.0 pu o un valor específico) y se utiliza como punto de referencia para medir las tensiones en otras barras de la red. Esto facilita el análisis y la operación del sistema de energía eléctrica (Stevenson, 1955).

GENERADOR DISTRIBUIDO: Unidad de generación de energía eléctrica conectada a una red de distribución de energía, generalmente en o cerca del lugar donde se consume la electricidad. Estos generadores son característicos por su capacidad para generar electricidad de manera descentralizada y se distribuyen en varias ubicaciones dentro de la red eléctrica (Borbely, 2001).

RESUMEN

En este proyecto, se ha desarrollado una metodología para la estimación de estado de la tensión en una MR de corriente directa *on-grid*. Esta metodología se basa en un enfoque matemático, técnico y versátil que ha demostrado su eficacia en diversos escenarios.

La pregunta de investigación se centró en cómo estimar la tensión en un punto de una MR DC donde no se dispone de instrumentos de medición en algunas barras. Para abordar esta cuestión, se diseñó una metodología que demostró ser confiable y adaptable ante diferentes situaciones predeterminadas.

Los resultados del proyecto incluyeron la validación de la metodología a través de simulaciones computacionales, lo que permitió obtener perfiles de tensión teóricos y estimados en las barras, tiempos de convergencia por escenario, el comportamiento del error mínimo cuadrático ponderado, además del error relativo entre las tensiones teóricas y las estimadas. Estos resultados se obtuvieron mediante simulaciones en el software Matlab®.

En conclusión, se logró diseñar una metodología para la estimación de estado de la tensión en una MR DC *on-grid*. Esta metodología se adaptó satisfactoriamente a diversos escenarios, respaldando su utilidad y eficiencia en la operación de MR conectadas a la red principal.

Keywords: Estimación de estado, Flujo de carga DC, Microrred DC, Perfil de tensión.

ABSTRACT

In this capstone project, a comprehensive method for voltage state estimation in an on-grid DC microgrid has been developed. This method is based on a robust mathematical approach, that has proven effectiveness in a variety of pre-established scenarios.

The research question focused on how to estimate the voltage at a point in a DC microgrid where no nodal measurement instruments were available. To address this question, a method was designed that proved to be reliable and adaptable to varying situations.

The results of the project included the validation of the method through computational simulations, which allowed obtaining theoretical and estimated voltage profiles at the nodes, convergence times per scenario, the behavior of the weighted least squared error, and the relative error between theoretical and estimated voltages. These results were obtained through simulations in Matlab[®].

In conclusion, it was possible to design a method for the estimation of the voltage state in an on-grid DC microgrid. This method was satisfactorily adapted to different scenarios, supporting its usefulness and efficiency in the operation of microgrids connected to the main grid.

Keywords: DC Microgrid, DC Power flow, State estimation, Voltage profile.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de los sistemas eléctricos modernos, las MR DC conectadas a la red eléctrica principal (*on-grid*) han emergido como una solución altamente prometedora para abordar los desafíos relacionados con la generación y la eficiente distribución de energía eléctrica. Estas MR, al integrar la generación local, el almacenamiento y la gestión de la carga en un entorno de red más reducido, presentan un potencial sustancial para mejorar la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad de la infraestructura energética (Rodríguez, 2015). Sin embargo, para aprovechar los beneficios que ofrecen estas MR, es esencial contar con una comprensión precisa y actualizada de su estado operativo, en especial con respecto a la monitorización en tiempo real de los niveles de tensión.

En este sentido, se hace necesario desarrollar e implementar un método de estimación de estado específico para las MR. Siguiendo la definición de Schweppe y Wildes (1970) y, como lo resalta Simões y otros (1999), el estimador de estado se configura como un algoritmo de procesamiento de datos que transforma las mediciones redundantes de medidores y otros datos disponibles en estimaciones del estado del SEP.

En la actualidad, la estimación de estado ha adquirido una relevancia fundamental en prácticamente todos los sistemas de gestión de energía a nivel global y se ha convertido en una herramienta esencial para garantizar el funcionamiento seguro de estos sistemas (Wu, 1990).

El presente trabajo de grado se centra en el desarrollo de un método para la estimación de estado de la tensión en una MR DC *on-grid*. La capacidad de supervisar y mantener los niveles de tensión de manera efectiva dentro de la MR es esencial para garantizar un funcionamiento estable de los componentes conectados. El método propuesto busca superar las limitaciones actuales en términos de precisión y eficiencia en la estimación de estado de la tensión, contribuyendo así al avance de la tecnología en este campo en constante evolución.

A lo largo de este documento, se presentarán los fundamentos teóricos del método propuesto, se describirá la metodología de implementación y se analizarán los resultados obtenidos a través de simulaciones. Mediante este enfoque, se busca no solo mejorar la comprensión de los sistemas de MR DC *on-grid*, sino también contribuir al desarrollo continuo de soluciones energéticas eficientes y sostenibles en el panorama energético actual.

1.1 Descripción del problema

En la comunidad académica es común encontrar aplicaciones o programas que permiten obtener el punto de operación de un SEP a partir de una base de datos preestablecida. En la operación en tiempo real de los SEP la obtención de estos datos es más compleja de lo que parece, debido al deterioro o pérdida de la información en el proceso de lectura, transmisión y recepción de los datos. Antes de que se haga cualquier evaluación de la seguridad de un sistema o se tomen acciones de control para el mismo, se debe determinar un “estado confiable” del estado existente de la información. Entonces, el estimador de estado es, básicamente, una herramienta utilizada por los centros de control de energía eléctrica para una construcción en tiempo real, del modelo eléctrico del sistema. Este modelo creado en tiempo real debe ser confiable sobre todo en la operación de mercados de energía, donde cuestiones económicas entran en conflicto con otras variables o restricciones, como son los límites de operación del sistema. La importancia dada a la estimación de estado de los SEP ha creado la necesidad de nuevas metodologías de análisis que mejoren la confiabilidad y la precisión (Granada, 2003).

Con este proyecto, se busca diseñar una metodología para la estimación de estado en una MR DC *on-grid* de prueba. La estimación de estado se fundamenta en un análisis matemático y estadístico del sistema, basándose en datos recolectados por medidores e información sobre los parámetros de los componentes de la red precedentes de un sistema de prueba.

Por lo anterior, surgió la pregunta, ¿cómo estimar la tensión en cualquier punto de una MR DC donde no se dispone de instrumentos de medición nodal?

1.2 Justificación del proyecto

En función del planteamiento del problema, el presente proyecto se enfoca en diseñar una metodología para la estimación de estado de la tensión en una MR DC *on-grid*, que proporcione de manera confiable el perfil de tensión existente del sistema de prueba, más específicamente en aquellos puntos donde no se dispone de medición en tiempo real. Los métodos convencionales que dan a conocer el estado del sistema, tienen como desventaja la dependencia de los sistemas robustos y complejos de obtención de datos, relacionados con las mediciones, que, ante posibles fallas y problemas como deterioro o pérdida de la información en el proceso de lectura, transmisión y recepción de los datos, dejan obsoletos y fuera de operación a dichos métodos, por ende la importancia dada a la estimación de estado de los SEP ha creado la necesidad de nuevas metodologías de análisis que mejoren la confiabilidad y precisión cuando los métodos convencionales no sean funcionales. Así, este

proyecto permitirá observar cómo a través del análisis estadístico y matemático de los datos históricos recolectados por medidores e información sobre los parámetros de los componentes de la red, se puede obtener de forma aproximada pero confiable, el estado del sistema para poder realizar tareas propias de la operación del SEP, donde cuestiones económicas entran en conflicto, como son los límites de operación del sistema, estabilidad, eficiencia, entre otros.

1.3 Alcance del proyecto

Este proyecto se plantea con el fin de diseñar una metodología para la estimación de estado de tensión de una MR DC, que es implementada en un sistema de prueba del que se conoce toda la información técnica requerida, que permitirá contrastar y validar la convergencia bajo el criterio de parada del porcentaje de error. Dentro del desarrollo de la metodología se involucra el método de los mínimos cuadrados ponderados implementado para realizar “el mejor ajuste” de los datos medidos. Además, se abarcan temas estadísticos asociados a errores, estimados, pruebas para datos erróneos y métodos de solución clásicos y nuevos propuestos para resolver problemas de flujo de potencia en redes DC. El análisis de la metodología se hace a partir de los resultados obtenidos con el sistema de prueba, el cual permite validar la confiabilidad de la misma mediante la comparación de los datos reales con los estimados. Entonces, aquí no se abarca o especifica el uso final que tengan los datos o la información asociada a la estimación de estado del sistema, es decir, se garantiza el acceso a la información referente al estado de tensión sistema de prueba sin importar qué se haga con ella, dado que no corresponde con la finalidad del proyecto.

1.4 Aportes del proyecto

El proyecto presenta contribuciones significativas desde una perspectiva social, demostrando su impacto positivo en la comunidad estudiantil y profesional del ámbito de la ingeniería eléctrica. A través de este trabajo, se brinda una metodología que no solo sirve como recurso de estudio, sino también como base para investigaciones futuras orientadas al perfeccionamiento de dicha metodología. Además, se proporciona una herramienta de simulación y cálculo valiosa para la estimación de estado de tensión en MR DC *on-grid*. Esta herramienta, desarrollada en el entorno de programación Matlab[®], se convierte en un recurso fundamental que ofrece tanto a estudiantes como a profesionales la capacidad de explorar y comprender conceptos clave en esta área. Como complemento, se incluirá una guía explicativa que ilustrará el funcionamiento y manejo de esta interfaz, facilitando así su uso efectivo y potenciando su utilidad en diferentes contextos.

1.5 Estructura del documento

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos, cada uno de los cuales aborda diversas temáticas fundamentales para la elaboración de un método de estimación de estado de la tensión en una MR DC *on-grid*. Estos capítulos mantienen una relación crítica entre sí, siguiendo una ruta coherente en la consecución de los objetivos propuestos. El primer capítulo, titulado "Introducción", engloba la descripción del problema que motiva este trabajo de grado, así como la justificación del proyecto. De igual manera, se establece el alcance de del proyecto y se destacan los aportes.

En el segundo capítulo, se ofrece una descripción exhaustiva de los componentes esenciales para llevar a cabo la estimación de la variable objetivo. Esta variable, como se resalta en el título del presente documento, se refiere a la tensión. Además, se profundiza en aspectos vinculados al sistema de prueba empleado, abarcando tanto sus características como su configuración. Asimismo, se presenta de manera detallada los distintas barras que constituyen dicho sistema de prueba, junto con las especificaciones esenciales de cada una de estas barras, necesarias para lograr una estimación precisa. Estos enfoques se alinean con la formulación del primer objetivo específico, que implica la definición de las variables necesarias para llevar a cabo la estimación de estado. También se abordan aspectos cruciales como los barrajes y los rangos de operación, que desempeñan un papel fundamental en este proceso.

Luego, en el tercer capítulo, se centra en la identificación de los procedimientos esenciales para llevar a cabo la estimación de estado en la MR de prueba. Este propósito se materializa a través de una secuencia coherente de actividades. Primero, se lleva a cabo la obtención del perfil teórico de tensión del sistema de prueba en diversos escenarios operativos. Estos perfiles serán utilizados posteriormente para una comparación con los valores estimados en el cuarto capítulo. En paralelo se lleva a cabo la documentación exhaustiva y el desarrollo matemático del método, empleando herramientas estadísticas para fundamentar y robustecer su base. Este proceso da lugar a la formulación inicial del método propuesto. Siguiendo este progreso, se avanza hacia el desarrollo concreto del método mediante su estructuración y programación. En conjunto, el tercer capítulo establece los cimientos necesarios para la implementación efectiva y la obtención de resultados en la estimación de estado dentro de la MR.

En el cuarto capítulo, se lleva a cabo la validación del método. Este proceso se materializa a través de una serie de actividades meticulosamente ejecutadas. Inicialmente, se procede a la

ejecución del método, permitiendo así la medición del tiempo requerido para su implementación y la verificación de su capacidad de convergencia. Acto seguido, se realiza una comparación exhaustiva entre los valores estimados de tensión y los valores teóricos de tensión del sistema de prueba, obtenidos previamente en el tercer capítulo. Esta comparación tiene como propósito evaluar la confiabilidad del método, evaluando el error entre ambos conjuntos de valores. Este análisis es fundamental para determinar la precisión y la utilidad práctica del enfoque propuesto. Concluyendo este proceso, se identifican posibles deficiencias que podrían estar presentes en el método, con el objetivo de abordarlas y corregirlas si es necesario, asegurando así su robustez y aplicabilidad.

Las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros son los aspectos que conforman el quinto capítulo, para finalmente, presentar a modo de anexo los escenarios utilizados en este trabajo.

2. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO

En este capítulo, se proporciona una descripción exhaustiva de los elementos clave para la estimación de la variable objetivo, que en este caso y como se menciona en el título del presente documento, es la tensión. También se detallan aspectos como el sistema de prueba utilizado, incluyendo sus características y configuración, además de presentar las diferentes barras que conforman el sistema de prueba y las especificaciones de las barras para la estimación.

Se analizan los rangos de operación de las barras seleccionados, teniendo en cuenta sus límites y condiciones particulares. Así mismo, se establece que el sistema de unidades utilizado en la estimación es el sistema en por unidad (pu), dado que facilita la comparación por la normalización de los valores obtenidos.

Es importante destacar que este capítulo marca el inicio de todo el proceso que culmina en el desarrollo de la herramienta de estimación de estado para la tensión en Matlab[®]. A partir de la información proporcionada en este capítulo, se sientan las bases técnicas necesarias para la implementación de dicha herramienta.

2.1 Sistema de prueba

El sistema de prueba empleado en este trabajo es el presentado por Garcés (2017), que consiste en una red LVDC (*Low Voltage Direct Current*) que consta de un convertidor AC/DC bidireccional colocado en la subestación principal, donde se conectan diferentes cargas y generadores, como se muestra en la Figura 1. Se pueden conectar diferentes elementos a una red LVDC, como recursos de energía renovable, almacenamiento de energía, vehículos eléctricos y cargas controladas. Estos elementos se integran a la red con un convertidor electrónico de potencia como un terminal de potencia constante.

El sistema de prueba se compone de una tensión base de 380 V_{DC}, una potencia base de 50 kW y 10 barras, dispuestos en configuración radial. Estas barras se clasifican en diferentes tipos: *Step* (barra de paso), *Slack* (de holgura), *P* (de potencia constante, representando la generación con el signo negativo) y *R* (que absorbe o consume potencia, indicando una carga con el signo positivo).

Para obtener una visión completa y detallada de la configuración y de las características de cada barra, se proporciona en la Tabla 1 toda la información técnica relevante del sistema. Esta tabla brinda una descripción exhaustiva de las barras, incluyendo su tipo, función y otras especificaciones relevantes.

Tabla 1. Parámetros de la red LVDC.

Desde	Hasta	r [pu]	Tipo	P/R [pu]
1	2	0.0050	<i>Step-node</i>	
2	3	0.0015	P	-0.8
2	4	0.0020	P	-1.3
4	5	0.0018	P	0.5
2	6	0.0023	R	2.0
6	7	0.0017	<i>Step-node</i>	
7	8	0.0021	P	0.3
7	9	0.0013	P	-0.7
3	10	0.0015	R	1.25

Fuente: Tomada parcialmente de (Garcés, 2017).

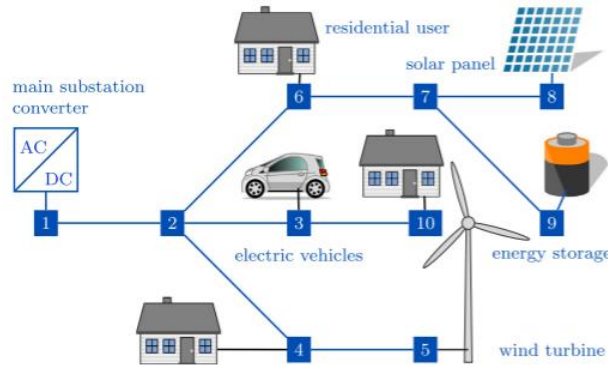
La disposición radial del sistema resulta fundamental, ya que permite una estructura ordenada y simplificada para el análisis y la estimación de estados. Al evitar la formación de bucles o lazos de retroalimentación entre las barras, se facilita la determinación de los flujos de potencia y el estudio de los perfiles de tensión en cada uno de ellos.

Para realizar con éxito la estimación de estados de tensión en una MR de corriente directa conectada a la red (*DC on-grid*), es fundamental contar con una serie de conocimientos y requisitos previos, tales como:

- **Flujos de carga en DC:** Es esencial tener una comprensión sólida de los principios y conceptos relacionados con los flujos de carga en sistemas de DC. Esto incluye la comprensión de la ley de Ohm, el cálculo de caída de tensión, el análisis de potencia y los métodos para determinar las corrientes y las pérdidas de potencia en un sistema de DC.
- **Estadística:** Un conocimiento básico de estadística es importante para la estimación de estados. Esto incluye conceptos como la UD, la teoría de errores y el análisis estadístico de los datos. Estos conocimientos son fundamentales para comprender y evaluar las incertidumbres asociadas a la estimación de estados.
- **MR *on-grid*:** Es crucial tener una comprensión general de las MR conectadas a la red eléctrica. Esto incluye el conocimiento de los componentes y elementos típicos de una MR, como generadores de DC, convertidores, cargas, sistemas de almacenamiento y su integración con la red eléctrica existente.

Además de estos conocimientos fundamentales, es recomendable tener habilidades en programación y conocimientos básicos de herramientas de simulación y análisis, como Matlab® o similares, que típicamente se utilizan para implementar algoritmos de estimación de estados.

Figura 1. Sistema de prueba.



Fuente: Tomada de (Garcés, 2017).

2.2 Rangos de operación de las variables

Es importante identificar las barras que cuentan con generadores y cargas dentro de la MR. Dicha información se puede observar en la Tabla 2. Esta información sirve para establecer los escenarios de operación correspondientes, es decir, determinar cómo se variarán los generadores y las cargas dentro de límites predefinidos. El objetivo es hacer la estimación modificando los valores de operación de generadores y cargas, para luego obtener el perfil de tensión incluyendo las barras estimadas 2, 3, 4, 7 y 9.

Tabla 2. Barras del sistema donde encuentran conectados generadores y carga.

Generación	Carga	De paso
Aerogeneradores: 5	Carga residencial: 4, 6 y 10	
Paneles solares: 8	Vehículos eléctricos: 3	2 y 7
	Banco de baterías: 9	

Fuente propia. Información basada en (Garcés, 2017).

2.2.1 Cargas

Las variaciones estarán determinadas por una función de UD. El rango de cambio se sitúa entre el 50% y el 120% de los valores indicados en la Tabla 1. Este rango de variación se establece arbitrariamente.

2.2.2 Generadores

Se consideran como capacidades los valores designados en la Tabla 1, conforme a una función de UD. Esta variación abarca un rango del 0 al 100%, es decir que se asume que estos operan sin superar su capacidad nominal de generación.

2.3 Barras seleccionadas para la estimación de estado

En este trabajo se identificaron 5 barras específicos en la MR de prueba, que son las barras número 2, 3, 4, 7 y 9. Estas barras se seleccionaron como puntos clave para estimar el estado de la tensión. La selección de estas barras se fundamenta en su relevancia estratégica dentro del sistema eléctrico, ya que representan barras de interés crucial donde convergen diferentes componentes de la red.

2.3.1 Barras 2 y 7

En redes de distribución convencionales no se dispone de mediciones de tensión remota y en línea en las barras de paso, debido a la variabilidad del sistema y la baja importancia comercial que las barras de conexión o intermedias implican debido a la inyección de corriente cero. Por lo tanto, la estimación de estado de tensión es una técnica útil para obtener información sobre la tensión en estos puntos donde las mediciones directas pueden ser limitadas o inexistentes. También permite a los operadores del sistema monitorear y controlar la tensión, lo que es esencial para mantener un perfil de tensión estable y dentro de los límites operativos seguros para garantizar un correcto funcionamiento del sistema eléctrico.

2.3.2 Barras 3, 4 y 9

La estimación de estado de la tensión en las barras residenciales permite a los operadores de la MR monitorear y controlar la calidad de la energía que se suministra a los hogares. Esto es fundamental para garantizar que los residentes reciban una tensión estable y dentro de los límites aceptables para el funcionamiento seguro y eficiente de los dispositivos eléctricos. En redes convencionales no se considera la medición bidireccional, ni la medición en tiempo real o la medición en línea para observar la variabilidad de los usuarios, sino que se confía en los perfiles de la demanda según las tipificaciones que cada empresa electrificadora tiene en sus históricos de consumo. Otro aspecto relevante es que estas barras suelen medir energía, más no potencia, lo que limita conocer con certeza el comportamiento de la tensión según la demanda nodal.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA DE ESTIMACIÓN DE ESTADOS

En este capítulo, se aborda la identificación de los procedimientos esenciales para la estimación de estado en la MR de prueba. Este propósito se materializa a través de una secuencia coherente de actividades. Primero, se obtiene el perfil teórico de tensión del sistema de prueba en diversos escenarios operativos. Estos perfiles serán utilizados posteriormente para una comparación con los valores estimados en el cuarto capítulo. En paralelo, se lleva a cabo la documentación exhaustiva y el desarrollo matemático del método, empleando herramientas estadísticas para fundamentar y robustecer su base. Este proceso da lugar a la formulación inicial del método propuesto. Siguiendo este progreso, se avanza hacia el desarrollo concreto del método mediante su estructuración y programación. En conjunto, el tercer capítulo establece los cimientos necesarios para la implementación efectiva y la obtención de resultados en la estimación de estado de la MR.

3.1 Perfil de tensión del sistema de prueba

Mediante la simulación en Matlab[®] se ejecuta el flujo de carga DC, así obteniendo los valores teóricos del sistema de prueba. Estos valores son los que permitirán hacer la debida comparación con los resultados obtenidos mediante la metodología de estimación de estados propuesta en el próximo capítulo.

En la Tabla 3, se presenta el perfil de tensión de la MR correspondiente al caso base. En este caso, no se modifican los valores nominales de las cargas y generadores, tal como se detalla en la Tabla 1. Además, se analizan 100 perfiles de tensión adicionales en los que se ejecutan modificaciones en las cargas y generadores, siguiendo lo descrito en la Sección 2.2. Estas modificaciones se incorporan al código base en Matlab[®] tomado de Garcés (2023), presentando además, la media y la desviación estándar de todos los escenarios considerados en este trabajo. En este código, se incluyen líneas con codificaciones de autoría propia, lo que permite agregar la función de UD a través de la función 'rand' de Matlab[®], que se comporta como una función que entrega números aleatorios uniformemente distribuidos.

Debido a limitaciones de espacio, la matriz de 10 filas por 101 columnas (caso base más los 100 aleatorios) está disponible en la Sección de Anexos. No sobra recalcar que dicha matriz almacena los perfiles de tensión con las variaciones mencionadas anteriormente.

Tabla 3. Tensiones nodales.

Barras	Tensión [pu]	Media [pu]	Desviación estándar [pu]
1	1.0000	1.0000	0
2	0.9740	0.9763	0.0028
3	0.9709	0.9737	0.0031
4	0.9723	0.9745	0.0032
5	0.9732	0.9750	0.0033
6	0.9685	0.9715	0.0035
7	0.9678	0.9706	0.0035
8	0.9685	0.9710	0.0035
9	0.9669	0.9698	0.0036
10	0.9691	0.9721	0.0033

Fuente propia. Información tomada de Matlab®.

3.2 Documentación y desarrollo matemático del método

3.2.1 Estimación de estado

La estimación de estado, en el contexto de la ingeniería eléctrica y sistemas de potencia, es un proceso fundamental que implica determinar y asignar valores a las variables de estado desconocidas en un sistema eléctrico. Estas variables de estado pueden representar magnitudes eléctricas, como tensiones o corrientes, en diferentes barras o componentes de una red eléctrica. La estimación de estado es importante porque, en la operación de sistemas eléctricos de potencia, no siempre es posible medir todas las variables de estado directamente. En su lugar, se realizan mediciones en diferentes ubicaciones de la red, lo que resulta en mediciones incompletas (Wood, 2013).

El proceso de estimación de estado implica el uso de algoritmos y técnicas matemáticas para determinar los valores más probables de las variables de estado desconocidas, con base en las mediciones disponibles y las ecuaciones del sistema eléctrico. Estas ecuaciones describen las relaciones físicas y eléctricas que rigen el comportamiento del sistema (Granada, 2003). La estimación de estado es esencial para la operación y control de sistemas eléctricos de potencia, ya que proporciona información sobre el estado actual del sistema. Esta información se utiliza en tiempo real para tomar decisiones sobre el control de la red, la optimización de la generación y la gestión de la carga, entre otros aspectos. Además, es útil para la detección y corrección de fallas en el sistema eléctrico, lo que contribuye a mantener la estabilidad y confiabilidad de la red (Yáñez, 2020).

3.2.2 Aplicación de la estimación de estado en un SEP en AC

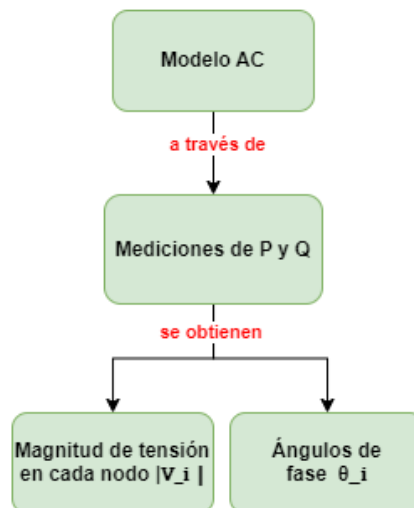
El estado de un sistema de potencia de AC se caracteriza por las magnitudes de la tensión y los ángulos de fase presentes en las barras del sistema. Aunque los ángulos de fase relativos de las tensiones de las barras no pueden medirse directamente, es posible calcularlos utilizando datos en tiempo real (Hayes, 2014). Estos datos se someten a procesamiento mediante una herramienta conocida como estimador de estado, que es un algoritmo diseñado para calcular tanto las magnitudes de la tensión como los ángulos de fase relativos de las barras en el SEP.

En su libro, Stevenson y Grainger (1996) detallan el funcionamiento del estimador de estado en AC, que opera con base en dos tipos de entradas en tiempo real: mediciones y datos de estado. Este sistema se encarga de registrar cambios y procesar información de diversas fuentes, incluyendo:

- Datos analógicos, representados en forma de flujos de energía.
- Parámetros de cargabilidad, tales como la potencia activa (P) y reactiva (Q).
- Magnitudes de la tensión en la mayoría de las barras del sistema.

El estimador de estado AC, a partir de estas mediciones, realiza cálculos para estimar las magnitudes y ángulos de fase de las tensiones, en todas las barras del sistema eléctrico de potencia (Yáñez, 2020). Este proceso es fundamental para obtener una imagen precisa y en tiempo real del estado del sistema, lo que a su vez facilita la operación y el control eficiente de la red eléctrica de AC. La Figura 2 presenta un modelo de estimación de estados convencional aplicado a un sistema eléctrico de potencia AC.

Figura 2. Modelo de estimación convencional AC.



Fuente propia.

3.2.3 Aplicación de la estimación de estado en un SEP en DC

El enfoque de estimación de estados basado en el modelo de corriente directa se sustenta en el análisis de los flujos de potencia DC, una técnica conocida por su notable linealidad y amplia utilidad en la investigación y evaluación de SEP (Stott, 2009).

El enfoque en flujos de potencia en DC es una simplificación valiosa en la evaluación de SEP, ya que permite una representación más manejable y eficiente de la red. A través de este modelo DC, se simplifican las complejidades inherentes a los SEP, lo que facilita la comprensión y el análisis de su comportamiento teniendo en cuenta ciertas suposiciones, entre las cuales se incluyen la relación de resistencia de línea significativamente menor a su reactancia, ángulos de la tensión cercanos entre barras adyacentes y magnitud igual a uno (Chengquan, 2015).

Estas suposiciones se basan en una simplificación del SEP que se utiliza en el análisis de flujos de potencia en DC y son válidas en situaciones en las que las condiciones del sistema cumplen con estos criterios. La potencia activa en una barra es un parámetro crítico en el estudio y control de SEP, y su cálculo preciso es esencial para garantizar un funcionamiento confiable y eficiente del sistema. Así, la potencia activa en una barra se puede calcular mediante la ecuación (1):

$$P_i = \sum_{j=1}^N B_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

Donde:

B_{ij} : es la susceptancia de la línea de transmisión i - j .

P_i : es la potencia activa sobre la barra i .

i, j : son los índices de barras del sistema eléctrico.

El estimador de estado en el contexto DC utiliza las mediciones de potencia activa para estimar con precisión los ángulos de fase de las tensiones en las barras, bajo la suposición de que las magnitudes de las tensiones son constantes y se mantienen en 1.0 pu.

En el modelo DC, las variables de estado que se estiman son los ángulos de fase de las tensiones en las barras del SEP. Estos ángulos representan una parte fundamental de la información necesaria para caracterizar y comprender el comportamiento y el estado del sistema. La estimación precisa de estos ángulos es esencial para garantizar una operación

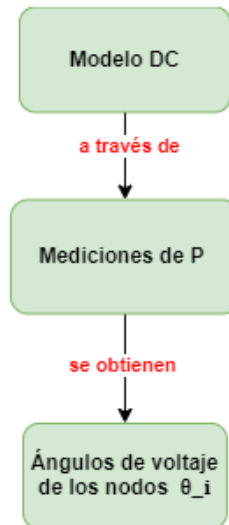
confiable y eficiente del SEP (Yáñez, 2020). La ecuación (2) representa los flujos de potencias por las líneas que conectan las barras i - j .

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \quad (2)$$

Para obtener un modelo del sistema que permita la estimación se requiere de la matriz H , que es resultado de la matriz jacobiana, y se compone de los coeficientes relacionados con las variables de estado correspondientes al cálculo de cada medición i .

La matriz jacobiana es una parte esencial en el proceso de estimación de estados en SEP. Ayuda a establecer la relación entre las mediciones tomadas y las variables de estado desconocidas. Los coeficientes en esta matriz reflejan cómo cada variable de estado contribuye a la determinación de una medición particular, lo que permite una estimación precisa de las variables de estado basada en las mediciones disponibles (Yáñez, 2020). La Figura 3 presenta el modelo de estimación de estados convencional aplicado a un SEP DC.

Figura 3. Modelo de estimación convencional DC.



Fuente propia.

3.2.4 Estimación de estado en una MR DC

Ahora, se explora con detenimiento el proceso de estimación de estado en una MR DC, una etapa esencial para cumplir con el propósito principal de este trabajo. La metodología de estimación de estado desde la matemática se erige como una solución versátil y adaptable, capaz de abordar una amplia gama de situaciones, incluso aquellas que divergen de las

convenciones establecidas en la literatura. Como se destaca en la Sección 3.2.3, la literatura se ha centrado principalmente en sistemas en los que la reactancia (X) prevalece sobre la resistencia (R). Esto ha permitido simplificaciones y suposiciones que conducen a un modelado lineal. Sin embargo, en el contexto de una MR DC la realidad es completamente diferente. Aquí, el componente resistivo supera notablemente a la reactancia, lo que imposibilita desprestigiar el efecto resistivo en las líneas del sistema. Este desequilibrio impide asumir que las tensiones nodales sean iguales a 1.0 pu y que las medidas de potencia activa son suficientes para estimar las tensiones en las barras. La verdadera esencia de este trabajo radica en diseñar una metodología que se adapte a estas condiciones y sea capaz de superar los desafíos presentes en una MR DC de prueba. Si bien la metodología convencional, como se describe en la Sección 3.2.3, no resulta aplicable en este contexto, su presentación aún tiene un valor educativo al resaltar sus limitaciones y brindar una comprensión más profunda sobre cuándo y por qué dichas soluciones se tornan fundamentales.

A continuación, se presenta la formulación matemática implementada en la metodología de estimación de estado. Se presenta de manera general en este apartado y se aplicarán al sistema de prueba de la Figura 1 en la Sección 3.3.

Una red DC se concibe como un conjunto de barras denotadas como $N = \{1, 2, \dots, N\}$, que se encuentran físicamente conectados entre sí mediante componentes pasivos, en su mayoría resistencias. N puede ser particionado en tres subconjuntos (S, P, R) en función de sus propiedades operativas: S , que engloba a las barras de tensión controlada, a menudo designados como generadores ideales de energía; P , compuesto por barras con demanda de potencia constante y R , que abarca las barras de carga con impedancia constante, es decir, cargas resistivas. Para conformar la estructura completa de la red de corriente directa, se introduce un conjunto E que abarca todas las conexiones entre barras eléctricas, manifestadas como líneas o ramificaciones. Formalmente, se tiene que $E \in N \times N$ (Toro, 2021), (Montoya, Gil, & Grisales, 2018).

El punto de partida se establece mediante la creación del vector de variables a estimar, el cual contiene la cantidad de variables que serán estimadas. Su estructura se evidencia en la expresión matemática de la ecuación (3), donde n corresponde al número de la variable a estimar.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

El vector de medidas, denominado como \mathbf{z} , contiene las medidas disponibles del sistema. Estas medidas son fundamentales para el cálculo de la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. En la Ecuación (4) se puede observar su estructura.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

En adición \mathbf{z} , se puede relacionar con el vector de estado mediante la expresión (5).

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (5)$$

Donde:

$h_i(\mathbf{x})$: corresponde a la función que, por lo general, no es lineal, y que establece la relación entre la medida i y el vector de estado.

e_i : representa el error asociado a la medida i .

El vector de medidas generalmente está compuesto por los flujos e inyecciones de potencia activa (Abur, 2004), balance nodal de corrientes y demás herramientas de análisis de circuitos.

De la expresión (5) se obtiene que la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, se puede reescribir como en (6).

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde cada función $h_i(\mathbf{x})$ conforma la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. En función de la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ se obtienen los elementos de la matriz jacobiana $\mathbf{H}(\mathbf{x})$, la cual surge al aplicar la derivada de cada función $h_i(\mathbf{x})$ con respecto a cada variable a estimar x_n . Lo anterior se evidencia a través de la expresión (7).

$$H_{ij}(\mathbf{x}) = \frac{\partial h_i(\mathbf{x})}{\partial x_j} \quad (7)$$

La matriz de ponderación (pesos), denotada como \mathbf{W} , es una matriz diagonal cuadrada de tamaño $m \times m$. La dimensión m , corresponde con la cantidad de mediciones disponibles, y los elementos en la diagonal principal de la matriz son el inverso de la varianza (σ^2) obtenida a partir de la precisión de los medidores. Esta matriz desempeña un papel crítico en el proceso de estimación, ya que pondera la influencia de cada medición en la estimación general del estado del sistema.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{\sigma_2^2} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

En esta metodología de estimación se busca minimizar la función $J(\mathbf{x})$, expresada en (9).

$$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) \quad (9)$$

Para minimizar la función en (9), se aplica la ecuación (10) mediante la aplicación del proceso iterativo de las ecuaciones (11) y (12). El término \mathbf{x}^{n+1} hace referencia al estado actualizado de las variables a estimar, tras cada iteración.

$$\mathbf{H}^T \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) = \mathbf{0} \quad (10)$$

$$\mathbf{G} * \Delta \mathbf{x}^n = \mathbf{H}^T \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^n)) \quad (11)$$

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \Delta \mathbf{x}^n \quad (12)$$

Donde \mathbf{G} es la matriz de ganancia, que a su vez es igual a la expresión en (13).

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \quad (13)$$

Despejando $\Delta \mathbf{x}^n$ de la ecuación (11) y aclarando que el vector de residuos \mathbf{r} es igual a la expresión de la ecuación (14), se obtiene (15), referente al cambio que permite realizar la actualización entre cada iteración.

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{x}^n = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (15)$$

Reemplazando ecuación (14) en (9) para la función objetivo, se obtiene finalmente que el error mínimo cuadrático ponderado $J(\mathbf{x})$, el cual permite hacer la validación de mediciones erróneas mediante Chi-cuadrado, es igual de forma general a lo presentado en (16).

$$J(\mathbf{x}) = \mathbf{r}^T \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (16)$$

3.2.5 Descarte de medidas erróneas a través Chi-cuadrado

La distribución Chi-cuadrado desempeña un papel de considerable importancia en el proceso de detección de mediciones erróneas. Las mediciones erróneas se caracterizan por desviarse significativamente del valor verdadero, ya sea de manera sustancial o en consonancia con el instrumento de medición empleado (Yáñez, 2020).

Para determinar la presencia de mediciones incorrectas, se recurre al uso de un intervalo de confianza. Este intervalo se basa en las características del sistema y las variables de estado involucradas. En este contexto, $J(\mathbf{x})$ que representa el error cuadrático mínimo ponderado, debe ajustarse a una distribución de probabilidad Chi-cuadrado (χ^2).

Es fundamental destacar que los valores de esta distribución de probabilidad están intrínsecamente relacionados con dos aspectos clave: el nivel de confianza del estimador (α) y el número de grados de libertad (k) que se obtiene con la ecuación (17). El nivel de confianza establece la probabilidad de que una medición se considere errónea, y los grados de libertad reflejan la flexibilidad del modelo en términos de ajuste a los datos (Abur, 2004).

$$k = N_m - N_s \quad (17)$$

Donde:

N_m : número de mediciones.

N_s : número de variables de estado.

La evaluación de la capacidad de detección de errores en el algoritmo de mínimos cuadrados ponderados durante el proceso de estimación se realiza a través de la ecuación (18).

$$J(\mathbf{x}) \geq \chi^2 \quad (18)$$

Para la detección de mediciones erróneas, se requiere realizar una normalización del vector de residuos, teniendo en cuenta sus respectivas covarianzas. La matriz de covarianza de los residuos ($\mathbf{\Omega}$) se obtiene con la ecuación (19).

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{R} - \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \quad (19)$$

Donde la matriz \mathbf{R} representa la matriz de covarianza de las mediciones y se calcula mediante la expresión (20).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \sigma_2^2 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

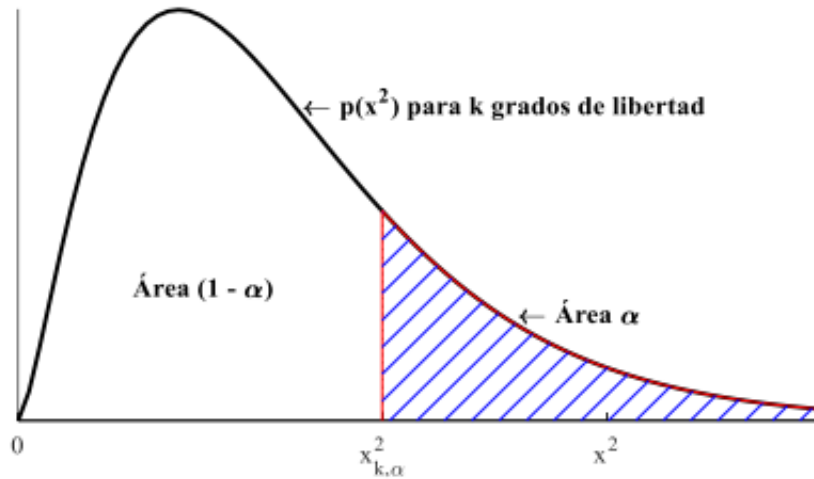
Sigma (σ) representa la desviación estándar, que como se mencionó para la matriz \mathbf{W} , se relaciona con la precisión de los medidores.

Finalmente, el cálculo de los residuos normalizados que se obtiene a partir de la ecuación (21), proporciona información crucial para la identificación de mediciones erróneas, en caso de que estas existan. Esta etapa del proceso revela cuál de las mediciones puede haber sido incorrecta, al considerar su desviación con respecto a las demás mediciones y su relación con las covarianzas (Abur, 2004).

$$r_i^N = \left| \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \right| \quad (21)$$

La distribución Chi-cuadrado exhibe una notable aproximación a la curva de distribución gaussiana estándar cuando el valor de k es considerablemente elevado ($k > 30$), lo que suele ser común en aplicaciones relacionadas con SEP (Stevenson & Grainger, 1996). La Figura 4 ilustra la función de densidad de probabilidad de (X^2), considerando un valor representativo de k .

Figura 4. Función de densidad de probabilidad $p(\chi^2)$ de la distribución Chi-cuadrado.



Fuente: Tomada de (Stevenson & Grainger, 1996).

En la Tabla 4, se pueden encontrar los valores asociados a los grados de libertad y los niveles de confianza pertinentes. La inclusión de los grados de libertad y los niveles de confianza permiten realizar una selección de los umbrales y criterios para la detección de mediciones erróneas en función de los requisitos específicos del sistema o la aplicación en consideración.

Tabla 4. Valores del área α a la derecha de $\chi^2 = \chi_{k,\alpha}^2$ para $k \leq 5$.

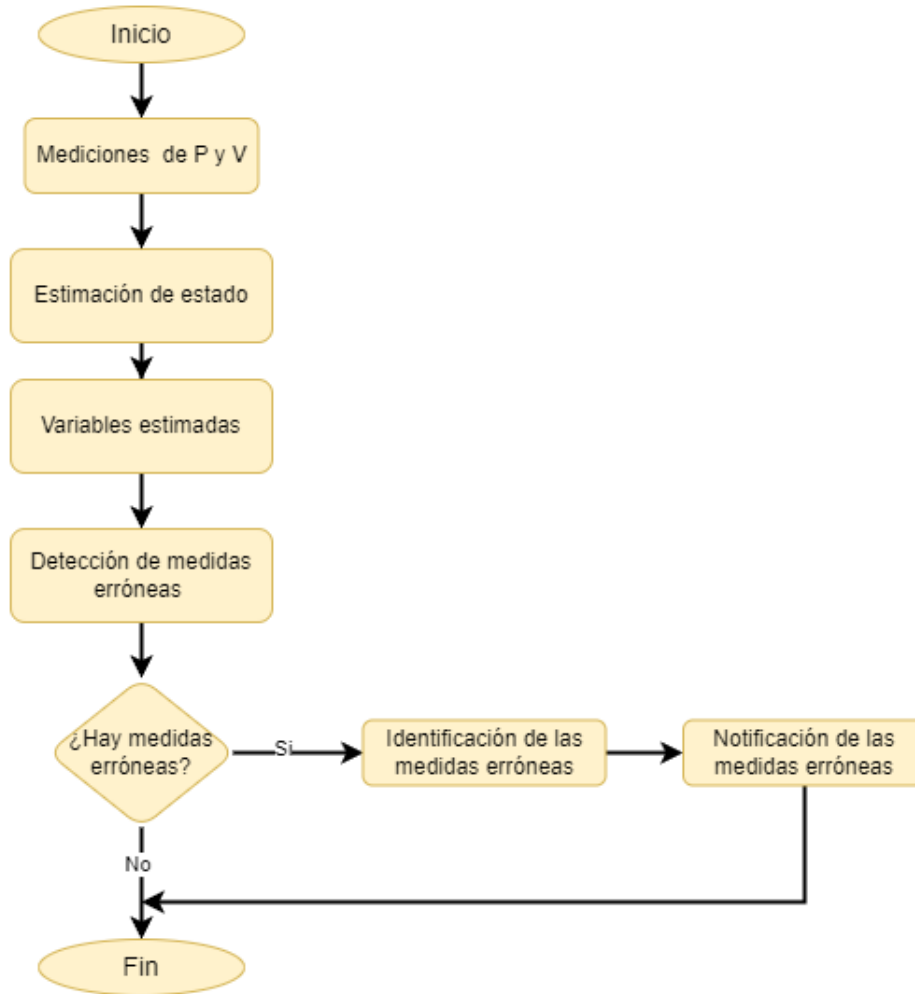
k	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.025$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.005$
1	3.84	5.02	6.64	7.88
2	5.99	7.38	9.21	10.60
3	7.82	9.35	11.35	12.84
4	9.49	11.14	13.28	14.86
5	11.07	12.83	15.09	16.75
6	12.59	14.45	16.81	18.55
7	14.07	16.01	18.48	20.28
8	15.51	17.54	20.09	21.96
9	16.92	19.02	21.67	23.59
10	18.31	20.48	23.21	25.19

Fuente: Tomada de (Stevenson & Grainger, 1996).

3.3 Planteamiento del método

La metodología propuesta se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 5, donde se proporciona una descripción de la estructura y funcionamiento de la metodología implementada en Matlab®.

Figura 5. Metodología implementada para la estimación de estados en MR DC.



Fuente propia.

3.3.1 Mediciones de potencia y tensión

El sistema de prueba seleccionado está compuesto por un conjunto de 10 barras, de una red DC de baja tensión propuesta por Garcés (2017). Para una comprensión más detallada, se presenta la configuración eléctrica en la Figura 6 y los parámetros específicos que caracterizan este sistema de prueba, los cuales se detallan y se encuentran resumidos en la Tabla 1.

Para llevar a cabo la estimación de estado de la tensión en las barras 2, 3, 4, 7, 9 en (22).

$$\mathbf{x}_{estimar} = [x_2, x_3, x_4, x_7, x_9]^T \quad (22)$$

Se cuenta con mediciones (\mathbf{z}) del sistema disponibles. Por otro lado, en las barras 5, 6, 8 y 10, se dispone de mediciones de tensión (23), cuyos valores variarán según los escenarios planteados en las Secciones 2.2.1 y 2.2.2.

$$\mathbf{z}_{tension} = [z_5, z_6, z_8, z_{10}]^T \quad (23)$$

Es importante destacar que las mediciones disponibles en las barras 3, 4 y 9 no corresponden a mediciones de tensión, sino que se disponen de mediciones de potencia (24), y también experimentarán variaciones en función a los escenarios planteados en las Secciones 2.2.1 y 2.2.2.

$$\mathbf{z}_{potencia} = [z_3, z_4, z_9]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{z} = [z_3, z_4, z_5, z_6, z_8, z_9, z_{10}]^T \quad (25)$$

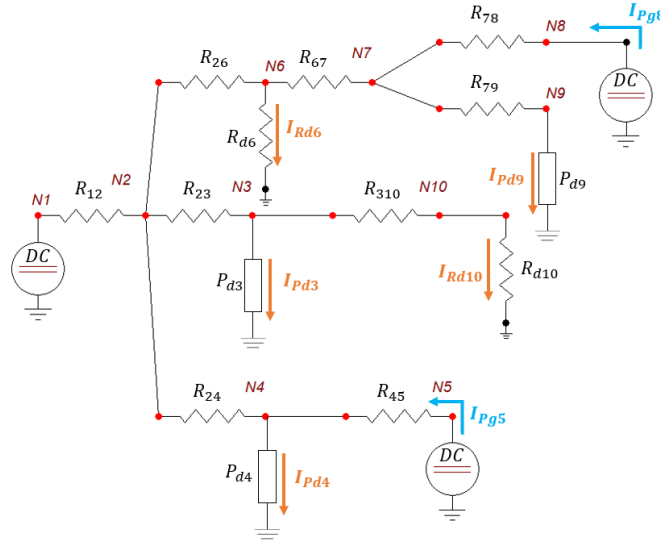
3.3.2 Metodología del estimador de estado

3.3.2.1 Modelo eléctrico de la MR de prueba

El punto de partida se da con la representación de la MR de la Figura 1 mediante un modelo eléctrico de circuito, como se ilustra en la Figura 6. Este modelo se genera con el propósito de relacionar los diversos elementos que componen la MR de prueba. La finalidad primordial es posibilitar el análisis exhaustivo del circuito eléctrico utilizando herramientas de análisis de circuitos. Esto permite establecer conexiones fundamentales entre las medidas disponibles \mathbf{z} , tal como se describen en la Sección 3.3.1, y las variables a estimar \mathbf{x} . Este proceso culmina con la obtención de las diferentes funciones $h_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$, que a su vez conforman la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ de la ecuación (6), la cual desempeña un papel crucial en la metodología de estimación de estado planteada.

Un aspecto fundamental relacionado con la información del sistema de prueba se refiere a los signos presentados en los valores de la columna 5 de la Tabla 1, que están relacionados con la potencia o resistencia asociada a la barra receptora. Cuando se asigna una potencia negativa, esto indica que la barra está consumiendo potencia, mientras que una potencia positiva sugiere que se está inyectando potencia en la red, señalando la presencia de un DG (Toro, 2021). Es relevante destacar que, en esta configuración eléctrica específica, la barra 1 cumple la función de ser la barra *slack* o de control de la tensión, lo que significa que no se le asocia potencia generada ni demandada. Dicha aclaración de los signos resulta vital para el análisis matemático de las ecuaciones del sistema.

Figura 6. Modelo de la MR de prueba.



Fuente propia.

Las herramientas de análisis de circuitos utilizadas para el modelado de las barras de potencia constante y de resistencia constante, que están vinculados con las medidas disponibles, incluyeron el balance de potencia nodal y el balance de corrientes nodales. Aplicando balance de potencia nodal en las barras 3, 4 y 9, se obtuvieron las expresiones (26) a (28).

$$h_1 = x_3 \left(G_{32}x_2 + G_{310} \left(\frac{x_3}{R_{310}} \frac{R_{310}R_{10}}{R_{310} + R_{10}} \right) + x_3 G_{33} \right) \quad (26)$$

$$h_2 = x_4 \left(G_{42}x_2 + x_4 G_{44} + G_{45} \left(\frac{x_4}{R_{45}} - 2P_5 \right) \left(\frac{1}{R_{45}} - P_5 \right)^{-1} \right) \quad (27)$$

$$h_6 = x_9 (G_{97}x_7 + x_9 G_{99}) \quad (28)$$

Mientras que, aplicando balance de corriente nodal en las barras 5, 6, 8 y 10, se obtuvieron las expresiones (29) a (32).

$$h_3 = \left(\frac{x_4}{R_{45}} - 2P_5 \right) \left(\frac{1}{R_{45}} - P_5 \right)^{-1} \quad (29)$$

$$h_4 = \left(\frac{x_2}{R_{62}} + \frac{x_7}{R_{67}} \right) \left(\frac{1}{R_{62}} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_{67}} \right)^{-1} \quad (30)$$

$$h_5 = \left(\frac{x_7}{R_{87}} - 2P_8 \right) \left(\frac{1}{R_{87}} - P_8 \right)^{-1} \quad (31)$$

$$h_7 = \left(\frac{x_3}{R_{310}} \right) \left(\frac{R_{310}R_{10}}{R_{310} + R_{10}} \right) \quad (32)$$

Donde:

G_{ij} : Conductancia de la línea que conecta la barra i y la barra j , para $j \neq i$.

G_{ii} : Conductancias de las líneas y de cargas resistivas conectadas a la barra i , para $j \neq i$.

R_i : Valor de la carga resistiva conectada a la barra con impedancia constante i .

R_{ij} : Resistencia de la línea que conecta la barra i y la barra j , para $j \neq i$.

P_i : Valor de potencia activa inyectada o generada en la barra i .

En las ecuaciones (29) y (31), de las barras 5 y 8 respectivamente, se aplicó el método de linealización por series de Taylor, donde se tomó el primer término de la serie ($n = 1$) y se evaluó alrededor del valor de 1.0 pu. En la ecuación (33) se evidencia el resultado de la linealización, esto con el fin de resolver el problema de no linealidad, resultando las expresiones mostradas en (33).

$$\frac{P_5}{z_5} \cong P_5(1 - (z_5 - 1)) \quad ; \quad \frac{P_8}{z_8} \cong P_8(1 - (z_8 - 1)) \quad (33)$$

En adición, se observa a través de las ecuaciones (34) y (35) la matriz de pesos y la matriz de covarianza de la medición respectivamente, que se obtuvieron tras aplicar la definición de las ecuaciones (8) y (20). Para ello, se emplea como referencia la hoja técnica del medidor de energía ACREL modelo PZ72(L-DE) (Acrel, 2023), que cuenta con una precisión del 0.5% en las mediciones de potencia y tensión. Por lo tanto, el valor de σ será de 0.005 para calcular el peso de todos los valores en la diagonal principal de W .

$$W = \begin{bmatrix} 40000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 40000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 40000 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 40000 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 40000 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 40000 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 40000 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2.5 & . & . & . & . & . & . \\ . & 2.5 & . & . & . & . & . \\ . & . & 2.5 & . & . & . & . \\ . & . & . & 2.5 & . & . & . \\ . & . & . & . & 2.5 & . & . \\ . & . & . & . & . & 2.5 & . \\ . & . & . & . & . & . & 2.5 \end{bmatrix} \cdot 10^{-5} \quad (35)$$

3.3.2.2 Algoritmo del estimador de estado

Ahora, en la Tabla 5, se presenta el algoritmo implementado para la estimación de estado.

Tabla 5. Algoritmo del estimador de estado.

Inicio
<p>Datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cargar datos de red del sistema de prueba como el tipo de barras, potencias generadas y demandadas e impedancias de línea. • Cargar datos acerca de las medidas de tensión y potencia disponibles en las barras respectivos a través de un archivo en formato. mat de Matlab. <p>Proceso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definir sigma ($\sigma = 0.005$), grados de libertad ($k = 2$) y frontera de χ^2 ($x_{chi} = 5.99$). • Construir las matrices \mathbf{W} y \mathbf{R} con (8) y (20). • Definir: $\mathbf{Jx} = 1000$, $iter = 0$ • Construir la matriz $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ de (6) a partir de las expresiones (26) a (32). • Definir el vector de medidas \mathbf{z} que contiene las mediciones de tensión y potencia, los cuales son extraídos del archivo mat. La construcción de dicho vector se da a través de (25). <p>Mientras $J(\mathbf{x}) \geq 1E - 2$ & $iter \leq 50$ hacer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definir condiciones iniciales de las variables a estimar que para la primera iteración serán ($x_2, x_3, x_4, x_7, x_9 = x^0 = 1$), que después se irán actualizando al final con el resultado cada iteración hasta que salga del Mientras que. • Calcular el vector de residuos \mathbf{r} con (14). • Calcular el error mínimo cuadrático ponderado $J(\mathbf{x})$ empleando (16). • Calcular la matriz $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ mediante (7). • Calcular la matriz de ganancia \mathbf{G} en (13). • Calcular Δx^n mediante (15). • Calcular el estado actual de las variables a estimar x^{n+1} empleando (12). • Actualizar $iter = iter + 1$ <p>Fin Mientras</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene los valores de tensión estimados (x_2, x_3, x_4, x_7, x_9) • Se obtiene el valor de $J(\mathbf{x})$ asociado a los valores estimados, el cual permite entrar a validar la detección de medidas erróneas a través del algoritmo de Chi-cuadrado. <p>Fin</p>

Fuente propia.

El criterio de parada del proceso está relacionado con dos factores clave. En primer lugar, se asocia a la robustez de la estimación, lo que significa que se busca que el valor de $J(x)$ sea igual o menor a $1 \cdot 10^{-2}$. En segundo lugar, se considera el número de iteraciones, que se ha fijado en 50. Esto se debe a que, después de este punto, el incremento en el número de iteraciones no aporta una mejora significativa, y solo resultaría en un mayor consumo de tiempo computacional. Esta combinación de criterios asegura tanto la precisión de la estimación como la eficiencia en el proceso.

3.3.3 Variables de estado

En esta sección, se procede a almacenar los valores de tensión estimados en las barras 2, 3, 4, 7 y 9, los cuales se han obtenido a través de la metodología detallada previamente. Este paso resulta fundamental, ya que proporciona los resultados finales de la estimación de estado de tensión en la MR.

3.3.4 Detección e identificación de errores

De acuerdo con la ecuación (17), se establecen los grados de libertad necesarios para la estimación. En este contexto, el número total de mediciones se compone de las 7 disponibles en las barras donde se dispone de datos del sistema. Por otro lado, las variables a estimar comprenden las 5 barras en las cuales no se cuenta con mediciones directas. Por lo tanto, los grados de libertad se reducen a $k = 2$.

Una vez se han definido los grados de libertad, se establece el intervalo de confianza. En este proceso, es esencial tener en consideración que los valores convencionales para el nivel de confianza del estimador (α) generalmente caen dentro del rango de [0.95; 0.99] (Abur, 2004). Al realizar la evaluación correspondiente en la Tabla 4, se observa que para un nivel de confianza del 95%, significa que el 95% de la masa de probabilidad queda contenida en el intervalo limitado por el valor crítico de 5.99.

Si algún valor del error mínimo cuadrático ponderado $J(x)$ excede el valor crítico previamente mencionado, como se muestra en la ecuación (18), esto podría indicar una discrepancia significativa entre la estimación y los datos observados. En tal caso, es importante considerar posibles fuentes de error en el proceso de estimación, como mediciones erróneas (\mathbf{z}). Tras la detección de mediciones erróneas, se procede a la identificación de la medida incorrecta. Este proceso se describe el siguiente algoritmo de la Tabla 6.

Tabla 6. Algoritmo de Chi-cuadrado (χ^2).

Inicio:

- Definir $it_er=1$

if $J(x) \geq X^2$

- Construir la matriz (Ω) ecuación (19).
- Construir la matriz normalizada r_i^n con la ecuación (21).
- Identificar el valor máximo de la matriz r_i^n
- Medidas = {'P3', 'P4', 'V5', 'V6', 'V8', 'P9', 'V10'}
- Guarda medida errónea asociada a la posición del máximo valor r_i^n dentro del array.
- Guarda la medida cada vez que se cumple la condición del if.
- $it_er=it_er+1$.

end

Fin

Fuente propia.

3.3.5 Variabilidad del sistema

La metodología se implementa mediante un proceso iterativo controlado por un ciclo 'for', el cual se repite un total de 101 veces, correspondiendo cada repetición a un escenario específico. En cada ciclo de esta iteración, se efectúan modificaciones en las medidas de tensión, potencia disponible, así como en las condiciones de las cargas y generadores, siguiendo las especificaciones detalladas en la Sección 2.2.1 y 2.2.2. Estas mediciones y condiciones son almacenadas y gestionadas en un archivo en formato '.mat', permitiendo así la adecuada administración y análisis de los datos en el transcurso de las múltiples repeticiones del ciclo iterativo.

Tabla 7. Algoritmo de variabilidad del sistema.

Inicio:

for $e_1=1:101$

- Toma la matriz de mediciones del archivo (.mat) donde están almacenados las medidas de los 101 escenarios.
- Ejecutar el algoritmo de la Tabla 5.
- Guardar valores estimados por cada ciclo

end

Fin

Fuente propia.

4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la validación del método, cuyo proceso se materializa a través de una serie de actividades meticulosamente ejecutadas. Inicialmente, se procede a la ejecución del método, permitiendo así la medición del tiempo requerido para su implementación y la verificación de su capacidad de convergencia. Acto seguido, se realiza una comparación exhaustiva entre los valores estimados de tensión y los valores teóricos de tensión del sistema de prueba, obtenidos previamente en el Capítulo 3. Esta comparación tiene como propósito evaluar la confiabilidad del método, evaluando el grado de error entre ambos conjuntos de valores. Este análisis es fundamental para determinar la precisión y la utilidad práctica del enfoque propuesto. Concluyendo este proceso, se identifican posibles deficiencias que podrían estar presentes en el método, con el objetivo de abordarlas y corregirlas si es necesario, asegurando así su robustez y aplicabilidad.

4.1 Ejecución del método

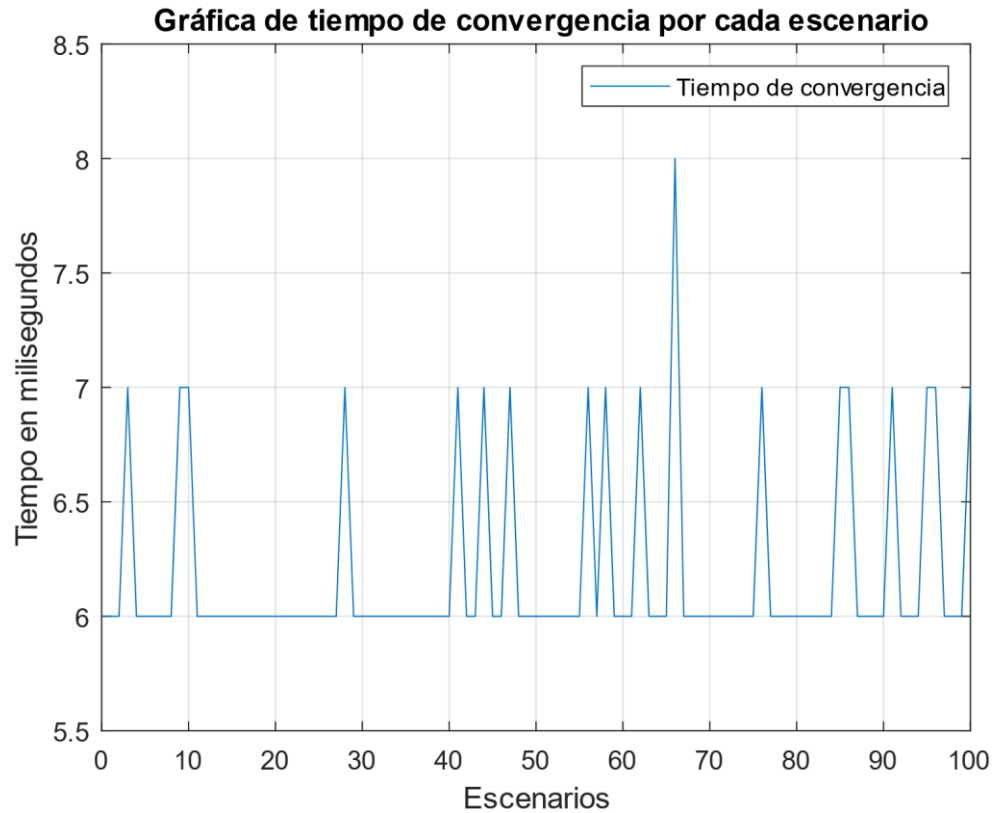
En esta sección se procede con la puesta en marcha del código desarrollado en Matlab® para llevar a cabo la metodología de estimación de estado. A través de este proceso, se obtienen los perfiles de la tensión estimada en las barras de la MR. Estos perfiles son representados gráficamente y se someten a un análisis exhaustivo con el propósito de evaluar varios factores cruciales. Entre ellos, se destaca el tiempo de ejecución del método en cada iteración, lo que nos proporciona una perspectiva sobre la eficiencia del proceso. Además, se evalúa la convergencia del método para asegurar que las estimaciones sean correctas. La comparación entre el perfil teórico y el perfil estimado de tensión permite detectar cualquier desviación significativa, lo que resulta fundamental para garantizar la confiabilidad del método. Por último, se evalúa el error asociado a estas estimaciones, brindando información sobre su precisión y capacidad para proporcionar resultados confiables.

4.1.1 Medir tiempo de ejecución del método

En la Figura 7 se puede observar el tiempo de convergencia, que se define como el período requerido para que cada escenario alcance el resultado en una tolerancia definida, que se refiere al momento en el que se completa la ejecución del proceso de estimación de estado según lo descrito en la Tabla 5. Este valor proporciona información sobre la eficiencia computacional y la velocidad de convergencia en cada escenario individual.

Además, el tiempo total de ejecución para los 101 escenarios y presentación de resultados en la ventana de comandos fue de 3.9293 segundos. Este tiempo representa la duración del proceso completo de estimación de estado de la tensión en la MR DC, ejecutado en un computador con procesador AMD Ryzen 5 3600 6-Core, 3.59 GHz y 32 GB de RAM.

Figura 7. Tiempo de convergencia.



Fuente propia.

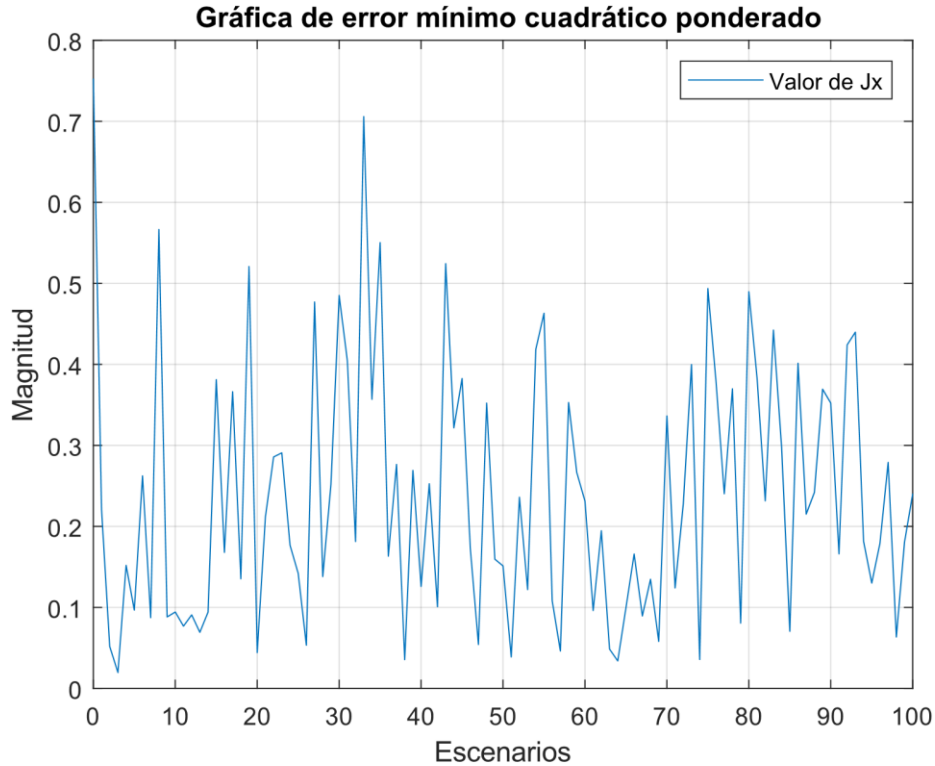
De la Figura 7 también se puede notar que el tiempo promedio para la ejecución de cada escenario es de 6.1881 ms, con un máximo de 8 ms.

4.1.2 Verificar convergencia del método

En la Figura 8, se presenta una gráfica que representa el error mínimo cuadrático ponderado, denotado como $J(x)$. En esta gráfica, es evidente que no se observa una tendencia marcada en los valores de $J(x)$, sino más bien una proximidad constante al valor de referencia. Este comportamiento puede ser atribuido a las aproximaciones realizadas utilizando la expansión de Taylor en la ecuación (33).

Es importante destacar que la proximidad constante de los valores de $J(x)$ al valor de referencia no representa un problema significativo en este contexto. De hecho, demuestra que las aproximaciones efectuadas en la ecuación (33) son adecuadas y que la estimación de estado de tensión en la MR DC es consistente.

Figura 8. Error mínimo cuadrático ponderado $J(x)$.



Fuente propia.

De la Figura 8 también se puede notar que el error mínimo cuadrático ponderado promedio en cada escenario es de 0.2383, con una desviación estándar de 0.1604.

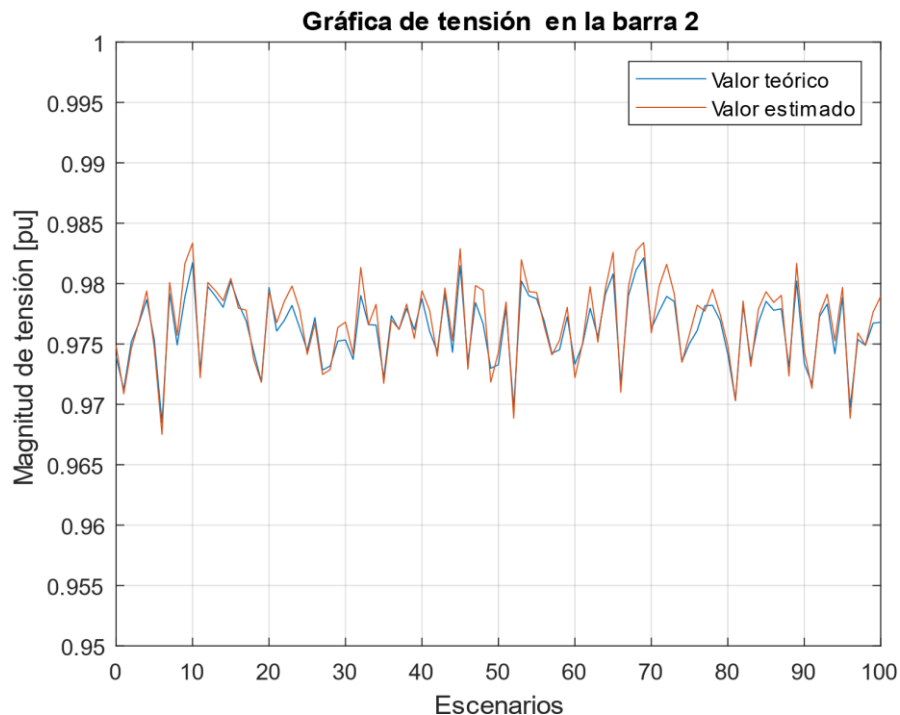
4.2 Comparación

En esta sección, se encuentran disponibles las representaciones gráficas que muestran tanto los valores de tensión teóricos como los valores de tensión estimados en función de cada escenario particular. Cada gráfica se presenta para barras individuales, permitiendo una visualización detallada de cómo se comparan y se relacionan los valores estimados con los teóricos. Estas representaciones ofrecen una valiosa perspectiva sobre la precisión y confiabilidad de la metodología propuesta, ya que permiten evaluar cuán cerca o lejos se encuentran los valores estimados de los valores teóricos en cada barra. Esta información

resulta esencial para determinar la capacidad de la metodología para proporcionar estimaciones precisas y confiables en diversos escenarios, lo que, a su vez, es fundamental para la toma de decisiones y el funcionamiento óptimo de la MR. La Figura 9 a la Figura 13, muestran las comparaciones para la tensión en las barras 2, 3, 4, 7, 9 respectivamente.

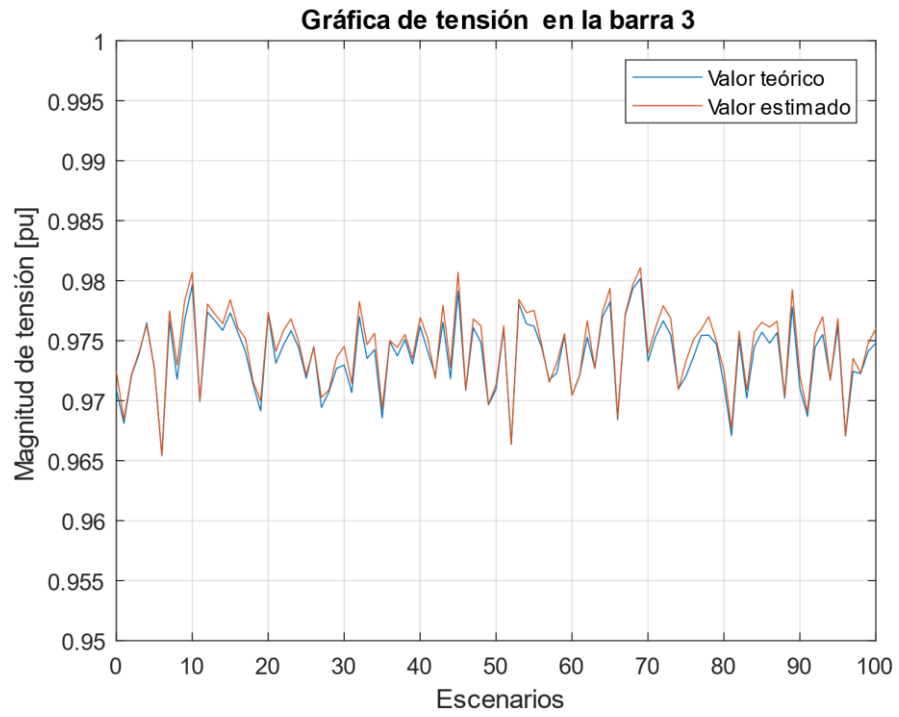
En estas gráficas se observa que la estimación presenta resultados que se asemejan significativamente a los valores teóricos, lo cual es especialmente notorio en las barras 4, 7 y 9, donde los valores estimados se aproximan de manera notable a los valores teóricos. Sin embargo, esto no significa que las barras 2 y 3 no presenten un buen desempeño en la estimación. Por el contrario, la metodología proporciona valores estimados que, aunque muestran una diferencia un poco más marcada, aún se encuentran bastante cercanos a los valores teóricos. Estos resultados destacan la eficacia de la metodología en la estimación de los perfiles de tensión en diferentes barras, con diferencias que varían según el caso específico pero que, en general, se mantienen cercanas a los valores teóricos. Esta información es fundamental para evaluar el rendimiento de la metodología en diferentes situaciones y barras específicas de la MR.

Figura 9. Tensión en la barra 2.



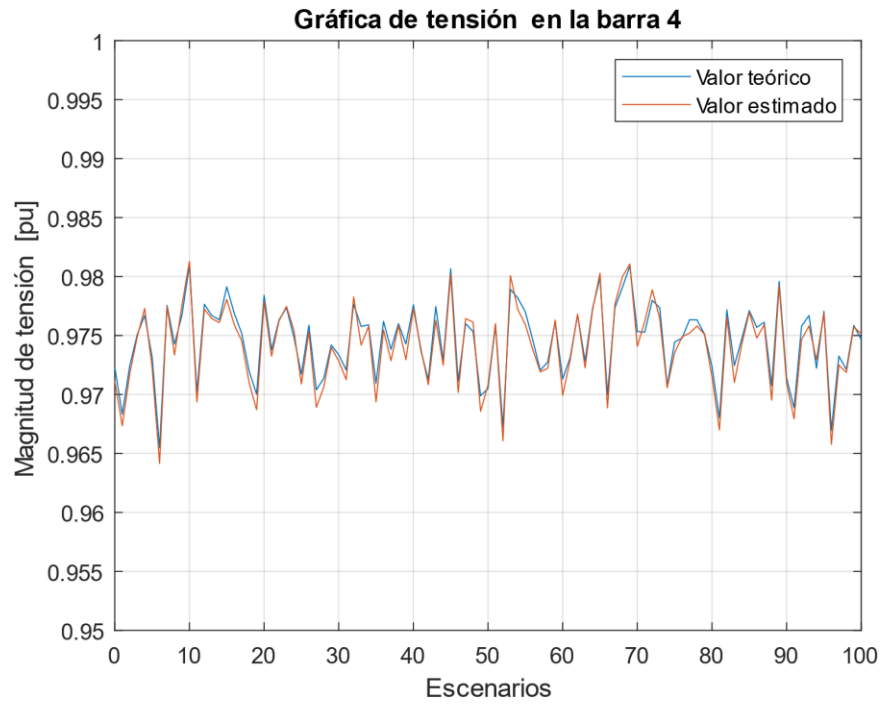
Fuente propia.

Figura 10. Tensión en la barra 3.



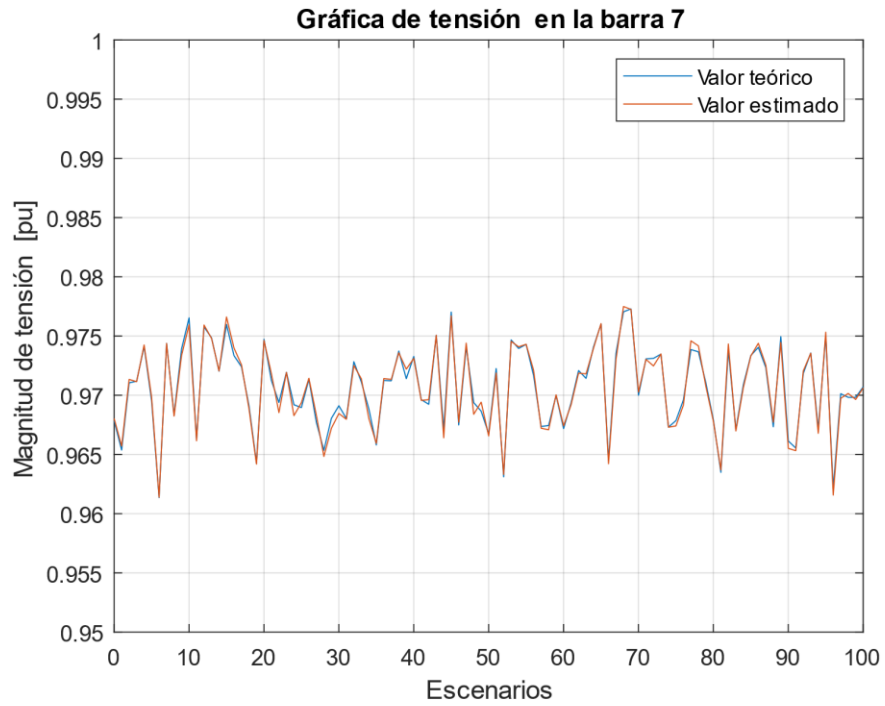
Fuente propia.

Figura 11. Tensión en la barra 4.



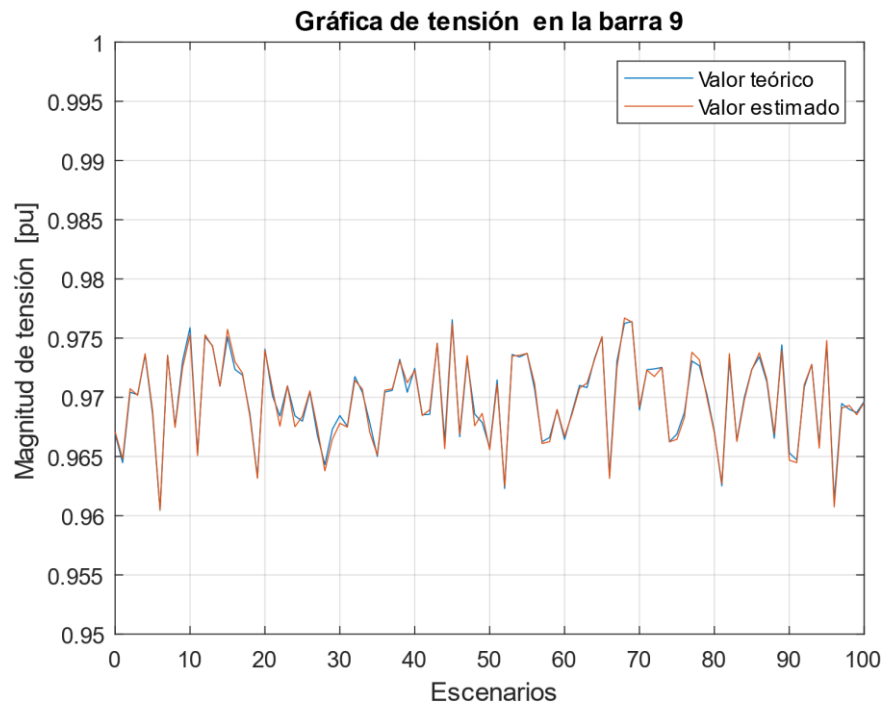
Fuente propia.

Figura 12. Tensión en la barra 7.



Fuente propia.

Figura 13. Tensión en la barra 9.



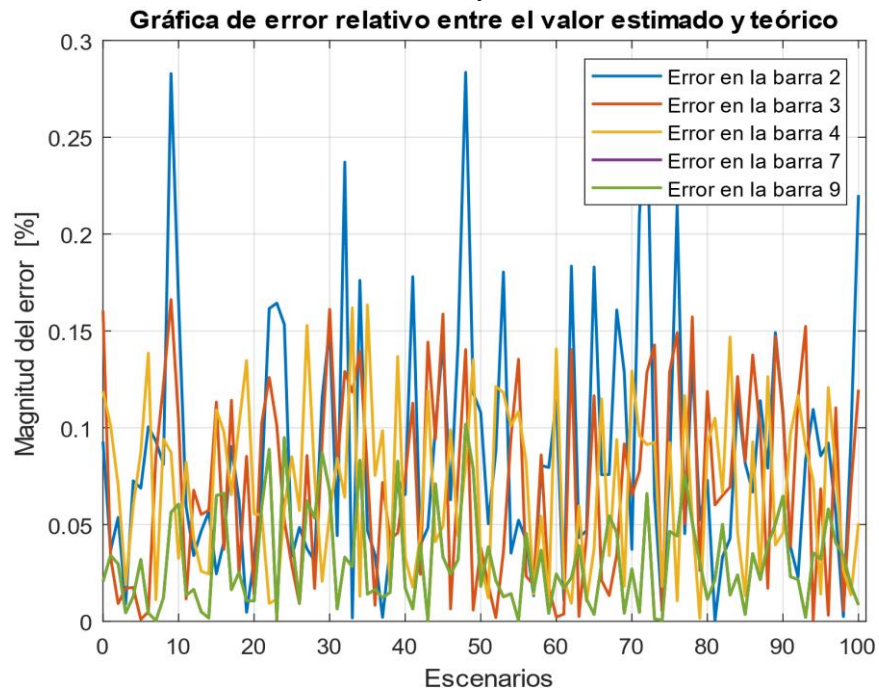
Fuente propia.

La evidencia anterior se fortalece al observar la Figura 14, que muestra la relación del error relativo entre el valor estimado y el valor teórico en cada barra. El error relativo es calculado empleando la expresión (36).

$$error = \frac{|V_{estimado} - V_{teórico}|}{V_{teórico}} 100\% \quad (36)$$

En esta representación de la Figura 14, se destaca un nivel de error mayor en las barras 2 y 3, seguido de cerca por las barras 4, 7 y 9, como también se resume en la Tabla 8. Este hallazgo es interesante, ya que contradice la tendencia convencional, que sugiere una mejor estimación en las barras cercanas a la fuente o barra *slack*. En cambio, en el sistema de prueba empleado, se aprecia un patrón que indica que la estimación se torna más precisa en las barras más apartadas de la fuente, lo que añade un aspecto peculiar a la dinámica del sistema eléctrico. Esta peculiaridad se plantea como un área de interés para futuras investigaciones, que implicaría un análisis más profundo y detallado de este comportamiento.

Figura 14. Error relativo entre el valor estimado y teórico.



Fuente propia.

Para tener una idea del orden del error, se observa que la mayor incertidumbre se presenta en la barra 2 con un 0.28% del valor teórico, que para efectos prácticos es de ± 1.05 voltios. Esto muestra que la estimación de las magnitudes consideradas fue cercana.

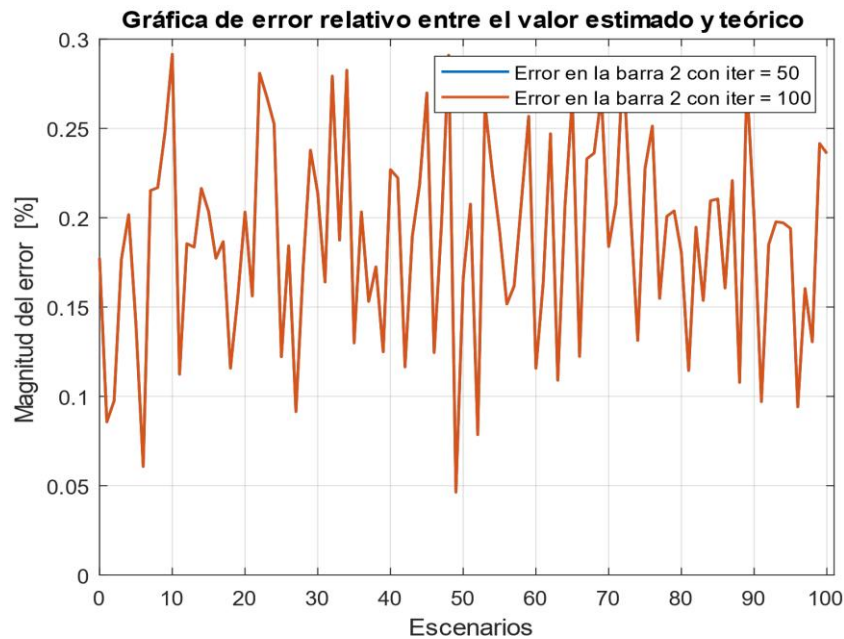
Tabla 8. Resumen de errores relativos estimados por barra.

Barra	Media [%]	Desviación estándar [%]
2	0.0876	0.0642
3	0.0714	0.0507
4	0.0692	0.0429
7	0.0314	0.0250
9	0.0315	0.0250

Fuente propia.

Así mismo, la Figura 15 presenta una comparación entre el error relativo estimado en la barra 2, considerando dos cantidades de iteraciones diferentes: una de 50 iteraciones y otra de 100 iteraciones. El propósito de esta comparación es demostrar que, al aumentar la cantidad de iteraciones más allá de 50, no se logra una mejora significativa en la reducción del error. Por el contrario, solo resulta en un aumento en el tiempo computacional, lo cual podría considerarse innecesario. La Figura 15 también confirma que en los 101 escenarios se logró la convergencia del estimador de estado.

Figura 15. Error en la barra 2 con 50 y 100 iteraciones.



Fuente propia.

Este análisis resalta la importancia de la elección de un criterio de parada apropiado para el proceso de estimación de estado de tensión. La combinación de un número de iteraciones limitado a 50 o incluso menor, junto a $J(x)$ como se muestra en la Sección 3.3.2.2, asegura tanto la precisión de la estimación como la eficiencia en el proceso.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones generales

Uno de los procedimientos matemáticos fundamentales aplicados para simplificar las ecuaciones que relacionan las medidas disponibles con las variables a estimar en el sistema de prueba fue la linealización utilizando series de Taylor. En este proceso, se consideró únicamente el primer término de la sucesión de la serie de Taylor y se evaluó en un valor de referencia de 1.0 por unidad (1.0 pu). Este enfoque de linealización desempeñó un papel crucial en el mantenimiento de la estabilidad del error mínimo cuadrático ponderado. La linealización a través de la serie de Taylor permitió lograr este objetivo al aproximarse a las relaciones no lineales mediante una versión simplificada y lineal de las mismas. Esto fue esencial para mantener la convergencia del proceso de estimación y evitar fluctuaciones no deseadas en el valor estimado del error mínimo cuadrático ponderado.

Tras la validación de la metodología mediante simulaciones computacionales, se obtuvieron varios resultados significativos. Esto incluyó los perfiles de tensión teóricos y estimados en las barras correspondientes, el tiempo de convergencia por escenario, el comportamiento del error mínimo cuadrático ponderado por escenario y, el error relativo entre las tensiones teóricas y las tensiones estimadas. Estos resultados se generaron a través de simulaciones utilizando Matlab[®].

Durante el proceso de revisión del estado del arte, se logró recopilar información sobre las metodologías convencionales utilizadas en problemas de estimación de estado. Estas investigaciones permitieron sentar las bases de la metodología propuesta, que a su vez se ha estructurado a partir de una serie de pasos claramente definidos, tal como se observa en el algoritmo general de dicha metodología de la Tabla 5. Esta metodología se sustenta en una sólida base matemática para el proceso iterativo y se apoya en conceptos estadísticos para la detección e identificación de medidas erróneas. La recopilación y análisis de estas metodologías convencionales han sido fundamentales para comprender y adaptar los procedimientos necesarios para llevar a cabo la estimación de estado en la MR de prueba.

La metodología diseñada para la estimación de estado de tensión en MR DC *on-grid*, en el presente trabajo, está basada en un enfoque matemático, técnico y estadístico, que ha demostrado su capacidad para adaptarse a situaciones variables al aplicarse en varios escenarios con cambios en las condiciones de carga y generación. Esta adaptabilidad garantiza estimaciones precisas en una variedad de contextos, lo que respalda su eficiencia y utilidad en la operación de MR conectadas a la red principal.

La elección de las barras estratégicas para la aplicación de la metodología propuesta reviste una gran importancia. En este contexto, se seleccionaron las barras 2, 3, 4, 7 y 9 del sistema de prueba, debido a sus condiciones operativas particulares. Estas barras desempeñan roles diversos en la MR, ya que algunas son barras de paso y otras son barras de potencia constante. En las barras de paso, por ejemplo, no se cuentan con mediciones de tensión remota y en línea debido a la variabilidad del sistema y su baja importancia comercial, puesto que no inyectan potencia. Esto las convierte en candidatas ideales para la estimación de estados. Además, la estimación de estados en las barras 3, 4 y 9 permite a los operadores de la MR monitorear y controlar la calidad de la energía suministrada. Estas barras suelen tener mediciones de energía, pero no de potencia, lo que limita la capacidad de conocer con certeza el comportamiento de la tensión en función de la demanda nodal. Esta selección estratégica de barras mejora la capacidad de la MR para mantener un suministro eléctrico confiable y de alta calidad.

5.2 Recomendaciones

Un conocimiento amplio de las MR DC, incluyendo su estructura, componentes y operación, son importantes para abordar el problema de este trabajo. Dado que las MR están relacionadas con sistemas de potencia, es esencial estar familiarizado con conceptos de sistemas de potencia, como flujos de potencia, equilibrio de cargas, y estabilidad. Esto proporcionará una base sólida para la estimación de estados.

En el contexto de esta investigación, se requiere un profundo dominio de herramientas de simulación especializadas, tales como Matlab[®] o software específico para MR. Estas herramientas permiten modelar y simular el comportamiento de sistemas eléctricos complejos, incluyendo MR DC, lo que es fundamental para la estimación de estado.

5.3 Trabajo futuro

El presente proyecto puede presentar múltiples mejoras relacionadas con la optimización de los algoritmos de estimación de estado de tensión en MR DC. Esto podría incluir la implementación de técnicas de optimización más avanzadas para mejorar la velocidad y precisión de la estimación.

Una posible extensión de esta investigación podría centrarse en la estimación de estado de la tensión en redes de MR interconectadas. Esto implica abordar los desafíos de coordinación y comunicación entre múltiples MR.

Una dirección prometedora para futuras investigaciones es la formulación de un modelo matemático general para la estimación de estado de tensión en MR. Este modelo general podría ser aplicable a una amplia gama de MR DC, independientemente de su configuración específica. Al desarrollar un modelo matemático generalizado, se permitiría una mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes escenarios y configuraciones de MR.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abur, A. &. (2004). *Power System State Estimation Theory and Implementation*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Acrel. (27 de 10 de 2023). *PZ72 (L) -DE*. Obtenido de https://es.acrel-electric.com/product/pz72_1_de_dc_energy_meter
- Borbely, A. M. a. (2001). *Distributed generation: the power paradigm for the new millennium*. CRC press.
- Chengquan, J. &. (2015). *Dynamic optimal power flow including energy storage with adaptive operation costs*. IEEE.
- Garces, A. (2017). Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids. *ScienceDirect*, 149-153.
- Garcés, A. (24 de octubre de 2023). *MATLAB Central File Exchange*. Obtenido de Load Flow in LVDC-distribution systems: https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62600-load-flow-in-lvdc-distribution-systems?s_tid=prof_contriblnk
- Goez, J. A. (2019). *Análisis de flujo de carga en microrredes de corriente continua*. Medellin: Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Granada, M. (2003). Estimacion de estado en sistemas electricos de potencia: Parte I. *Scientia et Technica*, 55-60.
- Hayes, B. a. (2014). *State estimation techniques for electric power distribution systems*. IEEE.
- Montoya, O. D., Gil, W., & Grisales, L. F. (2018). Linear-based Newton-Raphson Approximation for Power Flow Solution in DC Power Grids. *IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM)*, 1-6.
- Rodríguez Patarroyo, C. (2015). *Microrredes eléctricas*. Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Simões, A. J. (1999). *State Estimation in Electric Power Systems—A Generalized Approach*.
- Stevenson, W. D. (1955). Elements of Power System Analysis. En W. D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis* (pág. 370). London: Copyright.
- Stevenson, W. D., & Grainger, J. J. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. Mexico: McGraw-Hill/ Interamericana de Mexico, S.A.
- Stott, B. J. (2009). DC power flow revisited. *IEEE Transactions on Power Systems*,, 1290-1300.
- Toro, J. A. (2021). *Despacho óptimo de potencia en microrredes de corriente continua considerando variación en la generación eólica y solar y el comportamiento de demanda de energía*. Medellin: ITM Institución Universitaria.
- Wackerly, D. D. (2002). *Estadística matemática con aplicaciones*. Cengage Learning.
- Wood, A. J. (2013). *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons.
- Wu, F. F. (1990). *Power system state estimation: a survey*. Elsevier.
- Yáñez, S. F. (2020). *Modelo DC de las ecuaciones de potencia aplicado a la estimación de estado en sistemas eléctricos (Bachelor's thesis)*. Quito D.M: Universidad Politécnica Salesiana.

ANEXO 1: PERFILES DE TENSION PARA PRUEBAS

Las siguientes tablas se obtuvieron empleando Matlab® en un código de autoría propia, introduciendo variaciones en las cargas y generadores según lo descrito en la Sección 2.2 y que fueron agregadas a un código base de flujo DC disponible en Garcés (2023).

# Barra	Caso Base [pu]	Escenario 1 [pu]	Escenario 2 [pu]	Escenario 3 [pu]	Escenario 4 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.973950517	0.971230566	0.975187234	0.976751348	0.978677727
3	0.970897522	0.968116252	0.972115770	0.973896983	0.976489160
4	0.972303964	0.968323651	0.972421639	0.975068464	0.976708951
5	0.973228721	0.968602442	0.972492631	0.975190297	0.976766213
6	0.968542552	0.966114858	0.971663372	0.972368975	0.974489378
7	0.967838404	0.965373015	0.971048335	0.971186948	0.974121052
8	0.968488902	0.965903641	0.971278257	0.971289547	0.974574748
9	0.966897249	0.964477242	0.970435680	0.970219532	0.973558530
10	0.969080496	0.966287489	0.970321551	0.972398344	0.975402675

# Barra	Escenario 5 [pu]	Escenario 6 [pu]	Escenario 7 [pu]	Escenario 8 [pu]	Escenario 9 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.975331174	0.968488984	0.979172672	0.974926037	0.978893292
3	0.972728856	0.965398189	0.976644990	0.971794882	0.976703319
4	0.97317674	0.965491352	0.977558676	0.974268684	0.976733836
5	0.973256713	0.965653309	0.978017591	0.975035327	0.977597537
6	0.970451333	0.962180413	0.975323975	0.968949077	0.975025537
7	0.969531622	0.961352526	0.974381397	0.968356985	0.973908488
8	0.969932244	0.961779217	0.974565317	0.968889106	0.973908699
9	0.968580310	0.960455295	0.973546748	0.967574801	0.973054142
10	0.970904509	0.963354257	0.975220059	0.970126304	0.975704761

# Barra	Escenario 10 [pu]	Escenario 11 [pu]	Escenario 12 [pu]	Escenario 13 [pu]	Escenario 14 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.981737081	0.972775442	0.979760398	0.978948949	0.978038873
3	0.979676587	0.969927006	0.977394898	0.976663870	0.975857341
4	0.980968570	0.970161827	0.977655026	0.976687484	0.976338610
5	0.981555751	0.970260541	0.977992859	0.977006342	0.976695280
6	0.977379349	0.967625403	0.976498457	0.975369939	0.973237071
7	0.976531932	0.966283871	0.975768463	0.974850813	0.972030596
8	0.976536677	0.966353494	0.975923140	0.975012103	0.972303406
9	0.975880969	0.965214894	0.975114479	0.974353987	0.970939115
10	0.978480018	0.968089710	0.975756746	0.975159302	0.974392359

# Barra	Escenario 15 [pu]	Escenario 16 [pu]	Escenario 17 [pu]	Escenario 18 [pu]	Escenario 19 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.980190104	0.978368892	0.976920299	0.974342091	0.971874983
3	0.977315538	0.975717794	0.974076130	0.971385773	0.969141951
4	0.979128120	0.976883556	0.975185408	0.971983448	0.970016637
5	0.979716117	0.977132237	0.975868309	0.972152118	0.970582602
6	0.976706499	0.974191735	0.972659820	0.969784915	0.965265223
7	0.975975678	0.973342190	0.972404478	0.969121474	0.964289960
8	0.976483785	0.973888155	0.972939397	0.969164010	0.964748088
9	0.975102272	0.972354560	0.971878076	0.968587804	0.963260567
10	0.975355559	0.973824755	0.972498002	0.969445385	0.967190253

# Barra	Escenario 20 [pu]	Escenario 21 [pu]	Escenario 22 [pu]	Escenario 23 [pu]	Escenario 24 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.979679665	0.976071028	0.976949821	0.978190358	0.976357009
3	0.977232913	0.973122644	0.974624437	0.975830865	0.974436553
4	0.978412446	0.973776314	0.976327986	0.977359155	0.974852149
5	0.978515108	0.974328541	0.977078304	0.978032089	0.975269479
6	0.975541299	0.972223479	0.970627436	0.972731693	0.970156521
7	0.974729553	0.971226645	0.969396635	0.971935993	0.969198711
8	0.974791483	0.971753226	0.969454756	0.972521512	0.969244657
9	0.974070468	0.970138382	0.968419455	0.970965052	0.968437825
10	0.975528264	0.971506333	0.973329066	0.974646678	0.973390465

# Barra	Escenario 25 [pu]	Escenario 26 [pu]	Escenario 27 [pu]	Escenario 28 [pu]	Escenario 29 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.974461351	0.977184877	0.972838617	0.973178567	0.975243201
3	0.971864901	0.974513802	0.969443917	0.970745285	0.972696850
4	0.971719046	0.975875277	0.970390258	0.971372376	0.974193225
5	0.971942465	0.975912619	0.970891028	0.971565894	0.974789864
6	0.969848447	0.972291607	0.968365200	0.966648860	0.968966953
7	0.968959582	0.971343882	0.967692275	0.965347405	0.968047797
8	0.969435194	0.971619143	0.968312850	0.965423319	0.968118345
9	0.967985436	0.970448751	0.966793518	0.964305180	0.967301241
10	0.970075209	0.972848909	0.967276199	0.969038530	0.971348226

# Barra	Escenario 30 [pu]	Escenario 31 [pu]	Escenario 32 [pu]	Escenario 33 [pu]	Escenario 34 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.975330389	0.973729695	0.979008985	0.976606905	0.976563118
3	0.972975834	0.970675327	0.977005240	0.973520869	0.974256678
4	0.973373037	0.972069705	0.977656906	0.975771343	0.975908682
5	0.974281550	0.972630781	0.978420431	0.976472495	0.976738870
6	0.969843642	0.968237708	0.973980418	0.971538901	0.970071297
7	0.969115404	0.968032196	0.972832395	0.971117674	0.968850467
8	0.969276820	0.968563413	0.973148990	0.971710976	0.968989756
9	0.968458593	0.967546190	0.971758506	0.970428277	0.967830664
10	0.971474353	0.969039650	0.975978897	0.971365183	0.972966838

# Barra	Escenario 35 [pu]	Escenario 36 [pu]	Escenario 37 [pu]	Escenario 38 [pu]	Escenario 39 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.972202825	0.977336224	0.976195273	0.977941107	0.976181803
3	0.968559939	0.974930458	0.973739177	0.975109039	0.973065110
4	0.970958175	0.976198470	0.973824829	0.976004729	0.974282313
5	0.971464992	0.976377701	0.974264137	0.976244929	0.974557638
6	0.966433230	0.971908145	0.971737122	0.974363356	0.972188776
7	0.965800777	0.971248706	0.971220767	0.973729170	0.971399950
8	0.966312378	0.971732933	0.971598961	0.973784047	0.971994389
9	0.965000431	0.970444668	0.970591787	0.973210233	0.970428744
10	0.966386269	0.973247082	0.971902330	0.973626399	0.970915357

# Barra	Escenario 40 [pu]	Escenario 41 [pu]	Escenario 42 [pu]	Escenario 43 [pu]	Escenario 44 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.978761430	0.976050930	0.974372527	0.979164960	0.974312072
3	0.976214542	0.974116995	0.972094226	0.976545603	0.971851145
4	0.977603668	0.973727983	0.971259939	0.977458893	0.972879469
5	0.978036644	0.974432674	0.971279675	0.978193260	0.973498001
6	0.974228343	0.970671115	0.969656760	0.975559167	0.967916541
7	0.973279419	0.969628225	0.969237034	0.975063340	0.967094515
8	0.973453813	0.970129672	0.969808684	0.975272742	0.967287493
9	0.972445814	0.968520302	0.968562189	0.974554547	0.966346445
10	0.974708576	0.972942824	0.970562841	0.974542677	0.970425688

# Barra	Escenario 45 [pu]	Escenario 46 [pu]	Escenario 47 [pu]	Escenario 48 [pu]	Escenario 49 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.981481021	0.973524692	0.978430855	0.976676439	0.972990207
3	0.979142276	0.970862229	0.976079499	0.974865109	0.969650878
4	0.980658966	0.971137157	0.976006720	0.975341618	0.969883968
5	0.981511688	0.971293641	0.976446500	0.976232715	0.969954894
6	0.977493731	0.968174158	0.974902216	0.970260017	0.969258183
7	0.977025086	0.967489740	0.974091046	0.969380014	0.968656414
8	0.977206865	0.967974727	0.974513482	0.969583408	0.969170866
9	0.976554182	0.966666131	0.973209230	0.968581159	0.967877768
10	0.977604333	0.969033164	0.974916390	0.973945796	0.967476249

# Barra	Escenario 50 [pu]	Escenario 51 [pu]	Escenario 52 [pu]	Escenario 53 [pu]	Escenario 54 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.973282248	0.977985281	0.969709203	0.980211069	0.978988160
3	0.970962134	0.976052418	0.966371612	0.978087524	0.976400308
4	0.970513272	0.975887007	0.967239761	0.978916344	0.978169892
5	0.970851991	0.976056058	0.967382721	0.979192961	0.978768271
6	0.967733913	0.973235248	0.963732934	0.975853197	0.974231761
7	0.966741782	0.972252860	0.963109872	0.974674333	0.973950155
8	0.967122926	0.972302700	0.963650454	0.974922401	0.974478584
9	0.965747148	0.971470770	0.962298767	0.973619283	0.973407685
10	0.969808850	0.974737610	0.964448640	0.977168963	0.974615769

# Barra	Escenario 55 [pu]	Escenario 56 [pu]	Escenario 57 [pu]	Escenario 58 [pu]	Escenario 59 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.978746544	0.976873897	0.974221981	0.974525178	0.977260726
3	0.976199544	0.974438954	0.971731944	0.972319447	0.975407757
4	0.977002901	0.974609309	0.972051805	0.972759758	0.976198653
5	0.977708265	0.974784606	0.972055143	0.973350235	0.976498459
6	0.974880545	0.972573743	0.968677851	0.968219114	0.970863265
7	0.974299542	0.971661134	0.967364171	0.967441372	0.969994580
8	0.974541431	0.972080129	0.967548368	0.967826779	0.970636468
9	0.973705505	0.970703879	0.966245565	0.966608044	0.968932934
10	0.974277005	0.972626469	0.970303887	0.970837074	0.974217872

# Barra	Escenario 60 [pu]	Escenario 61 [pu]	Escenario 62 [pu]	Escenario 63 [pu]	Escenario 64 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.973321995	0.974955593	0.977957637	0.975576738	0.979143169
3	0.970460951	0.972094483	0.975298829	0.972688803	0.976937152
4	0.971303881	0.973133512	0.976728007	0.972836758	0.977268562
5	0.971418057	0.973278337	0.977494272	0.972907283	0.977520768
6	0.967757877	0.969917595	0.973309065	0.971921183	0.975087386
7	0.967179707	0.969351409	0.972084629	0.971425698	0.974092144
8	0.967658804	0.969633812	0.972317827	0.971786748	0.974177544
9	0.966440993	0.968743622	0.971003934	0.970823292	0.973278211
10	0.968364638	0.970672727	0.974035068	0.970991939	0.975488810

# Barra	Escenario 65 [pu]	Escenario 66 [pu]	Escenario 67 [pu]	Escenario 68 [pu]	Escenario 69 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.980804786	0.971739711	0.978994335	0.981128365	0.982134667
3	0.978224944	0.968426456	0.977096644	0.979318833	0.980184664
4	0.979907802	0.969975300	0.977350454	0.979072085	0.980894255
5	0.980549982	0.970144806	0.977536049	0.979369634	0.981382258
6	0.976962278	0.965849372	0.974131985	0.977586749	0.978333090
7	0.976013118	0.964509908	0.973561941	0.977046143	0.977290297
8	0.976326660	0.964576015	0.973649128	0.977658672	0.977449938
9	0.975093192	0.963444689	0.973072052	0.976253555	0.976394040
10	0.977051205	0.966431724	0.975907659	0.978346777	0.978886114

# Barra	Escenario 70 [pu]	Escenario 71 [pu]	Escenario 72 [pu]	Escenario 73 [pu]	Escenario 74 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.976287603	0.977669792	0.978942126	0.978515516	0.973539299
3	0.973295507	0.975333135	0.976662195	0.975466241	0.970966711
4	0.975340360	0.975282620	0.977983691	0.977362030	0.970746285
5	0.975743692	0.975787777	0.978777356	0.978051216	0.970800170
6	0.971057110	0.973726019	0.973853599	0.974634720	0.968523978
7	0.970002574	0.973074322	0.973116690	0.973472346	0.967309319
8	0.970436940	0.973468484	0.973363092	0.973573745	0.967530517
9	0.968927270	0.972331961	0.972400637	0.972520702	0.966243531
10	0.971257427	0.974383590	0.975739673	0.973575427	0.969510762

# Barra	Escenario 75 [pu]	Escenario 76 [pu]	Escenario 77 [pu]	Escenario 78 [pu]	Escenario 79 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.975059831	0.976118338	0.978169533	0.978205066	0.976954515
3	0.972047605	0.973655993	0.975441183	0.975466061	0.974716238
4	0.974450319	0.974787532	0.976344368	0.976327048	0.975116224
5	0.975204478	0.975684691	0.976656056	0.977154535	0.975353177
6	0.968907037	0.970438797	0.974409927	0.974538925	0.971899649
7	0.967858059	0.969604723	0.973857435	0.973671633	0.971039172
8	0.968103751	0.969997869	0.974457389	0.974221759	0.971224363
9	0.966903804	0.968723526	0.973063540	0.972667855	0.970266518
10	0.970336159	0.972485163	0.973439554	0.973894672	0.973378668

# Barra	Escenario 80 [pu]	Escenario 81 [pu]	Escenario 82 [pu]	Escenario 83 [pu]	Escenario 84 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.974140237	0.970309446	0.978231512	0.973557076	0.976752902
3	0.971338166	0.967081816	0.975150624	0.970213243	0.974502817
4	0.972384899	0.968007157	0.977180810	0.972447560	0.974715568
5	0.973106251	0.968464851	0.977619166	0.972901378	0.975424896
6	0.968559896	0.964248459	0.974150345	0.967796484	0.971852300
7	0.967902798	0.963487386	0.973838737	0.967117792	0.970884459
8	0.968359116	0.964119704	0.974481941	0.967445641	0.971136219
9	0.967117829	0.962513954	0.973202275	0.966395839	0.969988494
10	0.969644806	0.965316354	0.973528049	0.968116763	0.972991685

# Barra	Escenario 85 [pu]	Escenario 86 [pu]	Escenario 87 [pu]	Escenario 88 [pu]	Escenario 89 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.978527646	0.977788352	0.977911773	0.973118048	0.98021076
3	0.975721456	0.974790873	0.975668104	0.970212656	0.977819507
4	0.977113338	0.975693131	0.976126965	0.970747679	0.979595126
5	0.977530648	0.976392292	0.976724649	0.970952018	0.980425638
6	0.974579641	0.974576631	0.973244012	0.96793321	0.975482276
7	0.973353806	0.974047569	0.972334652	0.967339175	0.974952099
8	0.973439787	0.974413019	0.972851459	0.967897572	0.975140762
9	0.972363175	0.973416761	0.971319331	0.966539239	0.974429879
10	0.974256091	0.97294656	0.974281053	0.968218386	0.976365351

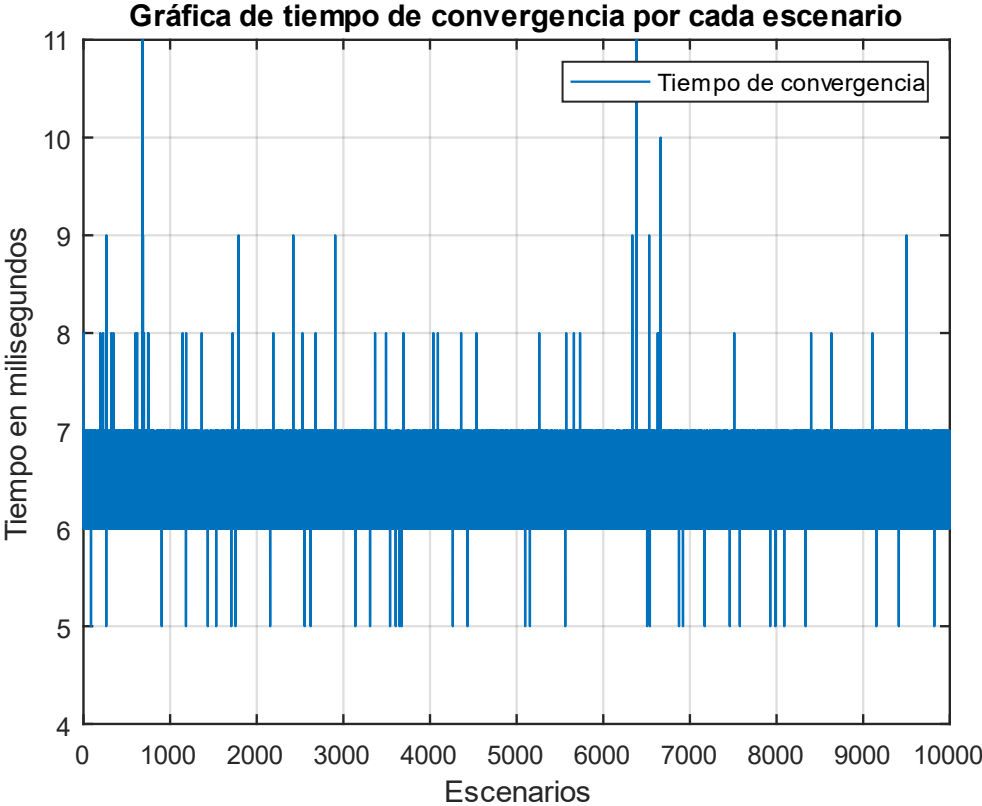
# Barra	Escenario 90 [pu]	Escenario 91 [pu]	Escenario 92 [pu]	Escenario 93 [pu]	Escenario 94 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.973379486	0.97169794	0.977277978	0.97830712	0.974185254
3	0.971033247	0.968685024	0.974473869	0.975508438	0.971733181
4	0.971376095	0.96887658	0.97579138	0.976698493	0.972230054
5	0.972048163	0.96912981	0.976403439	0.977461897	0.972393095
6	0.967035514	0.966543361	0.972835068	0.974469627	0.968318794
7	0.966137105	0.965541209	0.971839983	0.973573116	0.967132611
8	0.966358401	0.965652298	0.972187227	0.973746096	0.967413408
9	0.965313094	0.964706088	0.970864075	0.972780466	0.966051702
10	0.969588723	0.966812215	0.972498863	0.973674795	0.97071425

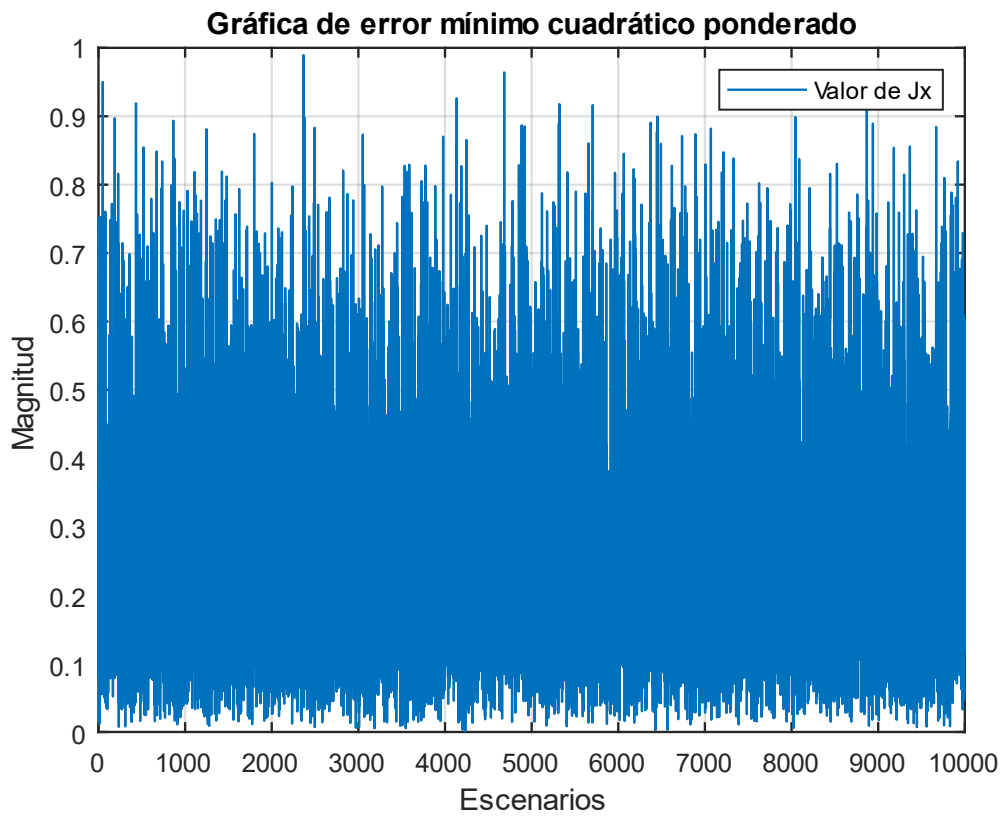
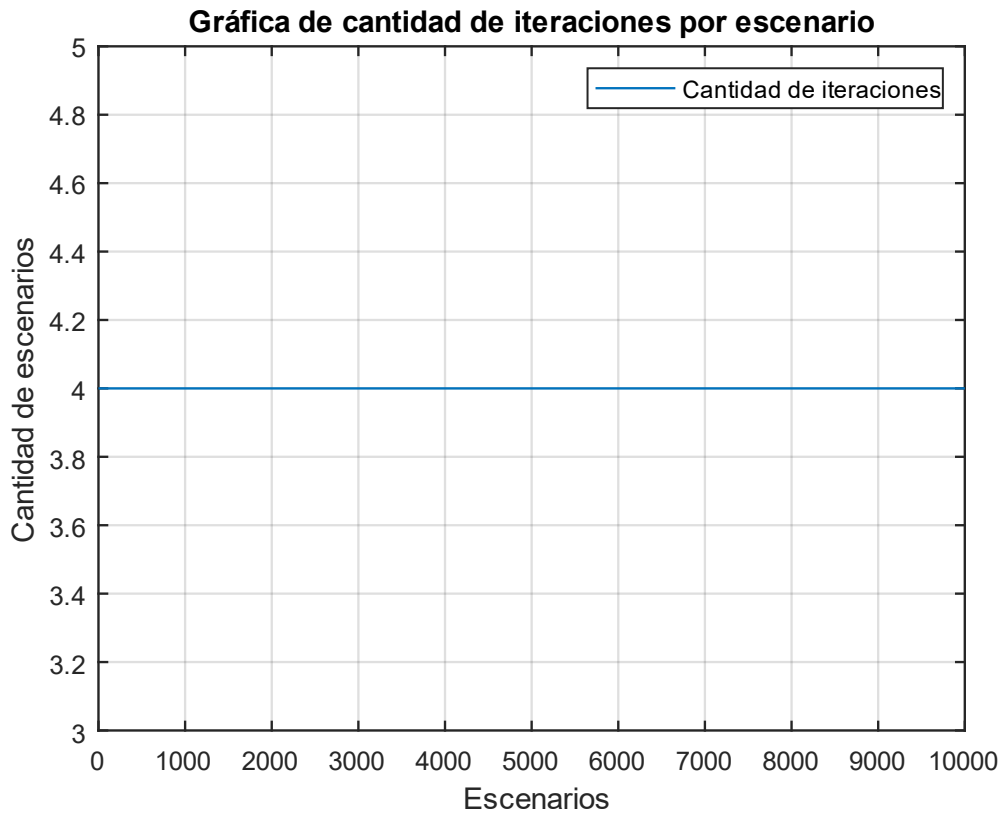
# Barra	Escenario 95 [pu]	Escenario 96 [pu]	Escenario 97 [pu]	Escenario 98 [pu]	Escenario 99 [pu]	Escenario 100 [pu]
1	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
2	0.978852606	0.969745848	0.975374642	0.974887058	0.976720293	0.976805677
3	0.976180173	0.967059150	0.972449453	0.972252100	0.974120560	0.974811117
4	0.977055741	0.966944372	0.973256742	0.972129469	0.975855480	0.974649170
5	0.977493687	0.967065963	0.973836670	0.972255542	0.976330843	0.975395160
6	0.975288931	0.963170236	0.970967850	0.970546599	0.970992420	0.971674596
7	0.975009882	0.962124720	0.970130370	0.969821161	0.969824334	0.970709257
8	0.975516987	0.962158347	0.970149259	0.970272138	0.970176669	0.971224094
9	0.974482570	0.961304391	0.969478250	0.968987239	0.968712980	0.969652347
10	0.974799471	0.965076794	0.970702129	0.970779971	0.972778659	0.973762308

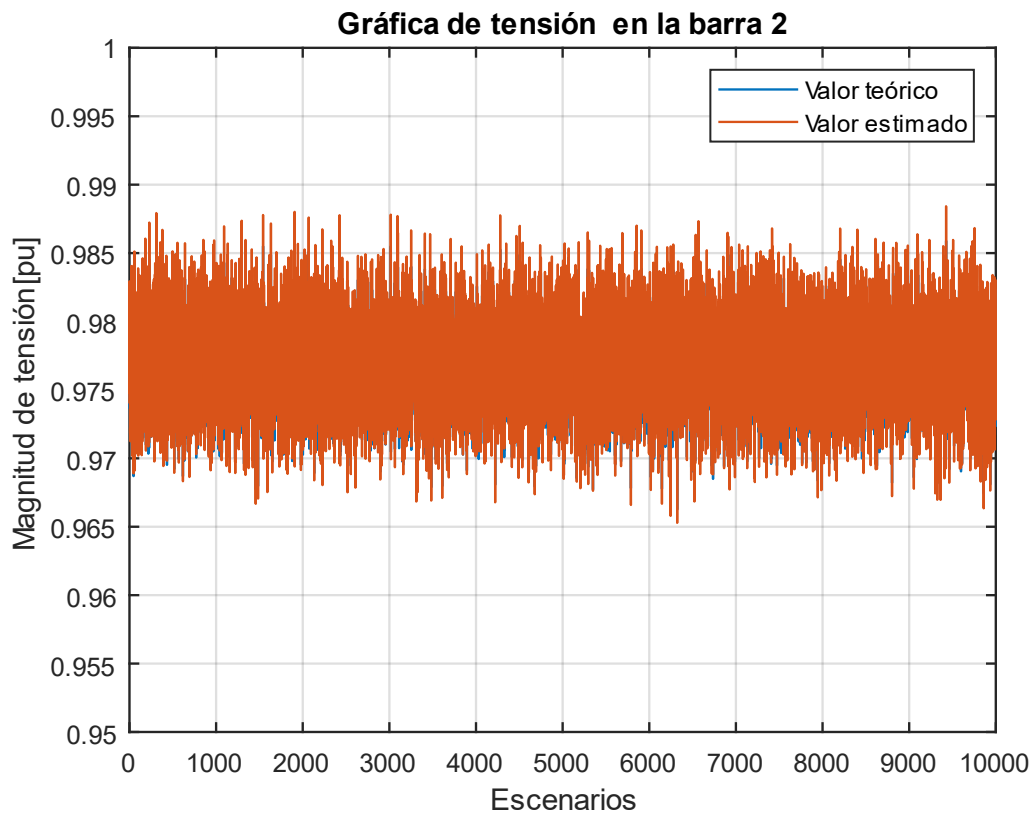
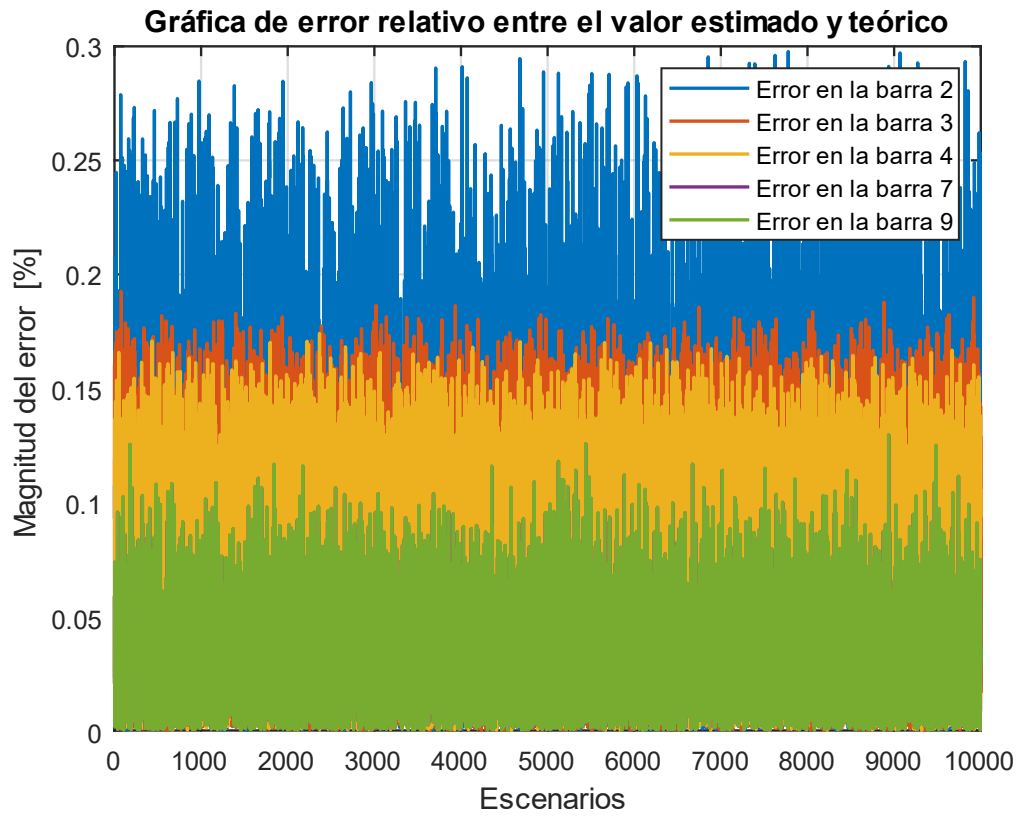
ANEXO 2: PRUEBAS EXTENDIDAS – 10001 ESCENARIOS

Más allá de los objetivos planteados para este proyecto, y en busca de una mayor comprensión de las características de la distribución de los errores, se realiza nuevamente la estimación de estado de la tensión en las barras indicadas en (22), pero se incrementa a 10000 escenarios aleatorios más el escenario base. También se suprime el valor absoluto en (36) buscando conocer la tendencia de las magnitudes destinadas. Estas pruebas adicionales, se espera que sirvan de ayuda para futuros proyectos.

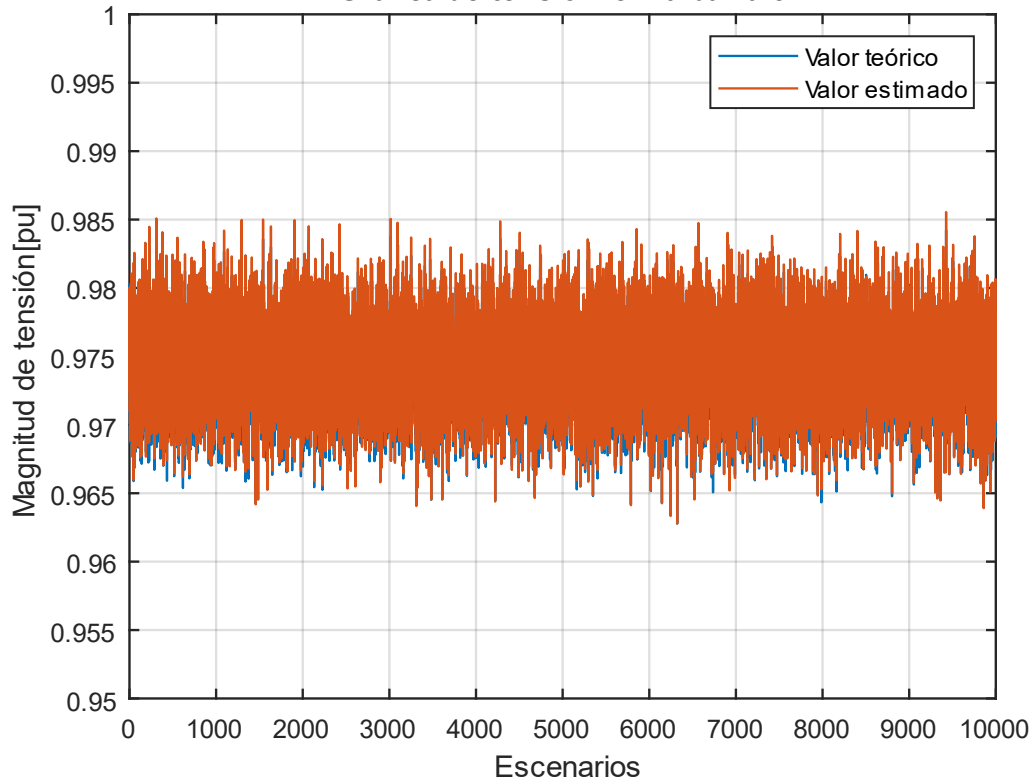
Realizando el mismo procedimiento en el equipo de cómputo presentado en la Sección 4.1.1, el tiempo total de ejecución para los 10001 escenarios y presentación de resultados en la ventana de comandos fue de 254.8325 segundos.



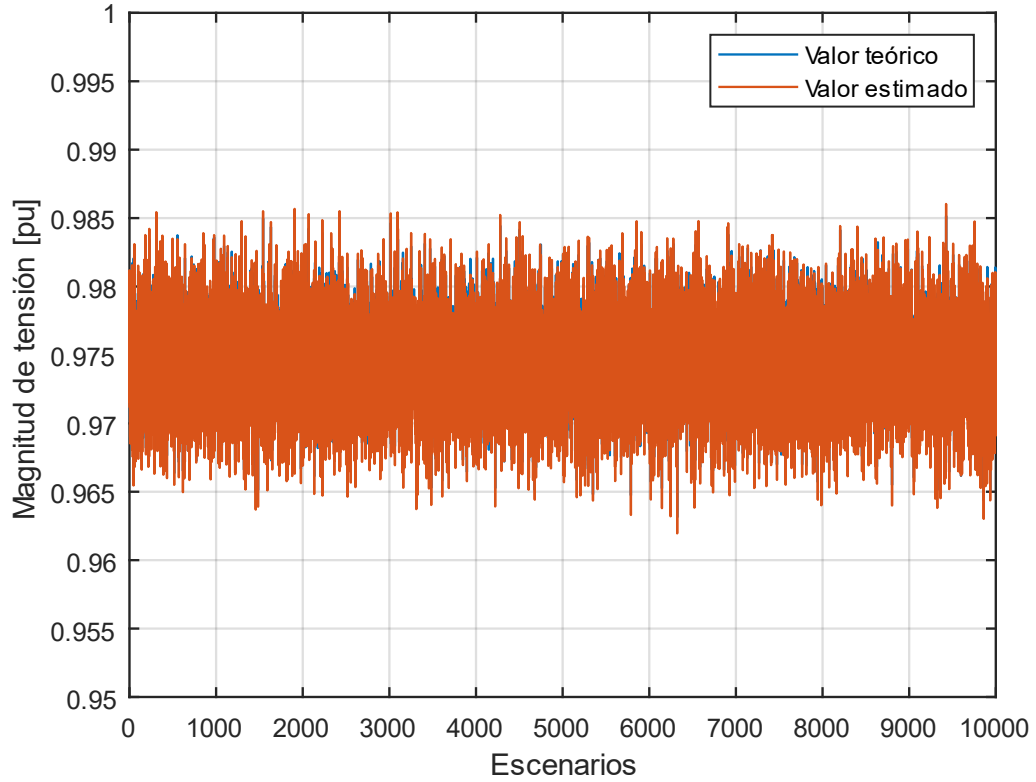




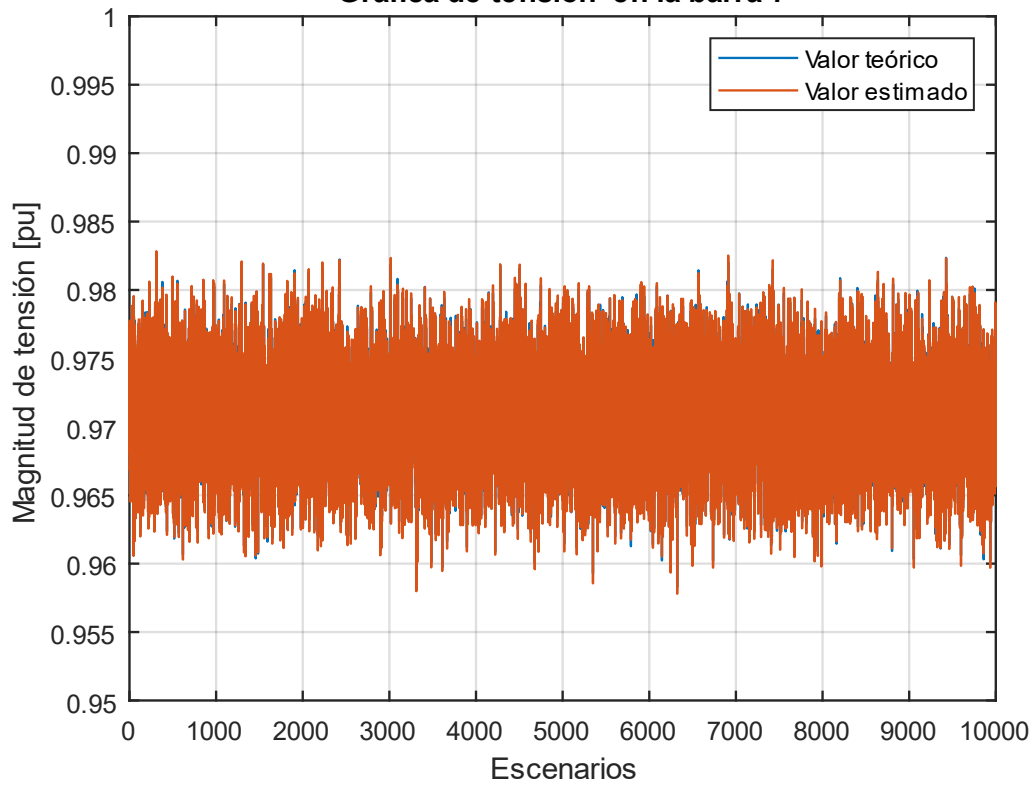
Gráfica de tensión en la barra 3



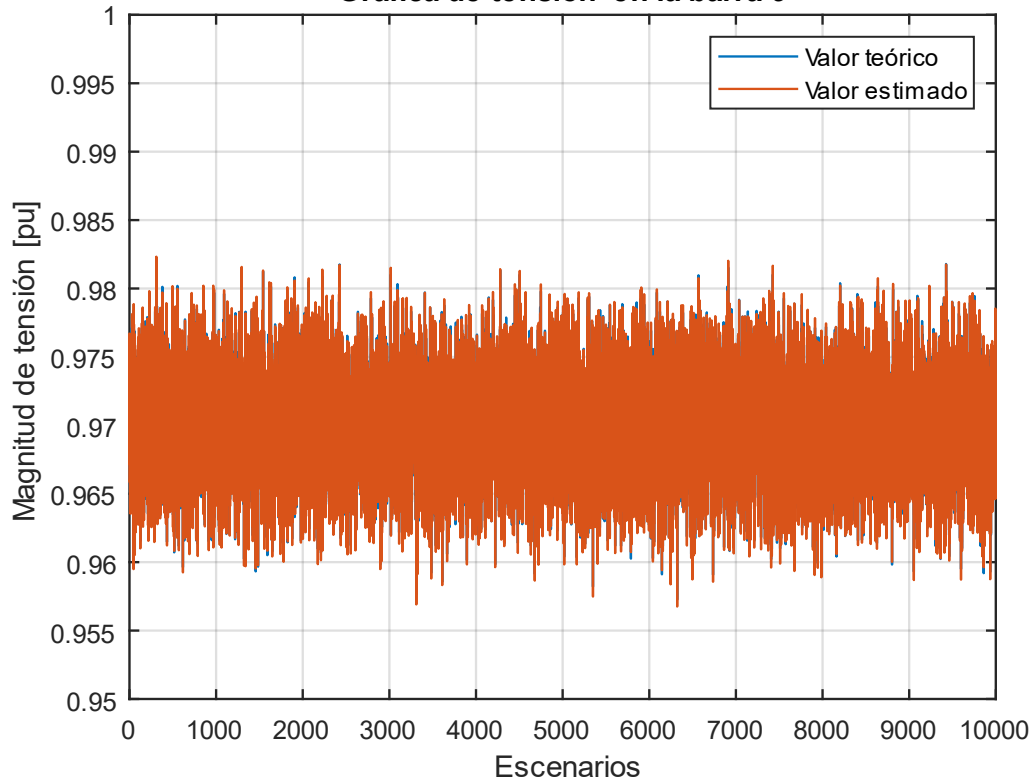
Gráfica de tensión en la barra 4



Gráfica de tensión en la barra 7



Gráfica de tensión en la barra 9



Puede notarse que no hay una diferencia significativa al comparar con resultados presentados en el Capítulo 4.

En adición, se presenta ahora la frecuencia de los datos con el fin de obtener la función de densidad de probabilidad de los errores, aunque luego de realizar la prueba de Anderson-Darling usando la función “adtest” de Matlab[®], no fue posible cumplir con la hipótesis nula para el ajuste en las funciones de densidad de probabilidad que “adtest” incorpora para las barras 3 y 4, aunque sí cumplió únicamente la función de densidad de probabilidad Kernel en el resto de barras (2, 7 y 9). Es claro que se debe indagar más sobre estas distribuciones y si estos resultados son exclusivos del sistema de prueba implementado o se puede extrapolar a todas las MR DC *on-grid*.

