

Análisis de desempeño de estrategias de estimación de señales distorsionadas de tensión y corriente de la red eléctrica de BT del piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica – Condición de operación en estado estable

Alejandra Martínez Peñaloza

Trabajo de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería

Codirector

Gabriel Ordóñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

### Agradecimientos

Quiero agradecerles a mis padres por su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida que, aunque tuvo imprevistos y varios retos que no sabía cómo sobrellevar en un principio, ellos con su sabiduría y paciencia estuvieron a mi lado incondicionalmente dándome un soporte para lograr todos mis objetivos propuestos.

A mis hermanos y mi familia les quiero agradecer por su presencia constante, aunque estén lejos, siempre han estado ahí para mí apoyándome cuando los he necesitado.

A mi director y codirector les agradezco por su entrega, paciencia, apoyo y guía durante todo el desarrollo de este trabajo de investigación. Creo que sin el apoyo de ustedes no hubiese podido sacar adelante este trabajo.

Quiero dar un agradecimiento a mis amigos y compañeros del grupo de trabajo, por compartir experiencias juntos y enseñarme cosas valiosas a lo largo de este camino. En especial les quiero agradecer a Ana y Alejandro por estar siempre presentes, ser un apoyo emocional durante este camino que escogí y enseñarme puntos de vista diferentes al mío.

Por último, agradezco el acompañamiento de mis perritos Oreo y Nucita, siempre significaron una dosis extra de felicidad durante los momentos más estresantes.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Generalidades del Proyecto .....	15
1.1 Objetivos .....	15
1.2 Alcances y limitaciones .....	16
1.3 Metodología y estructura del documento .....	17
1.4 Divulgación científica .....	18
2. Estrategias de estimación de flujos de cargas .....	19
2.1 Estrategia Backward/Forward .....	21
2.1.1 Leyes de Kirchhoff .....	25
2.1.2 Aritmética de intervalos .....	27
2.2 PowerFactory .....	30
2.3 Estrategia Newton-Raphson .....	32
2.4 Simulink .....	34
2.5 Resumen de hallazgos del capítulo .....	36
3. Modelado de la red eléctrica del piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica .....	38
3.1 Red eléctrica de BT del piso 4 .....	39
3.2 Modelado de los elementos de la red eléctrica del Piso 4 .....	42
3.3 Escenarios de operación .....	46
4. Comparación de los resultados de los parámetros con las estrategias de estimación implementadas .....	48

4.1 Indicadores y métricas para la evaluación de desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencia.....	48
4.2 Comparación de las formas de onda .....	51
4.3 Comparación de valores eficaces (RMS) de las señales de tensión y corriente .....	60
4.4 Comparación de parámetros de potencia.....	65
4.5 Comparación de parámetros de calidad de la potencia eléctrica .....	74
4.5.1 Desbalance de tensión.....	74
4.5.2 Índices de distorsión armónica.....	77
4.6 Resultados estrategia Newton-Raphson.....	86
5. Conclusiones.....	94
Referencias Bibliográficas .....	100
Apéndices .....	110

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estrategia de solución.....	18
Figura 2. Algoritmo general de Backward/Forward.....	23
Figura 3. Esquema ejemplo del ordenamiento nodal de una red eléctrica radial. ....	25
Figura 4. Algoritmo Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff.....	27
Figura 5. Algoritmo Backward/Forward basado en aritmética de Intervalos.....	29
Figura 6. Diagrama de flujo del procedimiento aplicado en PF. ....	31
Figura 7. Algoritmo Newton-Raphson con enfoque de inyección de corriente .....	34
Figura 8. Estructura general del modelo en Simulink.....	35
Figura 9. Estructura de bloques de cargas no lineales y del Sistema FV.....	36
Figura 10. Edificio de Ingeniería Eléctrica .....	38
Figura 11. Diagrama unifilar de la red de baja tensión de la edificación. ....	39
Figura 12. Diagrama unifilar de la red de baja tensión del Piso 4. ....	40
Figura 13. Formas de onda de las señales de tensión en los nodos de la red eléctrica del Piso 4.....	51
Figura 14. Formas de onda de corriente conductor TP4-TALU4 en la fase A.....	55
Figura 15. Formas de onda de las corrientes de los conductores TP4-PV en la fase A.....	56
Figura 16. Valores eficaces de la tensión del nodo TP4.....	60
Figura 17. Valores eficaces de las corrientes en los conductores SLACK-TP4.....	61
Figura 18. Valores eficaces de las corrientes en los conductores TP4-TALU4. ....	62

Figura 19. Valores eficaces de las corrientes en los conductores TP4-PV.....	63
Figura 20. Valores estimados de potencia activa, potencia aparente y factor de potencia del Escenario 21.....	66
Figura 21. Valores de potencia no activa para todos los escenarios.....	69
Figura 22. Índice de desbalance de tensión para cada escenario de operación.....	75
Figura 23. Distorsión armónica individual de tensión en cada estrategia de solución. ....	77
Figura 24. Distorsión armónica individual de la corriente de la fase A en el conductor TP4-TALU4.....	78
Figura 25. Distorsión armónica individual de corriente de la fase A en el conductor TP4-PV. ....	80
Figura 26. Índice de distorsión armónica total de las tensiones para los diversos escenarios analizados.....	81
Figura 27. Índice de distorsión armónica total de las corrientes en los conductores SLACK-TP4. ....	82
Figura 28. Índice de distorsión armónica total de las corrientes en los conductores TP4-TALU4.....	83
Figura 29. Índice de distorsión armónica total de corriente en conductor TP4-PV.....	84
Figura 30. Esquemático de la construcción de la matriz Ybus de un elemento trifásico. ....	87
Figura 31. Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 1.....	90
Figura 32. Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 2.....	90

Figura 33. Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 3.....	91
Figura 34. Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 4.....	92
Figura 35. Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 5.....	93

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Divulgaciones realizadas durante el desarrollo del trabajo de investigación .....	18
Tabla 2. Métodos iterativos de estimación de flujos de cargas.....	20
Tabla 3. Herramientas o software para estimación de flujos de cargas .....	21
Tabla 4. Características generales de las cargas y del Sistema FV.....	41
Tabla 5. Características de los conductores eléctricos.....	43
Tabla 6. Modelos Norton equivalentes de cada elemento. ....	44
Tabla 7. Escenarios de operación.....	47
Tabla 8. Indicadores para evaluación de desempeño de estrategias en términos de las formas de onda .....	49
Tabla 9. Indicadores para evaluación de desempeño de estrategias en términos de valores eficaces, parámetros de potencia y parámetros de calidad de la potencia eléctrica.....	50
Tabla 10. Métrica de error para evaluación de desempeño de estrategias de solución de flujos de potencia .....	50
Tabla 11. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de tensión RMSE y NRMSE. ....	52
Tabla 12. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de tensión MSE y MAE.....	54
Tabla 13. Desempeño las estrategias en términos de los errores de forma de onda de corriente RMSE y NRMSE.....	57

Tabla 14. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de corriente MSE y MAE .....	58
Tabla 15. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de los valores eficaces de las señales de tensión y corriente.....	64
Tabla 16. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de potencia aparente, potencia activa y factor de potencia.....	67
Tabla 17. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de las potencias no activas de Fryze e IEEE. ....	71
Tabla 18. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de las potencias no activa de Budeanu y de distorsión de Budeanu.....	73
Tabla 19. Desempeño de las estrategias en término de los errores del índice de desbalance de tensión.....	76
Tabla 20. Desempeño de las estrategias en términos de los errores de los índices THD de tensión y corriente.....	85
Tabla 21. Enfoques de Newton-Raphson ensayados.....	88

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Estrategias de solución de flujos de potencia .....	110
Apéndice B. Modelos Norton equivalente de luminarias, extractores y sistema fotovoltaico ...	115
Apéndice C. Señales de tensión condiciones iniciales.....	125

## Resumen

**Título:** Análisis de desempeño de estrategias de estimación de señales distorsionadas de tensión y corriente de la red eléctrica de BT del piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica – Condición de operación en estado estable\*

**Autor:** Alejandra Martínez Peñaloza\*\*

**Palabras claves:** Flujo de cargas armónico, cargas no lineales, sistema fotovoltaico y modelo equivalente Norton, red eléctrica de distribución.

### Descripción:

Las estrategias de solución de flujos de potencia son herramientas que permiten estimar magnitudes y ángulos de fase de las señales de tensión en los nodos y corrientes en los conductores de las redes eléctricas. Con los cambios producidos por la integración de recursos energéticos distribuidos y el uso masivo de cargas no lineales en las redes de distribución, los planteamientos matemáticos de las estrategias mencionadas anteriormente han tenido adaptaciones para cumplir con las nuevas condiciones de operación de las redes eléctricas.

No obstante, existe una carencia de estudios con estrategias de solución de flujos de potencia que analicen redes eléctricas de distribución teniendo en cuenta la operación de un sistema fotovoltaico, desbalance y no linealidad en las cargas, y distorsión armónica en la señal de tensión de alimentación. De igual forma, se hace necesario considerar el uso de modelos de carga que representen la no linealidad de los dispositivos y que a la vez tengan en cuenta la interacción armónica entre la señal de tensión y corriente.

Por ello, el propósito de este trabajo de investigación es analizar el desempeño de estrategias de estimación de señales de tensión en nodos y corrientes en ramales de una red eléctrica de BT para la condición de operación en estado estable, considerando una tensión de alimentación desbalanceada y distorsionada y la presencia de cargas no lineales y un sistema fotovoltaico.

Inicialmente, se modela la red eléctrica seleccionada y se adaptan las estrategias de solución seleccionadas a las condiciones de la red eléctrica. Seguidamente, se realizan las simulaciones de escenarios de operación en la estrategia Simulink estimando variables eléctricas, parámetros e indicadores. Por último, se estiman variables eléctricas, parámetros e indicadores aplicando las estrategias de solución adaptadas, se calculan errores de estimación y son comparados los resultados obtenidos por las estrategias.

---

\* Trabajo de investigación

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: German Osma Pinto, PhD. Ingeniería Eléctrica. Codirector: Gabriel Ordóñez Plata, PhD. Ingeniería Industrial.

## Abstract

**Title:** Performance Analysis of estimation strategies of voltage and current distorted signals of the fourth floor low voltage grid of the Electrical Engineering building - Steady State Operating Condition\*

**Author:** Alejandra Martínez Peñaloza\*\*

**Keywords:** Harmonic power flow, non-linear loads, photovoltaic system, Norton equivalent model, distribution network.

### Description:

Power flow solution strategies are tools that allow estimating magnitudes and phase angles of voltage signals at nodes and currents in power grid conductors. The mathematical approaches of the strategies have had adaptations to meet the changes produced by the integration of distributed energy resources and the massive use of nonlinear loads in distribution networks.

However, there is a lack of studies with power flow solution strategies that analyze electrical distribution networks taking into account the operation of a photovoltaic system, imbalance and non-linearity in loads, and harmonic distortion in the supply voltage signal. In addition, it is necessary to consider the use of load models that represent the nonlinearity of the devices and at the same time take into account the harmonic interaction between the voltage and current signal.

Therefore, the purpose of this research work is to analyze the performance of the strategies for estimating voltage signals in nodes and currents in branches of a LV electrical network for the steady state operating condition, considering an unbalanced and distorted supply voltage and the presence of non-linear loads and a photovoltaic system.

Initially, the selected grid is modeled and the selected solution strategies are adapted to the conditions of the grid. Then, simulations of operating scenarios are performed in the Simulink strategy estimating electrical variables, parameters and indicators. Finally, electrical variables, parameters and indicators are estimated using the adapted solution strategies, estimation errors are calculated and the results obtained by the strategies are compared.

---

\* Research work

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: German Osma P, PhD. Electric engineering. Co-director: Gabriel Ordóñez Plata, PhD. Industrial engineering.

## Introducción

El estudio de flujos de potencia o flujos de cargas es una herramienta que permite analizar la operación en condición de estado estable de un sistema eléctrico. Generalmente, los flujos de potencia utilizan métodos numéricos para estimar y caracterizar la operación de sistemas de potencia (Ouali & Cherkaoui, 2020).

El objetivo principal de los flujos de potencia es estimar las magnitudes y ángulos de fase de las señales de tensión de los nodos y de corriente en conductores de la red eléctrica en estudio. Adicionalmente, esta herramienta es utilizada para analizar otro tipo de situaciones como fallas de cortocircuito, estudios de estabilidad y despacho económico (Milovanović et al., 2020; Ouali & Cherkaoui, 2020).

Existen diversos métodos o estrategias de solución de flujos de potencia con enfoques particulares (Balamurugan & Srinivasan, 2011; Milovanović et al., 2020; Stott, 1974). Por un lado, existen los métodos de solución basados en el planteamiento de ecuaciones no lineales, como Newton-Raphson y Gauss-Seidel, los cuales son los métodos convencionales de mayor uso en el análisis de sistemas de potencia debido a sus propiedades de convergencia, precisión y la poca necesidad de información de la red eléctrica para realizar el análisis (Arabsalmanabadi et al., 2017; Correa & Vieira, 2020; Sereeter et al., 2019; Suchite-Remolino et al., 2020; Taheri et al., 2019). No obstante, características típicas de una red de distribución como topología radial o enmallada, cargas distribuidas y desbalanceadas, alta relación R/X de los conductores y operación desbalanceada, pueden producir que estos métodos convencionales presenten problemas de

convergencia y singularidad en la inversión de la matriz Jacobiana (Al-sakkaf & AlMuhaini, 2018; Sereeter et al., 2017, 2019; X. Wang et al., 2018).

Por otro lado, los métodos basados en barridos, como Backward/Forward, han tomado importancia en los análisis de redes de distribución debido a que su enfoque matemático facilita la obtención de resultados precisos en tiempos computacionales cortos y no tienen restricciones como los métodos convencionales de análisis de sistemas de transmisión (Cataliotti et al., 2016; Eminoglu & Hocaoglu, 2005; Ouali & Cherkaoui, 2020; Rupa & Ganesh, 2014; Suchite-Remolino et al., 2020; Taheri et al., 2019).

Ahora bien, las estrategias de solución de flujos de potencia mencionadas tienden a no ser viables con la implementación de los generadores distribuidos y dispositivos no lineales, razón por la cual variantes de las estrategias de solución de flujos de potencia han sido propuestas considerando distorsión armónica (Arabsalmanabadi et al., 2017; Milovanović et al., 2020; Rupa & Ganesh, 2014).

Estas estrategias de flujos de potencia armónicos consideran las diferentes componentes armónicas asociadas a los recursos energéticos distribuidos – DER y las cargas no lineales, resaltando su efectividad al reducir tiempos computacionales.

Aunque en la literatura los planteamientos matemáticos de las estrategias de solución de flujos de potencia han sido adaptados a nuevas condiciones de operación de la red eléctrica, es esencial resaltar que pocos estudios consideran simultáneamente aspectos claves como integración de recursos distribuidos, en especial generación fotovoltaica, desbalance de las cargas y no linealidad de las cargas.

De igual forma, la consideración del uso de dispositivos no lineales en las redes de distribución crea la necesidad de usar en los estudios modelos de carga que representen la no

linealidad de estos dispositivos (Oliveira et al., 2011) y tengan en cuenta la interacción armónica entre la tensión de alimentación y la corriente (Garcés Ruiz et al., 2004).

Sin embargo, en la actualidad es común el uso de modelos en el dominio de la frecuencia dependientes de la frecuencia fundamental como el modelo de fuente de corriente, el cual no considera la interacción armónica entre tensión y corriente (Arabsalmanabadi et al., 2017; Milovanović et al., 2019, 2020; Tagore & Gupta, 2017; Yadaiah et al., 2016).

## **1. Generalidades del Proyecto**

### **1.1 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo de investigación consiste en analizar el desempeño de estrategias de estimación de señales de tensión en nodos y corrientes en ramales de la red eléctrica del cuarto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica para la condición de operación en estado estable, considerando una tensión de alimentación desbalanceada y distorsionada y la presencia de cargas no lineales y un sistema fotovoltaico. Para lo cual, se han definido los siguientes objetivos específicos:

Modelar la red eléctrica del cuarto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica en MATLAB/Simulink y PowerFactory, adecuando las estrategias de estimación seleccionadas.

Estimar tensiones de nodos y corrientes en ramales de la red eléctrica modelada a partir de las estrategias seleccionadas para los escenarios de operación definidos.

Estimar tensiones de nodo y corrientes en ramales de la red eléctrica modelada en Simulink para escenarios de operación definidos.

Estimar los índices de error de las señales de tensión y corriente y parámetros de calidad de la potencia eléctrica obtenidos a partir de la aplicación de cada estrategia de estimación.

## 1.2 Alcances y limitaciones

Este trabajo de investigación tiene como propósito realizar un análisis del desempeño de cinco estrategias de solución de flujos de potencia adaptadas a las condiciones de operación en estado estable de una red de distribución de baja tensión. El desempeño de la estrategia Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff se toma como referencia para comparar el desempeño de las cuatro estrategias de solución restantes. Esta estrategia emplea el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada para modelar los dispositivos no lineales de la red eléctrica, razón por la cual es la referente en la comparación de desempeños.

En el caso de las cuatro estrategias de solución restantes (Backward/Forward basado en aritmética de intervalos, PowerFactory, Simulink y Newton-Raphson), utilizan el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada y desacoplada y el modelo de fuente de corriente como modelo de carga que representa el comportamiento de las cargas no lineales y el sistema fotovoltaico instalados en la edificación.

Asimismo, los algoritmos de las estrategias de solución son modificados para trabajar a distintas frecuencias, con el propósito de incluir la distorsión armónica característica de la tensión de alimentación de la red eléctrica en estudio.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación se presenta la limitación del alcance del software Simulink y PowerFactory de DigSILENT para el modelado de los dispositivos no lineales. Estos software no contemplan la posibilidad de utilizar un modelo en el dominio de la frecuencia complejo puede representar la interacción armónica de las señales de tensión y corriente de las cargas no lineales, como lo hace el modelo Norton equivalente de matriz de admitancia acoplada.

### **1.3 Metodología y estructura del documento**

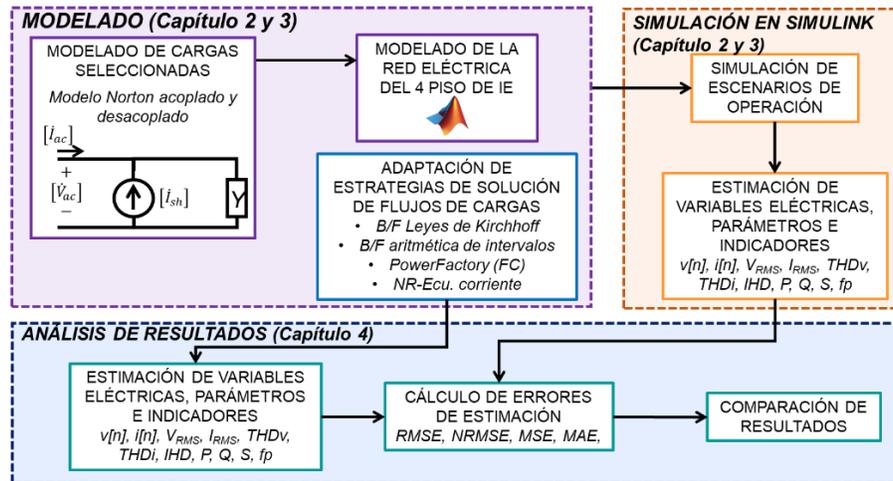
Para dar cumplimiento al objetivo del trabajo de investigación, se define una metodología de tres etapas de desarrollo i) el modelado de la red eléctrica elegida como caso de estudio, y la adaptación de las estrategias de estimación a las características específicas de la red; ii) simulaciones de la red eléctrica caso de estudio en la herramienta Simulink de MATLAB; y iii) el análisis de los resultados obtenidos de la estimación de variables y parámetros eléctricos. La figura 1 presenta un resumen de la estrategia de solución empleada.

El documento está constituido por cinco capítulos. El Capítulo 2 comprende la explicación de las estrategias de estimación de flujos de potencia y las adaptaciones realizadas a estas teniendo en cuenta las características de operación en estado estable de la red eléctrica del caso de estudio; el Capítulo 3 presenta el modelado de la red eléctrica tomada como caso de estudio, describiendo la red eléctrica del cuarto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica, los modelos de las cargas empleados en el desarrollo del estudio y los escenarios de operación planteados; el Capítulo 4 muestra la comparación de resultados obtenidos de la aplicación de las estrategias de estimación

de flujos de potencia adaptadas y los resultados obtenidos en la herramienta Simulink. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo de investigación.

**Figura 1.**

*Estrategia de solución.*



## 1.4 Divulgación científica

La tabla 1 presenta los artículos realizados durante el desarrollo de la investigación y el estado en el que actualmente se encuentran dentro del proceso de ser publicados.

**Tabla 1.**

*Divulgaciones realizadas durante el desarrollo del trabajo de investigación*

Título	Autores	Revista/Evento	Estado	Ref.	Aporte a la investigación
Analysis of the performance of the Norton equivalent model of a photovoltaic	Alejandra Martínez-	International Review of Electrical	Publicado	(Martínez-Peñaloza & Osma-	Modelado del sistema FV del edificio E3T a partir del modelo Norton equivalente

Título	Autores	Revista/ Evento	Estado	Ref.	Aporte a la investigación
system under different operating scenarios	Peñaloza y German-Osma Pinto	Engineering - IREE		Pinto, 2021)	
Performance analysis of a Backward/Forward algorithm adjusted to a distribution network with non-linear loads and a PV system	Alejandra Martínez-Peñaloza, Gabriel Ordóñez-Plata y German Osma-Pinto	International Association of Engineers- IAENG	Revisión	-	Análisis del desempeño de la estrategia de estimación Backward/Forward adaptada a las condiciones de operación de la red eléctrica del edificio E3T
Determination of parameters of coupled and decoupled admittance matrix methods of the Norton Equivalent model for air extractor	Alejandra Martínez-Peñaloza y German-Osma Pinto	Tecnura	Revisión	-	Modelado de un extractor de aire monofásico a partir del modelo Norton equivalente
Performance analysis of power flow strategies adjusted to a distribution network	Alejandra Martínez-Peñaloza, Gabriel Ordóñez-Plata y German Osma-Pinto	ICREPQ 2022	Poster en Julio 2022	-	Análisis del desempeño de tres estrategias de solución de flujos de potencia adaptadas a las condiciones de operación de la red eléctrica del edificio E3T

## 2. Estrategias de estimación de flujos de cargas

Las estrategias de estimación de flujos de cargas permiten conocer las condiciones idóneas de operación de un sistema eléctrico, evitando así la instalación de equipos de medición a lo largo del mismo (Ouali & Cherkaoui, 2020). El objetivo principal de estas estrategias es estimar magnitudes y ángulos de fase de las tensiones de cada nodo del sistema, las corrientes que fluyen por los conductores, y los parámetros de potencia, entre otras variables (Milovanović et al., 2020).

No obstante, obtener una solución de un flujo de cargas es una tarea compleja por la cantidad de variables a tener en cuenta y las diferencias que existen entre las mismas. Para ello, los métodos iterativos han sido empleados para lograr soluciones con menor incertidumbre.

Las tablas 2 y 3 resumen las estrategias de estimación de flujos de cargas trabajados en la literatura. La tabla 2 presenta los métodos iterativos como Backward/Forward y Newton-Raphson, y la tabla 3 presenta las herramientas computacionales o software como PowerFactory de DigSILENT y Simulink.

**Tabla 2.**

*Métodos iterativos de estimación de flujos de cargas*

Método iterativo	Tipo de algoritmo	Características básicas
Backward/Forward	Leyes de Kirchhoff (Cataliotti et al., 2016; Eminoglu & Hocaoglu, 2009; Garcés Ruiz et al., 2004; Rupa & Ganesh, 2014)	Sistemas de configuración radial con desbalance en las cargas; considera un flujo de cargas armónico; diferencian cargas lineales de cargas no lineales; recomiendan modelos que consideren interacción armónica.
	Aritmética de intervalos (Das, 2006; Padilha-Feltrin et al., 2008; Z. Wang & Alvarado, 1992)	Sistemas de configuración radial con desbalance en las cargas; considera un flujo de cargas armónico; diferencian cargas lineales de cargas no lineales.
Newton-Raphson	Tradicional (Duncan Glover, 2004; Grainger & Stevenson, 1996; Sereeter et al., 2019)	Sistemas balanceados y sin distorsión armónica; asumen cargas lineales; cálculo de potencias.
	Adaptado (Sereeter et al., 2017, 2019; Thongkrajay et al., 2006)	Sistemas de configuración radial con desbalance en las cargas; planteamiento de una sola fuente de alimentación; cálculo de corrientes; asumen cargas lineales.

**Tabla 3.***Herramientas o software para estimación de flujos de cargas*

Herramienta/ Software	Tipo de algoritmo	Características básicas
PowerFactory	Penetración armónica (Bosovic et al., 2016; Deng et al., 2021; Garcés Ruiz et al., 2004; Gárces Ruiz et al., 2005; Ibrahim et al., 2021; Marín et al., 2017; Oskouei & Mohammadi-Ivatloo, 2020)	Supone la división del flujo de potencia en dos $F_1$ , caso fundamental, y $F_h$ , caso de distorsión armónica; modelo de cargas no-lineales depende de las tensiones de frecuencia fundamental (modelo de fuente de corriente); se resuelve el flujo de cargas para cada frecuencia.
Simulink	Simscape Electrical	Sistemas de configuración radial con o sin desbalance en las cargas; posibilidad de realizar análisis armónico; limitaciones con los modelos de cargas no lineales.

## 2.1 Estrategia Backward/Forward

Esta estrategia de solución de flujos de potencia de tipo barrido tiene como características principales su aplicación en redes de distribución de topología radial, considerando una operación desbalanceada debido a la presencia de cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas; asimismo, algunos autores adaptan la estrategia para la solución de flujos de potencia armónicos, diferenciando los modelos matemáticos empleados en representar el comportamiento de las cargas lineales y no lineales.

Ouali y Cherkaoui (Ouali & Cherkaoui, 2020) plantean algoritmo basado en Backward/Forward donde al realizar el análisis de flujos de potencia, la información de la red debe estar organizada de tal manera que facilita la búsqueda de las conexiones entre los nodos, logrando disminuir tiempos de cómputo.

Milovanovic *et al.* (Milovanović et al., 2020) proponen un método rápido y efectivo de barrido armónico que soluciona flujos de potencia armónicos para redes de distribución radiales con integración de unidades de generación distribuida.

Suchite-Remolino *et al.* (Suchite-Remolino et al., 2020) presentan un enfoque alternativo de la estrategia de barrido Backward/Forward, cuya ventaja es la rapidez de convergencia en el análisis de redes de distribución con nodos de tensión controlada (PV).

Taheri *et al.* (Taheri et al., 2019) formulan un método utilizando el concepto de líneas independientes para organizar las líneas consecutivas de la red de distribución y de esta forma aplicar el algoritmo Backward/Forward basado en las leyes de Kirchhoff.

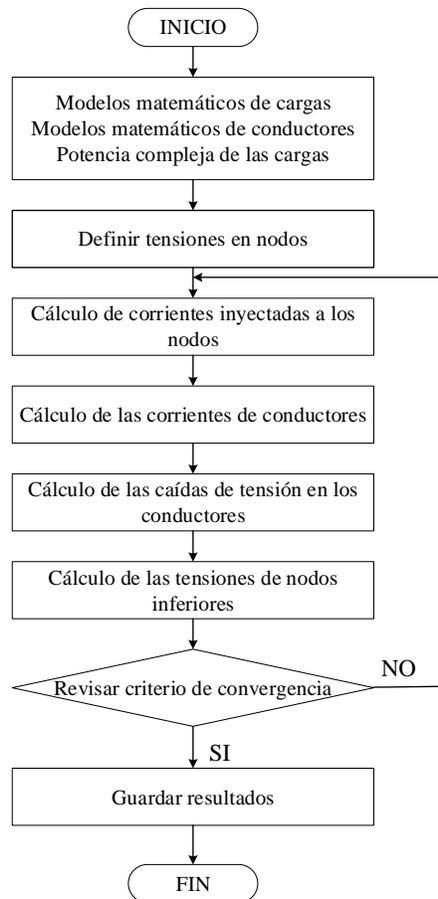
Cataliotti *et al.* (Cataliotti et al., 2016) utilizan el algoritmo Backward/Forward teniendo en cuenta el método de sumatoria de corrientes. El estudio lo realizan considerando mediciones en puntos críticos de una red de baja tensión.

De lo anterior, puede destacarse que la estrategia de barrido Backward/Forward ha sido utilizada en estudios de redes de distribución por la rápida convergencia que esta presenta; además, varios autores resaltan la facilidad de integrar recursos distribuidos en los estudios de flujos de cargas solucionados con este tipo de estrategia. De igual forma, la técnica de barrido facilita el estudio de redes mal condicionadas sin la necesidad de aplicar inversiones de matrices Jacobianas, siendo una ventaja sobre las estrategias tradicionales como Newton-Raphson.

La figura 2 presenta el algoritmo general de la estrategia Backward/Forward, donde existe una etapa inicial para definir el modelo matemático de las cargas, el modelo matemático de los conductores e introducir los valores de potencia compleja de las cargas.

**Figura 2.**

*Algoritmo general de Backward/Forward.*



La etapa siguiente comprende en definir las tensiones en los nodos de la red eléctrica. Luego, el proceso iterativo da inicio con su primer subproceso, un barrido hacia arriba o Backward. En este barrido hacia arriba las corrientes inyectadas a los nodos por las cargas son calculadas  $I_L$ ; después, las corrientes por los conductores  $I_B$  se calculan teniendo en cuenta la suma de corrientes entre los nodos aguas abajo del nodo del alimentador, como se observa en la Ecuación (1).

$$I_B = I_L + \sum I_{i,N} \quad (1)$$

Siguiendo el proceso iterativo, el segundo subproceso o el barrido hacia abajo (Forward), inicia calculando las caídas de tensión de los conductores, considerando la corriente  $I_B$  calculada en el subproceso anterior y la impedancia del conductor  $Z$ . Luego, utilizando la Ecuación (2) son calculadas las tensiones en los nodos  $V_N$ , teniendo en cuenta las tensiones de los nodos anteriores  $V_{N-1}$  y las caídas de tensión de los conductores.

$$V_N = V_{N-1} + I_B Z \quad (2)$$

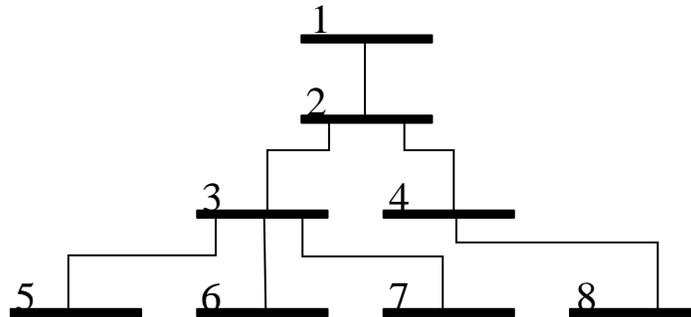
Para finalizar el proceso iterativo, se revisa el criterio de convergencia; sí no se cumple el criterio, el proceso iterativo seguirá; sí se llega a cumplir el criterio de convergencia, los resultados son almacenados y el algoritmo finaliza.

Ahora bien, el algoritmo de barrido Backward/Forward generalmente utiliza las leyes de Kirchhoff para dar solución al flujo de potencias de una red de distribución. Asimismo, distintos autores recomiendan realizar un ordenamiento de los nodos de la red, enumerando de forma descendente o ascendente los nodos pertenecientes a una misma capa, esto con el propósito de sistematizar el proceso iterativo del cálculo de las corrientes que fluyen por los conductores desde las corrientes inyectadas a los nodos.

La figura 3 ejemplifica la aplicación del ordenamiento nodal de una red eléctrica radial (Garcés Ruiz et al., 2004; Rupa & Ganesh, 2014). En esta se puede observar que los nodos están numerados de forma ascendente del 1 al 8, siguiendo una numeración de izquierda a derecha en cada capa. Esta técnica de ordenamiento nodal permite agilizar el cálculo de las tensiones de los nodos, iniciando con el nodo fuente (nodo 1).

**Figura 3.**

*Esquema ejemplo del ordenamiento nodal de una red eléctrica radial.*



Para este trabajo de investigación, el algoritmo tradicional de la estrategia de barrido Backward/Forward es adaptado para solucionar el flujo de potencia de una red de distribución con características como el desbalance y no linealidad en las cargas, distorsión armónica en la señal de tensión de alimentación y la integración de un sistema FV inyectando potencia. El modelo Norton equivalente es utilizado para representar el comportamiento no lineal de las cargas y del sistema FV.

Teniendo en cuenta lo anterior, dos enfoques de aplicación de la estrategia Backward/Forward son adaptadas a las condiciones descritas.

### ***2.1.1 Leyes de Kirchhoff***

La figura 4 describe el algoritmo Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff, donde las secciones encerradas en bloques de puntos hacen referencia a la adaptación del algoritmo a las condiciones de operación características de la red eléctrica del caso de estudio.

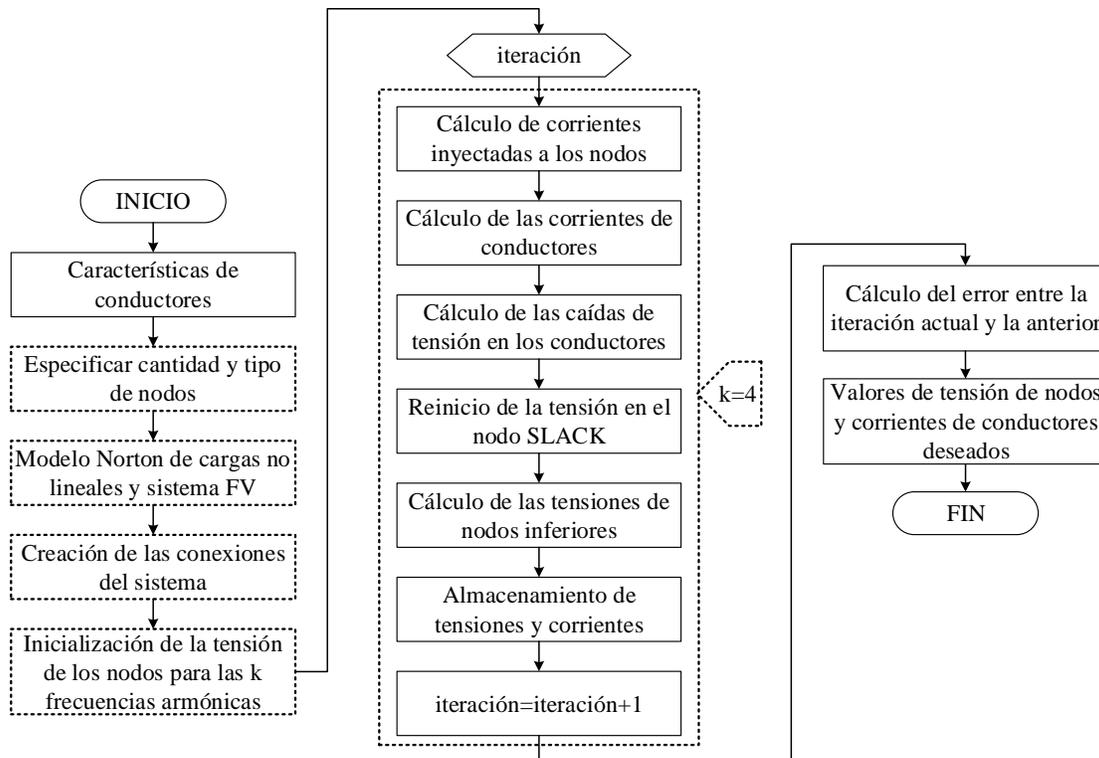
Las adaptaciones implementadas al algoritmo general son el uso del modelo Norton de matriz de admitancias acoplada (BF-NC) para modelar las cargas no lineales y el sistema FV, la inicialización de la tensión de los nodos para las  $k$  frecuencias armónicas de operación y los cálculos del proceso iterativo para cada frecuencia armónica  $k$ .

Cabe resaltar que, el tercer, quinto y séptimo orden armónico corresponden a las componentes armónicas impares seleccionadas para realizar el estudio debido a la representatividad que estas tienen en la señal de tensión del alimentador de la red eléctrica de la edificación. Por ello, el valor de  $k$  es 4 ( $k=1$  – frecuencia fundamental,  $k=2$  – componente de tercer orden armónico,  $k=3$  - componente de quinto orden armónico,  $k=4$  - componente de séptimo orden armónico).

Dentro del proceso iterativo de la estrategia es importante reiniciar la tensión en el nodo SLACK terminado el subproceso Backward, con el propósito de garantizar que los valores de tensión en el nodo SLACK no cambien, y lleguen a afectar el subproceso Forward. Este último depende del valor establecido en el nodo SLACK.

**Figura 4.**

*Algoritmo Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff.*



### 2.1.2 Aritmética de intervalos

La aritmética de intervalos es una técnica matemática que considera un set de intervalos para introducir incertidumbre en los datos (Moore et al., 2009; Pereira et al., 2012). En un sistema de potencia, las especificaciones de la demanda y la generación adquiridos mediante mediciones presentan una probabilidad de inexactitud (Das, 2006; Padilha-Feltrin et al., 2008; T. Srinivasa Rao & P. Mallikarajuna Rao, 2015; Z. Wang & Alvarado, 1992). Estas incertidumbres pueden deberse a errores de cálculo o mediciones de los parámetros del alimentador o errores en las

mediciones, cálculos o pronósticos de los valores de la demanda (Das, 2006; Z. Wang & Alvarado, 1992).

La técnica de aritmética de intervalos ha sido aplicada en los estudios de análisis de flujos de potencia para representar las incertidumbres mencionadas anteriormente. Considerando la aplicación de esta técnica, la solución obtenida es una ventana de observación en la cual puede hallarse el valor referente a la operación en estado estable del sistema de potencia (T. Srinivasa Rao & P. Mallikarajuna Rao, 2015).

Srinivasa y Mallikarajuna (T. Srinivasa Rao & P. Mallikarajuna Rao, 2015) proponen un algoritmo que introduce la aritmética de intervalos en el método tradicional de solución de flujos de potencia desacoplado rápido.

Pereira, da Costa y Rosa (Pereira et al., 2012) incorporan la aritmética de intervalos en el método de solución de flujos de potencia mediante inyección de corriente, dando una incertidumbre a los datos de entrada de las cargas y de los conductores.

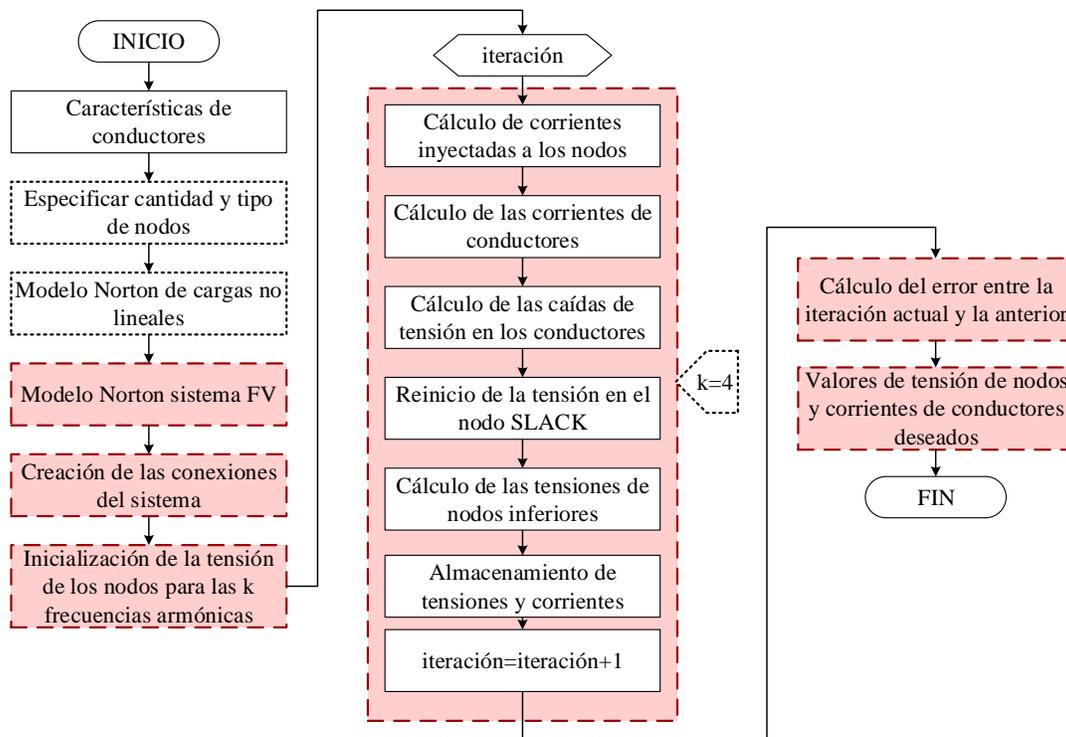
Gallego, Padilha-Feltrin y Lopez (Padilha-Feltrin et al., 2008) utilizan aritmética de intervalos para introducir incertidumbre en la demanda y generación de una red de distribución trifásica, alterando el algoritmo de Backward/Forward.

La integración de la técnica de aritmética de intervalos en las estrategias de barrido como Backward/Forward puede considerarse como el primer acercamiento a estudios que utilizan incertidumbres de variables como perfiles de tensión, perfiles de demanda de cargas o incluso intervalos de operación en los que puedan estar operando recursos energéticos distribuidos.

La figura 5 describe el algoritmo Backward/Forward basado en la técnica de aritmética de intervalos adaptado a las condiciones de operación características de la red en estudio. Las secciones resaltadas en color rojo señalan los procesos donde se adapta el algoritmo a la técnica.

Figura 5.

Algoritmo Backward/Forward basado en aritmética de Intervalos.



Una de las adaptaciones es delimitar el intervalo de operación del sistema FV, mediante valores mínimos y máximos de potencia generada para cada estado de irradiancia solar, estableciendo así los límites inferior y superior del intervalo de operación. De igual forma, se establece la condición inicial de la señal de tensión de alimentación, seleccionando los valores de tensión de los límites inferior y superior del intervalo de operación. De este modo, el proceso iterativo debe tener en cuenta los cálculos para los límites inferior y superior del intervalo de operación establecido.

Asimismo, el modelo de cargas que se emplea para representar las cargas de la red eléctrica de caso de estudio y el sistema FV es el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada (AI-NC).

Cabe resaltar que, al igual que el algoritmo Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff, en este método iterativo también se requiere el reinicio de la tensión en el nodo SLACK al terminar el subproceso Backward.

## 2.2 PowerFactory

PowerFactory (PF) es un software que sirve como herramienta de análisis de sistemas eléctricos de potencia destinados al estudio de sistemas de generación, transmisión, distribución e industriales (Ibrahim et al., 2021; Oskouei & Mohammadi-Ivatloo, 2020).

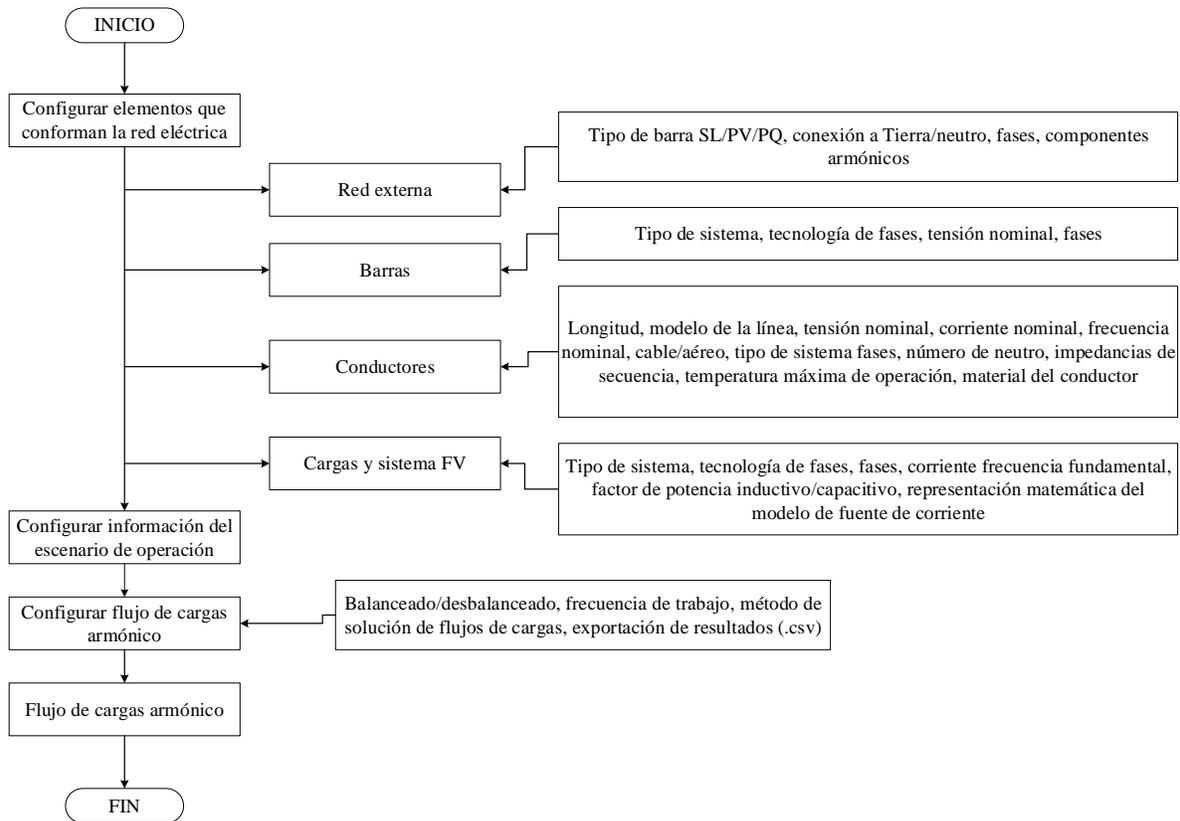
PowerFactory permite realizar análisis de flujos de potencia armónicos mediante el enfoque de penetración armónica no iterativa (Deng et al., 2021; Garcés Ruiz et al., 2004; Gárces Ruiz et al., 2005), suponiendo la división del proceso en dos etapas. La primera etapa comprende un flujo de potencia a frecuencia fundamental, y la segunda etapa comprende los flujos de potencia a las frecuencias armónicas.

El modelo de cargas utilizado para representar las cargas instaladas en la red eléctrica es dependiente de una combinación de parámetros eléctricos definidos en la frecuencia fundamental del sistema; en el caso de las cargas no lineales, el software utiliza el modelo de fuente de corriente (PF-FC), el cual no considera la interacción armónica entre las señales de tensión y corriente (Garcés Ruiz et al., 2004; Gárces Ruiz et al., 2005).

La figura 6 presenta el diagrama de flujos del procedimiento implementado en PowerFactory para simular la red eléctrica del caso de estudio. Se inicia configurando los elementos que conforman la red, en este caso una red externa, las barras, los conductores y las cargas.

**Figura 6.**

*Diagrama de flujo del procedimiento aplicado en PF.*



El lado de baja tensión del transformador de la edificación es representado en el modelo como una red externa. En este elemento se configuran las componentes armónicas de la señal de tensión de alimentación de la red eléctrica. Para el caso de estudio se configuran las componentes armónicas del orden 3<sup>er</sup>, 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup>.

La configuración de las barras o nodos de la red consiste en detallar el tipo de sistema, la tecnología de las fases, la tensión nominal y la fase. En el caso de los conductores, se debe especificar la longitud, el modelo de línea, la tensión nominal, el tipo de cable, el número de fases (monofásico, bifásico o trifásico), el dato de impedancias secuencia, entre otros aspectos.

El elemento de *General Load* se utiliza para modelar las cargas no lineales y el sistema FV instalados en la red eléctrica del caso de estudio. La configuración básica de la carga hace referencia al tipo de sistema, la tipología de fases (monofásico, bifásico o trifásico), la fase y el modelo de carga a utilizar, en este caso el modelo de fuente de corriente.

Por otro lado, dentro de la configuración de la carga en referente a la información requerida durante el flujo de potencia, se encuentra la especificidad de la corriente a frecuencia fundamental y el factor de potencia inductivo/capacitivo. Ahora bien, en la sección de *Calidad de la potencia/Armónicos* del bloque se configuran los valores del modelo de fuente de corriente.

Terminando el proceso de configuración de los elementos de la red eléctrica, se establecen las características del escenario de operación a estudiar. Luego, deben configurarse las características del flujo de cargas armónico, dentro de las cuales está si es balanceado o desbalanceado, la frecuencia de trabajo que software utiliza para mostrar los resultados en pantalla, el método de solución a aplicar y la configuración del archivo a descargar con los resultados de la simulación. Por último, se realiza el flujo de cargas armónico, teniendo en cuenta que PowerFactory primero realiza el flujo de potencia a frecuencia fundamental y luego realiza el flujo de potencia a las frecuencias armónicas. Al terminar este proceso, aparece un archivo .csv en la carpeta elegida como destino.

### **2.3 Estrategia Newton-Raphson**

Newton-Raphson es la estrategia de solución de flujos de potencia convencional generalmente utilizada para estudiar sistemas de transmisión, debido a que requiere menos iteraciones para encontrar una solución (D'Orto, 2021; D'Orto et al., 2021; Sereeter et al., 2017,

2019; Yang & Chen, 2018). No obstante, dentro de las estrategias convencionales, es la que mayor tiempo y gasto computacional genera (D'Orto, 2021).

La estrategia de solución de flujos de potencia tiene dos enfoques de trabajo dependientes de la formulación del problema; enfoque de potencia (D'Orto et al., 2021; Sereeter et al., 2017, 2019; Yang & Chen, 2018) y enfoque de corriente (Sereeter et al., 2017, 2019; Thongkrajay et al., 2006; Variz et al., 2009).

Ahora bien, para estudios de redes de distribución, Newton-Raphson presenta problemas de convergencia debido a las características especiales de este tipo de redes como su topología radial o enmallada, una alta tasa R/X, desbalance en las cargas, sistemas polifásicos y generación distribuida (Sereeter et al., 2017; Yang & Chen, 2018).

No obstante, se ha propuesto estudiar las redes de distribución con el enfoque de inyección de corrientes, modificando las ecuaciones de balance de potencias (Sereeter et al., 2017, 2019; Thongkrajay et al., 2006; Yang & Chen, 2018). Asimismo, la introducción de distorsión armónica ha sido propuesta en este tipo de enfoque, con el propósito de estudiar el comportamiento y la afectación de los dispositivos no lineales conectados a la red (Lin et al., 2004; Variz et al., 2000, 2009).

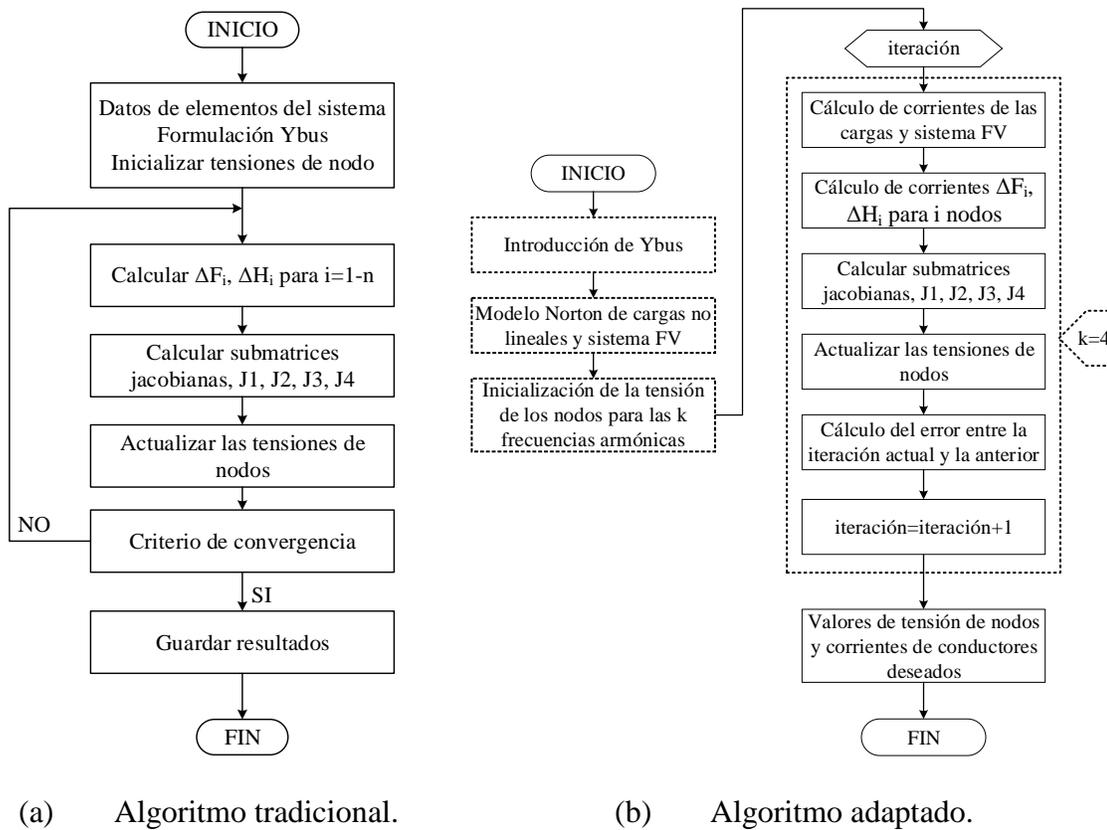
La Figura 7 describe el diagrama de flujo del algoritmo de la estrategia de solución de flujos de potencia Newton-Raphson con el enfoque de inyección de corrientes. La Figura 7(a) presenta el algoritmo tradicional a frecuencia fundamental de la estrategia de solución.

Por otro lado, la Figura 7(b) muestra las modificaciones al algoritmo de la estrategia de solución teniendo en cuenta las condiciones particulares de la red de caso de estudio. En este se indican los bloques que realizan adaptaciones como: plantear el algoritmo para un sistema trifásico, con desbalance en las cargas, considerar la distorsión armónica en la señal de tensión de

alimentación, y el uso del modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada para representar cargas no lineales y el sistema FV.

**Figura 7.**

*Algoritmo Newton-Raphson con enfoque de inyección de corriente*



## 2.4 Simulink

Simulink es una herramienta que permite solucionar flujos de potencia a partir del planteamiento y solución de modelos en espacios de estados. Uno de los métodos de solución utilizados son los fasores, en el cual la herramienta reemplaza el modelo en espacios de estados con una matriz de transferencia de números complejos  $H(j\omega)$ , relacionando entradas con salidas

(tensiones y corrientes) a una frecuencia especificada. Esta matriz definiría las ecuaciones algebraicas de la red eléctrica (MathWorks, n.d.).

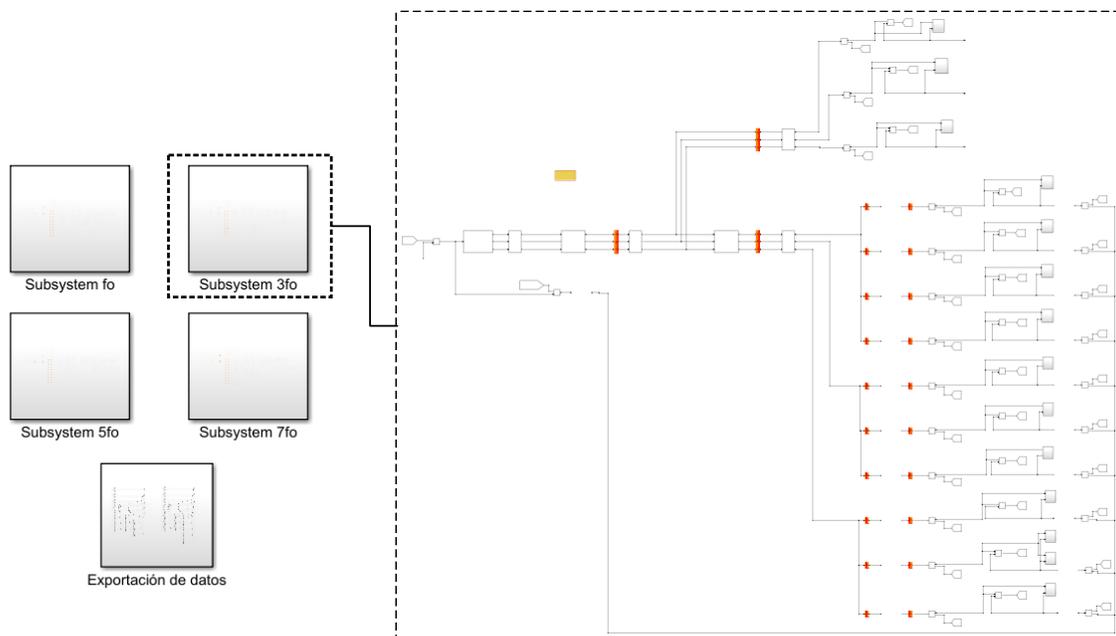
La red eléctrica del caso de estudio es modelada en la herramienta considerando el uso del modelo Norton de matriz de admitancias desacoplada (S-ND) para la representación de las cargas y del sistema FV.

El modelado tiene en cuenta las características propias de la red, al igual que las componentes armónicas más representativas ( $3^{\text{er}}$ ,  $5^{\text{o}}$  y  $7^{\text{o}}$ ) de la señal de tensión del alimentador de la red eléctrica del edificio. Para ello, la red es representada por cuatro subsistemas, uno por frecuencia, como lo muestra la figura 8.

Asimismo, hay un subsistema que contiene bloques de exportación de resultados de Simulink al Workspace de MATLAB, con el propósito de facilitar el tratamiento de los resultados.

### Figura 8.

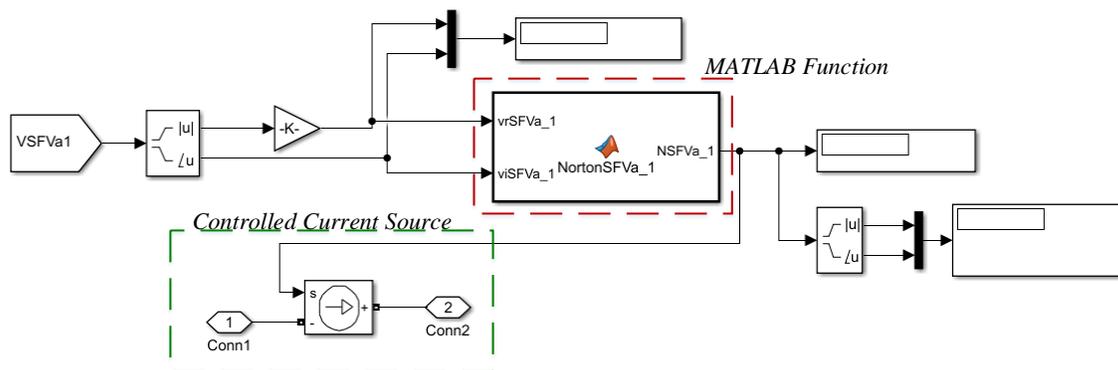
#### *Estructura general del modelo en Simulink*



El modelo Norton equivalente de matriz de admitancias desacoplada es implementado con los bloques *MATLAB Function* y *Controlled Current Source*, los cuales permiten programar el modelo y simular la inyección de corriente correspondiente a cada frecuencia armónica en cada subsistema, respectivamente. La figura 9 presenta la estructura empleada para representar las cargas no lineales y el sistema FV.

**Figura 9.**

*Estructura de bloques de cargas no lineales y del Sistema FV.*



## 2.5 Resumen de hallazgos del capítulo

En este trabajo de investigación son revisadas cinco estrategias de solución de flujos de potencia, dos basadas en métodos iterativos de barrido (Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff y Backward/Forward basado en aritmética de intervalos), una estrategia convencional con planteamiento de ecuaciones no lineales (Newton-Raphson), una herramienta computacional (Simulink) y un software comercial utilizado para el análisis de sistemas eléctricos (PowerFactory).

Las estrategias Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff y Backward/Forward basado en aritmética de intervalos emplean el modelo Norton equivalente de matriz de admitancia acoplada para representar las cargas no lineales y el sistema FV (BF-NC y AI-NC, respectivamente). El software PowerFactory emplea el modelo de fuente de corriente (PF-FC) con una dependencia de parámetros eléctricos (potencias o corriente) a la frecuencia fundamental de la red en estudio. La herramienta Simulink utiliza el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias desacoplada (S-ND) para esta representación. Por último, la estrategia convencional Newton-Raphson emplea el modelo Norton equivalente.

Como resultado de la revisión de las estrategias de solución de flujos de potencia, se puede notar la facilidad de algunas de estas de modificar sus planteamientos matemáticos con el propósito de adaptarlos a nuevas condiciones de operación como distintas topologías de cargas (trifásicas, bifásicas, monofásicas) y no linealidad de las mismas, distorsión armónica en la señales de tensión del alimentador de la red eléctrica, y la integración de un recurso de generación renovable como un sistema FV.

De igual forma, se puede resaltar que el ritmo de desarrollo de nuevos modelos de cargas no va de la mano con el desarrollo de herramientas computacionales que permitan implementar estos modelos de cargas para analizar sistemas eléctricos.

### 3. Modelado de la red eléctrica del piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica

El Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS) está ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Colombia, a 960 m.s.n.m. Durante el día, la temperatura del lugar tiende a estar entre 24 °C y 28 °C, mientras los niveles de irradiancia solar varían entre 2.0 kWh/m<sup>2</sup>día y 7.6 kWh/m<sup>2</sup>día, con valor promedio de 4.9 kWh/m<sup>2</sup>día (Osma-Pinto & Ordóñez-Plata, 2019a, 2019b).

La Figura 10 muestra la estructura de la edificación de cinco niveles, de los cuales tres conforman aulas de clase (pisos 2, 3 y 4), el último nivel comprende el área administrativa y en el primer piso hay aulas destinadas al estudio independiente, grupal y/o individual de los estudiantes de los programas de las ingenierías eléctrica y electrónica.

#### Figura 10.

*Edificio de Ingeniería Eléctrica*



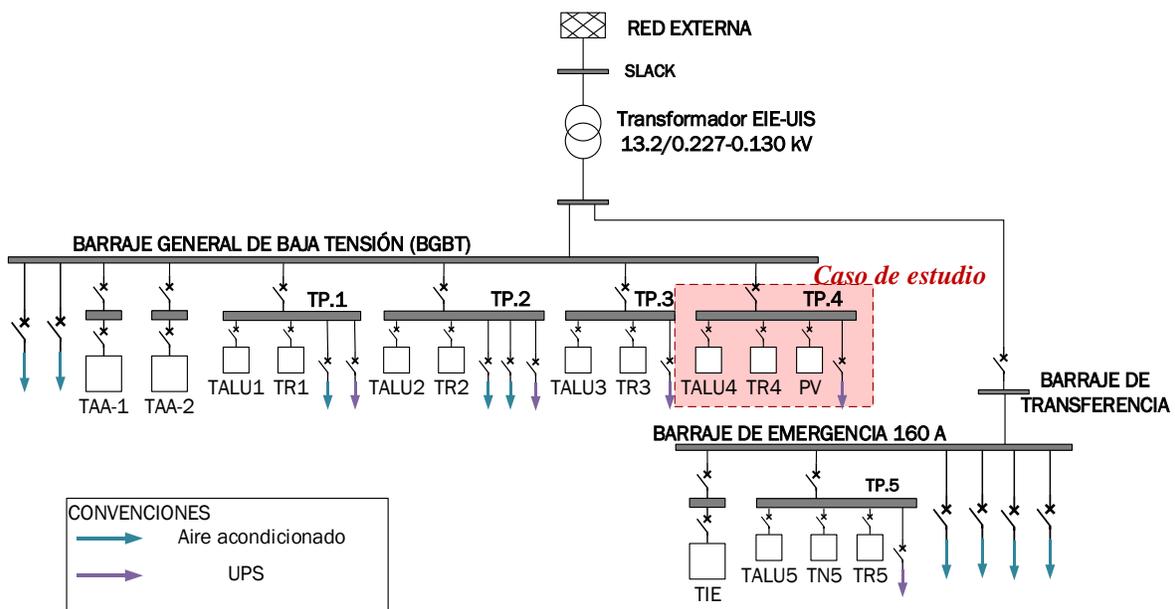
El edificio fue diseñado y construido teniendo en cuenta distintas estrategias de uso racional de la energía (URE), como iluminación y ventilación natural, cubierta verde ubicada en la terraza, sistema de automatización y sistema de generación FV, entre otros.

### 3.1 Red eléctrica de BT del piso 4

El diagrama unifilar de la red de BT de la edificación mostrado en la Figura 11 detalla los tableros de distribución de cada piso; asimismo, el tablero del Piso 4 de la edificación es resaltado en color rojo para señalar la ubicación del caso de estudio referente a este trabajo de investigación.

**Figura 11.**

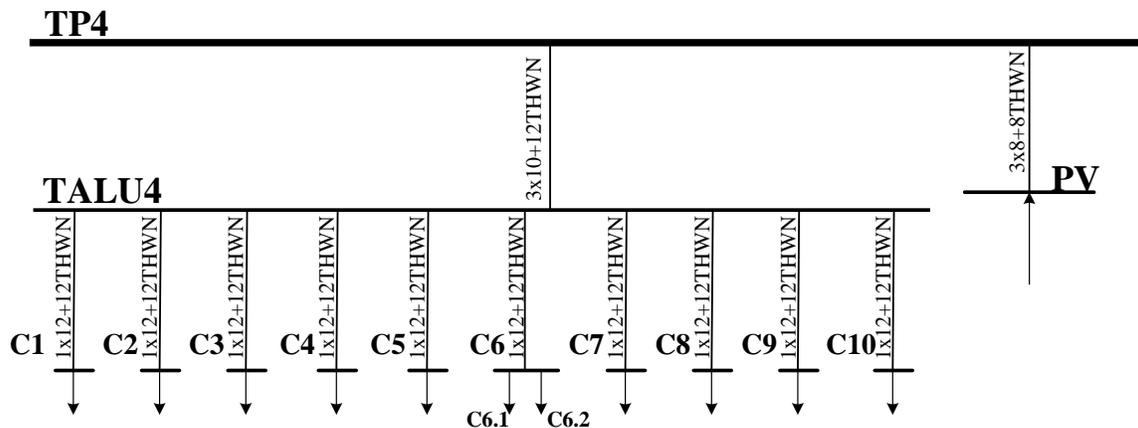
*Diagrama unifilar de la red de baja tensión de la edificación.*



La Figura 12 muestra el diagrama unifilar de la red del Piso 4 de la edificación, donde están instaladas: las cargas de iluminación, las cargas de ventilación y el punto de acople común (PCC) entre la red eléctrica de la edificación y el sistema FV.

Figura 12.

Diagrama unifilar de la red de baja tensión del Piso 4.



El tablero de distribución del piso 4 está dividido en tres sub-tableros: iluminación y ventilación **TALU4**, tomacorrientes disponibles en aulas de clase **TR4** y el punto de acople común **PV** entre la red eléctrica y el sistema FV.

El sub-tablero **TALU4** tiene 10 circuitos con luminarias dimerizables y extractores de aire instalados en aulas de clase, y luminarias On-Off instaladas en pasillos y baños. Por otro lado, el sistema FV conectado en **PV** tiene 4 unidades: un seguidor solar SS con un panel FV, la unidad SFV1 con 18 paneles, la unidad SFV2 con 18 paneles y, por último, la unidad SFV3 con 6 paneles. La tabla 4 relaciona las características generales de las cargas y el sistema FV.

**Tabla 4.**

*Características generales de las cargas y del Sistema FV*

Tipo de dispositivo	Potencia nominal	Tipo de control	Ubicación en la edificación	Circuit <sup>o</sup>	Fase	Número de dispositivo	Potencia total instalada	Características varias
Luminaria fluorescente On-Off 	68 W Monofásico	On-Off (Sensor de presencia)	Baños	C5	BN	3 luminarias	204 W	2 tubos T5 (28 W) y balasto electrónico
				C1	AN	10 luminarias	700 W	
Luminaria fluorescente dimerizable 	70 W Monofásico	Dimerizable (0 a 10 Vdc) (Sensores y sistema de automatización)	Aulas de clase	C2	BN	12 luminarias	840 W	4 tubos T8 (17 W) y balasto electrónico
				C3	CN	12 luminarias	840 W	
				C4	AN	12 luminarias	840 W	
				C6.1	CN	6 luminarias	420 W	
				C6.2	CN	3 extractores	198 W	
				C7	AN	3 extractores	198 W	
Extractor de aire TD 500/150-160 SILENT 	66 W Monofásico	-	Aulas de clase	C8	BN	3 extractores	198 W	Velocidad angular 2466 RPM
				C9	CN	3 extractores	198 W	
				C10	AN	3 extractores	198 W	
Sistema fotovoltaico 	CI							43 micro-inversores de tecnología MPPT
	Fase A de 4620 W							SFV1-18 Enphase M250
	Fase B de 4080 W		Terraza	PV	ABC-N	-	-	SFV2-18 Enphase M250
Fase C de 3255 W								SFV3-6 Enphase IQ7+
								SS-1 Enphase M250

### 3.2 Modelado de los elementos de la red eléctrica del Piso 4

La red eléctrica del Piso 4 está conformada por elementos como conductores, cargas no lineales y un sistema FV. De igual forma, la red es alimentada por medio de un barraje principal conectado directamente al lado de baja de un transformador.

El transformador tiene una capacidad de 630 kVA, 13,2 kV/220 V y conexión  $\Delta y n5$ . Este elemento es establecido como la fuente de alimentación de la red simulada, modelándose como un nodo de potencia infinita o nodo SLACK con una tensión de fase nominal de 127 V.

Elementos como conductores, cargas no lineales y el sistema FV son modelados teniendo en cuenta modelos en el dominio de la frecuencia, con el propósito de simular su comportamiento ante una señal de tensión de alimentación con componentes armónicas (Garcés Ruiz et al., 2004).

La tabla 5 describe las características generales de los conductores eléctricos de la red del Piso 4. Como se observa en la tabla, el tipo de conductor eléctrico de los circuitos es THWN con calibres específicos dependiendo cada circuito. Los valores de las impedancias de los conductores de fase y neutro están sujetas a las distancias de cada circuito.

Los conductores son representados mediante una impedancia RL serie dependiente de la frecuencia como lo indica la Ecuación (3), donde  $h$  indica el orden armónico de la frecuencia en estudio.

$$Z_h = R + j * hX_L \quad (3)$$

El valor  $h$  de las impedancias de fase y neutro presentadas en la tabla 5 es de 1, señalando de esta forma los valores de impedancia a frecuencia fundamental (60 Hz).

Tabla 5.

*Características de los conductores eléctricos.*

Circuito eléctrico	Fase	Calibre de conductor fase	Calibre de conductor neutro	Distancia [m]	Impedancia de fase	Impedancia de neutro
Transformador-TP4	ABC-N	#2 THWN	#4 THWN	24,3	0,0159+j0,0035	0,0247+j0,0038
TP4-TALU4	ABC-N	#10 THWN	#12 THWN	2,4	0,0094+j0,0003	0,0157+j0,0004
TP4-SFV	ABC-N	#8 THWN	#8 THWN	3,0	0,0076+j0,0005	0,0076+j0,0005
TALU4-C1	AN			43,0	0,2820+j0,0506	0,4373+j0,0081
TALU4-C2	BN			33,0	0,2164+j0,0384	0,3356+j0,0062
TALU4-C3	CN			22,0	0,1443+j0,0245	0,2237+j0,0041
TALU4-C4	AN			24,0	0,1574+j0,0268	0,2440+j0,0045
TALU4-C5	BN	#12 THWN	#12 THWN	10,0	0,0656+j0,0111	0,1017+j0,0019
TALU4-C6	CN			31,0	0,2033+j0,0346	0,3152+j0,0058
TALU4-C7	AN			18,0	0,1180+j0,0201	0,1830+j0,0034
TALU4-C8	BN			13,0	0,0852+j0,0145	0,1322+j0,0024
TALU4-C9	CN			25,0	0,1640+j0,0279	0,2542+j0,0047
TALU4-C10	AN			46,0	0,3017+j0,0513	0,4678+j0,0087

Por último, las cargas no lineales y el sistema FV fueron representadas en el dominio de la frecuencia con el modelo Norton equivalente con los enfoques de matriz de admitancia acoplada y matriz de admitancia desacoplada, como lo detallan las ecuaciones (4) y (5).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_3 \\ \vdots \\ \bar{I}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{ref\ 1} & \bar{Y}_{1,1} & \bar{Y}_{1,3} & \cdots & \bar{Y}_{1,K} \\ \bar{I}_{ref\ 3} & \bar{Y}_{3,1} & \bar{Y}_{3,3} & \cdots & \bar{Y}_{3,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{I}_{ref\ H} & \bar{Y}_{H,1} & \bar{Y}_{H,3} & \cdots & \bar{Y}_{H,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta\bar{V}_1 \\ \Delta\bar{V}_3 \\ \vdots \\ \Delta\bar{V}_K \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_3 \\ \vdots \\ \bar{I}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{ref\ 1} & \bar{Y}_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \bar{I}_{ref\ 3} & 0 & \bar{Y}_{3,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{I}_{ref\ H} & 0 & 0 & \cdots & \bar{Y}_{H,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta\bar{V}_1 \\ \Delta\bar{V}_3 \\ \vdots \\ \Delta\bar{V}_K \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $\bar{I}$  representa el vector de corriente del dispositivo,  $\bar{I}_{ref}$  es el vector columna de corriente de referencia, concatenado con la matriz de admitancias  $\bar{Y}$ , y  $\Delta\bar{V}$  es el vector de las variaciones de las señales de tensión. Las dimensiones del modelo  $H$  y  $K$  indican el orden de la

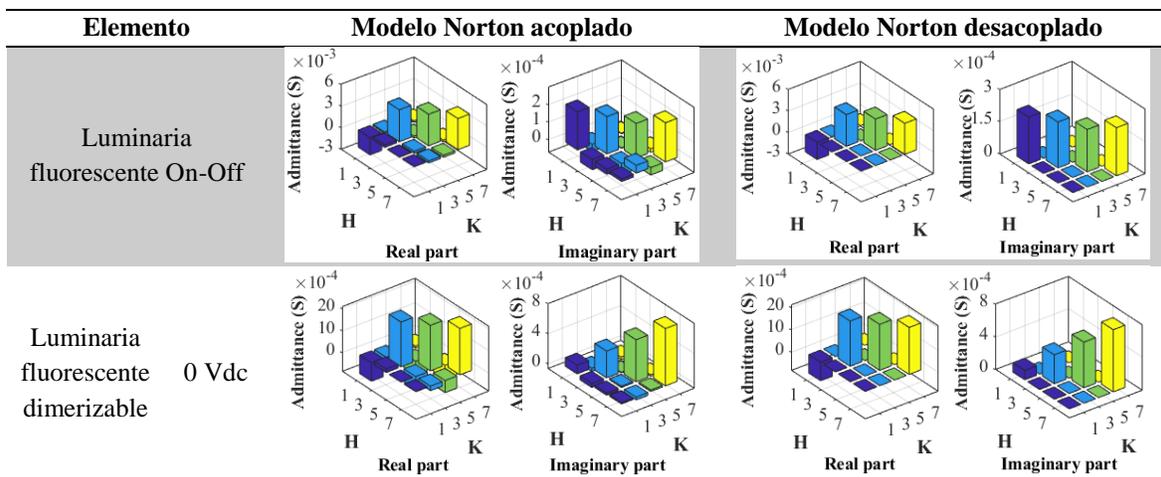
componente armónica impar más alta utilizada para las señales de corriente y tensión, respectivamente.

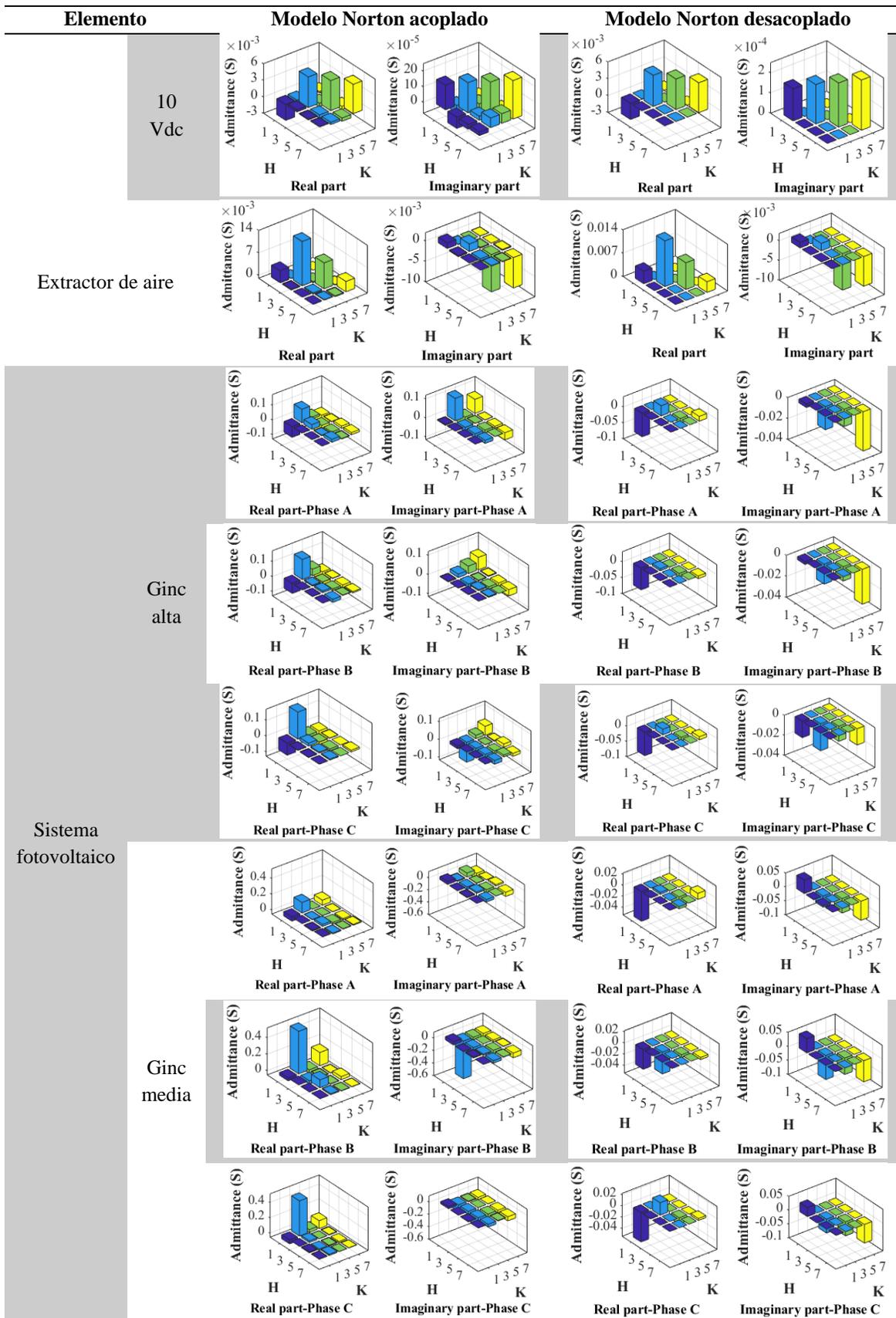
La tabla 6 presenta el modelo Norton equivalente para los enfoques de matriz de admitancias acoplada y desacoplada de cada elemento no lineal de la red del Piso 4. En el caso de las cargas monofásicas, el modelo se ilustra gráficamente por la parte real y parte imaginaria de la matriz de admitancias, para cada condición de operación propia de la carga. En un componente trifásico, cada condición de operación de éste es ilustrado gráficamente por seis figuras que representan la parte real e imaginaria de la matriz de admitancias de cada fase.

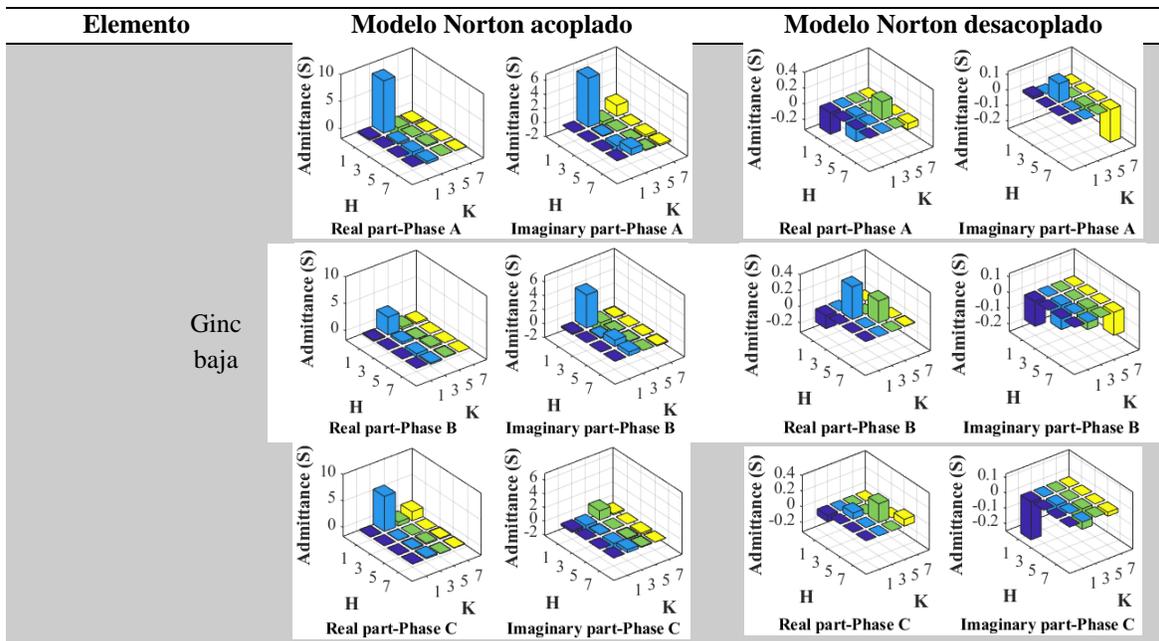
Las luminarias de tipo On-Off y los extractores de aire tienen una única condición de operación, mientras las luminarias dimerizables tienen dos estados de operación dependientes del nivel de dimerización (0 Vdc y 10 Vdc) y, por último, el sistema FV tiene tres condiciones de operación según los niveles de irradiancia solar (Ginc alta - GincA, Ginc media - GincM y Ginc baja - GincB) (Martínez-Penalzoa et al., 2019; Martínez-Peñaloza et al., 2020; Martínez-Peñaloza & Osma-Pinto, 2021).

**Tabla 6.**

*Modelos Norton equivalentes de cada elemento.*







*Nota:* La adquisición de los modelos Norton equivalente de las luminarias y el sistema FV pueden ser revisados a detalle en las siguientes publicaciones:

Luminarias: A. Martínez-Peñaloza, L. Carrillo-Sandoval, G. Malagón-Carvajal, C. Duarte-Gualdrón, and G. Osma-Pinto, "Determination of parameters and performance analysis of load models for fluorescent recessed lightings before power supply signal," *DYNA*, vol. 87, no. 215, pp. 163–173, 2020.

Sistema FV: A. Martínez-Peñaloza and G. Osma-Pinto, "Analysis of the performance of the Norton equivalent model of a photovoltaic system under different operating scenarios," *Int. Rev. Electr. Eng. - IREE*, vol. 16, no. 4, 2021.

### 3.3 Escenarios de operación

Teniendo en cuenta las condiciones de operación de cada elemento de la red eléctrica del Piso 4 y la cantidad de dispositivos que hay en cada uno de los circuitos del sub-tablero **TALU4** (Número de dispositivos de la tabla 4), son planteados escenarios que consideren la operación simultánea de cargas en dos niveles correspondientes a la cantidad mínima y máxima de dispositivos funcionando por circuito (Min y Max).

La tabla 7 describe los 23 escenarios de operación seleccionados de la red eléctrica del Piso 4. Cabe resaltar que, para las luminarias dimerizables la operación varía entre los niveles de 0 Vdc y 10 Vdc, para las luminarias On-Off y los extractores la operación es siempre de encendido, y en el caso del sistema FV, la operación varía en tres niveles de irradiancia solar, alta – GincA, media – GincM y baja – GincB, y un estado de desconexión, No-SFV.

**Tabla 7.***Escenarios de operación.*

Escenario	Luminarias On-Off		Luminarias dimerizables				Extractores		Sistema FV			
	Min	Max	Min	Max			Min	Max	GincA	GincM	GincB	No-SFV
			0 Vdc	10 Vdc	0 Vdc	10 Vdc						
E1	✓		✓						✓			
E2	✓			✓							✓	
E3		✓			✓				✓			
E4		✓				✓					✓	
E5		✓				✓						✓
E6							✓				✓	
E7							✓			✓		
E8							✓		✓			
E9								✓			✓	
E10								✓		✓		
E11								✓				
E12								✓				
E13									✓			
E14											✓	
E15	✓		✓				✓		✓			
E16	✓			✓			✓				✓	
E17		✓			✓		✓		✓			
E18		✓				✓	✓				✓	
E19	✓		✓					✓	✓			
E20	✓			✓				✓			✓	
E21		✓			✓			✓	✓			
E22		✓				✓		✓			✓	
E23		✓				✓		✓				✓

#### **4. Comparación de los resultados de los parámetros con las estrategias de estimación implementadas**

Este capítulo expone una comparación entre los resultados obtenidos de diversos parámetros del sistema eléctrico con cada una de las estrategias de estimación de flujos de potencia descritas previamente (Backward/Forward con leyes de Kirchhoff, BF-NC, Backward/Forward con aritmética de intervalos, AI-NC, PowerFactory, PF-FC, Simulink, S-ND). Inicialmente, se presentan los indicadores y métricas utilizados para evaluar el desempeño de las estrategias de solución de flujos de cargas (Sección 4.1). Los resultados son comparados en cuatro aspectos: formas de onda (Sección 4.2), valores eficaces (RMS) (Sección 4.3), parámetros de potencia (Sección 4.4) y parámetros de calidad de la potencia eléctrica (Sección 4.5). Finalmente, se exponen los inconvenientes encontrados en la aplicación de la estrategia Newton-Raphson con inyección de corrientes (Sección 4.6).

##### **4.1 Indicadores y métricas para la evaluación de desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencia**

Los indicadores empleados en la comparación de las formas de onda de las señales de tensión y corriente estimadas por las estrategias de solución son métricas que comparan señales observadas de señales estimadas (Hussain et al., 2021; Khan et al., 2022; Martínez-Penaloza et al., 2019; Martínez-Penaloza et al., 2020; Martínez-Penaloza & Osma-Pinto, 2021; Moreno Jaramillo et al., 2021). En este trabajo de investigación, se tomó como señal observada, los resultados

estimados por la estrategia Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff, la cual emplea el modelo Norton de matriz de admitancia acoplada (BF-NC).

La tabla 8 describe los indicadores empleados en la evaluación del desempeño de las estrategias de solución en términos de la estimación de las formas de onda de las señales de tensión y corriente. Asimismo, muestra la ecuación empleada y la interpretación que se debe tener en cuenta.

**Tabla 8.**

*Indicadores para evaluación de desempeño de estrategias en términos de las formas de onda*

Indicador	Ecuación	Interpretación
Raíz del error medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}$	$RMSE = 0$ ; Modelo perfecto $RMSE \gg 0$ ; Modelo imperfecto
Raíz del error medio cuadrático normalizado	$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} * 100$	$NRMSE = 0\%$ ; Modelo perfecto $NRMSE \gg 0\%$ ; Modelo imperfecto
Error medio cuadrático	$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}$	$MSE = 0$ ; Modelo perfecto $MSE \gg 0$ ; Modelo imperfecto
Error medio absoluto	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N  y_i - x_i }{N}$	$MAE = 0$ ; Modelo perfecto $MAE \gg 0$ ; Modelo imperfecto

La tabla 9 presenta los indicadores que se utilizan para evaluar el desempeño de las estrategias en términos de comparar los valores eficaces de las señales de tensión y corriente, los parámetros de potencia y los parámetros de calidad de la potencia eléctrica. En este caso, se emplea el error relativo para evaluar el desempeño de las estrategias PowerFactory (PF-FC) y Simulink (S-ND), y el error absoluto para evaluar el desempeño de la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos (AI-NC). Los resultados estimados de la estrategia Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff son tomados como el  $Valor_{real}$  especificado en las respectivas ecuaciones del indicador.

**Tabla 9.**

*Indicadores para evaluación de desempeño de estrategias en términos de valores eficaces, parámetros de potencia y parámetros de calidad de la potencia eléctrica*

Indicador	Ecuación	Interpretación
Error relativo	$E\% = \frac{ Valor_{real} - Valor_{aproximado} }{Valor_{real}} * 100$	$E\% = 0\%$ ; Modelo perfecto $E\% \gg 0\%$ ; Modelo imperfecto
Error absoluto	$E =  Valor_{real} - Valor_{aproximado} $	$E = 0$ ; Modelo perfecto $E \gg 0$ ; Modelo imperfecto

Ahora bien, el desempeño de las estrategias es medido con una métrica de error planteada en este trabajo de investigación, como puede observarse en la tabla 10, la cual toma en cuenta el valor de error máximo dentro de los errores encontrados en cada nodo o conductor. Una vez que el valor de error máximo es establecido, se procede a revisar la métrica. Cada rango de error establecido en la métrica corresponde a un calificador de desempeño y su representación.

**Tabla 10.**

*Métrica de error para evaluación de desempeño de estrategias de solución de flujos de potencia*

Métrica de error	Calificador de desempeño	Representación
Error<0,1	Excelente	✓✓✓✓✓
0,1<Error<0,9	Adecuado	✓✓✓✓
1<Error<5	Aceptable	✓✓✓
6<Error<10	Regular	✓✓
10<Error	Inadecuado	✓

La tabla 10 describe que para errores menores a 0,1 el calificador de desempeño es excelente y se representa con ✓✓✓✓✓; valores de error entre 0,1 y 0,9 el calificador de desempeño es adecuado y su representación es ✓✓✓✓; errores entre valores de 1 y 5 el calificativo es aceptable y se representa con ✓✓✓; errores con valores entre 6 y 10 el calificador de desempeño

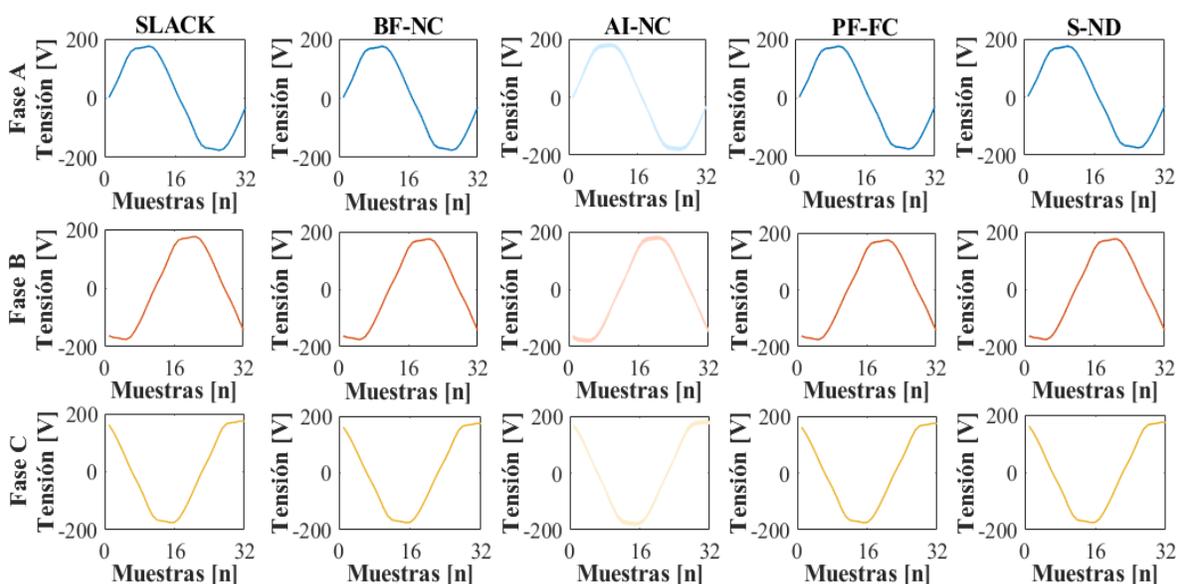
es regular y su representación es ✓✓; por último, para valores de error mayores a 10 el calificativo del desempeño es inadecuado y se representa con ✓.

## 4.2 Comparación de las formas de onda

La figura 13 presenta las formas de onda de las señales de tensión en el nodo SLACK y aquellas señales estimadas por las estrategias seleccionadas (BF-NC, AI-NC, PF-FC y S-ND) en los nodos de la red eléctrica tomada como caso de estudio para los 23 escenarios de operación. Las formas de onda estimadas presentan un comportamiento predominante a la forma de onda Flat-top al igual que la establecida en el nodo SLACK. Generalmente este tipo de forma de onda es encontrada en redes eléctricas de baja tensión del sector comercial (Blanco et al., 2018), donde prevalece el armónico de 5º orden sobre el orden 3º y 7º.

**Figura 13.**

*Formas de onda de las señales de tensión en los nodos de la red eléctrica del Piso 4.*



Por otro lado, las tablas 11 y 12 exponen los errores de formas de onda RMSE, NRMSE, MSE y MAE de las señales de tensión. La referencia de comparación de las estrategias son los resultados obtenidos por Backward/Forward aplicando el modelo Norton de matriz de admitancia acoplada (BF-NC), debido al desempeño sobresaliente en representar el comportamiento de cargas no lineales (Caicedo et al., 2017; Guo et al., 2019; Martínez-Penaloza et al., 2019; Martínez-Penaloza & Osma-Pinto, 2021; Muller et al., 2018; Tavukcu et al., 2019; Xu et al., 2018).

Las estrategias S-ND y PF-FC tienen un desempeño adecuado y excelente en la estimación de la forma de onda de la señal de tensión en escenarios de operación con nivel de irradiancia solar alta y media, presentando valores de error RMSE, NRMSE, MSE y MAE menores a 0,6 V, 0,2%, 0,3 V<sup>2</sup> y 0,5 V, respectivamente.

No obstante, los errores máximos obtenidos por la estrategia AI-NC son considerados aceptables, regulares y/o inadecuados. Se observa en las tablas 11 y 12 que los valores de error considerablemente altos son calculados para el límite superior del intervalo de operación (AI-NC superior), en comparación con los errores máximos obtenidos para el límite inferior del intervalo (AI-NC inferior).

**Tabla 11.**

*Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de tensión RMSE y NRMSE.*

Estrategia	Nodo	RMSE [V]				NRMSE [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
S-ND	TP4	<0,12	<0,08	<0,18	<0,07	<0,04	<0,02	<0,05	<0,02
	TALU4	<0,11	<0,08	<0,19	<0,08	<0,04	<0,02	<0,05	<0,02
	SFV	<0,12	<0,08	<0,18	-	<0,04	<0,02	<0,05	-
	Iluminación	<0,6	-	<1,8	<1,8	<0,2	-	<0,3	<0,5

Estrategia	Nodo	RMSE [V]				NRMSE [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
PF-FC	Extractores	<0,6	<0,5	<1	<1	<0,2	<0,1	<0,3	<0,3
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	<b>0,18</b>	<b>0,13</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,05</b>	<b>0,04</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
	TP4	<0,08	<0,04	<0,18	<0,18	<0,02	<0,01	<0,05	<0,05
	TALU4	<0,13	<0,07	<0,3	<0,3	<0,04	<0,02	<0,08	<0,08
	SFV	<0,08	<0,04	<0,18	-	<0,02	<0,01	<0,05	-
	Iluminación	<0,18	-	<0,5	<0,5	<0,05	-	<0,2	<0,2
	Extractores	<0,16	<0,13	<0,3	<0,3	<0,05	<0,04	<0,09	<0,09
	Desempeño	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>6,57</b>	<b>7</b>	<b>7,6</b>	<b>6,9</b>	<b>1,9</b>	<b>2</b>	<b>2,2</b>	<b>2</b>
AI-NC superior	TP4	<6,55	<7	<7,5	<6,9	<1,9	<2	<2,2	<2
	TALU4	<6,54	<7	<7,5	<6,9	<1,9	<2	<2,2	<2
	SFV	<6,55	<7	<7,5	-	<1,9	<2	<2,2	-
	Iluminación	<6,57	-	<7,6	<6,9	<1,9	-	<2,2	<2
	Extractores	<6,54	<7	<7,6	<6,9	<1,9	<2	<2,2	<2
	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓
AI-NC inferior	Error máximo	<b>1,5</b>	<b>1,3</b>	<b>1,2</b>	<b>4,9</b>	<b>0,43</b>	<b>0,36</b>	<b>0,34</b>	<b>1,4</b>
	TP4	<1,5	<1,3	<1,2	<4,9	<0,43	<0,36	<0,34	<1,4
	TALU4	<1,5	<1,3	<1,2	<4,9	<0,43	<0,36	<0,34	<1,4
	SFV	<1,5	<1,3	<1,2	-	<0,43	<0,36	<0,34	-
	Iluminación	<1,5	-	<1,2	<4,9	<0,43	-	<0,34	<1,4
	Extractores	<1,5	<1,3	<1,2	<4,9	<0,43	<0,36	<0,34	<1,4

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

Una causa de los valores altos de errores máximos presentados en el límite superior del intervalo de operación de la estrategia AI-NC es la diferencia que existe entre el punto de operación de condición inicial elegido para BF-NC y el intervalo de tensión de operación establecido como condición inicial del algoritmo AI-NC. Como se puede apreciar, el punto de operación elegido se encuentra más cercano al límite inferior del intervalo.

Por tanto, el desempeño de la estrategia de solución AI-NC en estimar las formas de onda de las señales de tensión depende del punto de operación con el cual se realice la comparación.

Tabla 12.

Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de tensión MSE y MAE.

Estrategia	Nodo	MSE [V <sup>2</sup> ]				MAE [V]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
S-ND	TP4	<0,01	<0,006	<0,03	<0,004	<0,1	<0,07	<0,2	<0,06
	TALU4	<0,01	<0,006	<0,03	<0,006	<0,2	<0,06	<0,2	<0,07
	SFV	<0,01	<0,006	<0,03	-	<0,1	<0,07	<0,2	-
	Iluminación	<0,4	-	<3	<3	<0,5	-	<1,4	<1,3
	Extractores	<0,3	<0,2	<0,3	<1	<0,5	<0,4	<0,8	<0,9
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
PF-FC	Error máximo	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
	TP4	<0,007	0,002	<0,03	<0,03	<0,07	<0,03	<0,2	<0,2
	TALU4	<0,02	0,004	<0,08	<0,08	<0,1	<0,05	<0,3	<0,3
	SFV	<0,007	0,002	<0,03	-	<0,07	<0,03	<0,2	-
	Iluminación	<0,03	-	<0,2	<0,2	<0,1	-	<0,4	<0,4
	Extractores	<0,02	<0,02	<0,09	<0,09	<0,1	<0,1	<0,3	<0,3
AI-NC superior	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
	Error máximo	<b>43</b>	<b>49</b>	<b>58</b>	<b>47</b>	<b>5,7</b>	<b>6,3</b>	<b>6,7</b>	<b>6,1</b>
	TP4	<43	<49	<57	<47	<5,7	<6,3	<6,7	<6,1
	TALU4	<43	<49	<57	<47	<5,7	<6,3	<6,7	<6,1
	SFV	<43	<49	<57	-	<5,7	<6,3	<6,7	-
	Iluminación	<43	-	<58	<47	<5,7	-	<6,7	<6,1
	Extractores	<43	<49	<58	<47	<5,7	<6,3	<6,7	<6,1
AI-NC inferior	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>2,2</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>24</b>	<b>1,3</b>	<b>1,1</b>	<b>1</b>	<b>3,9</b>
	TP4	<2,2	<1,6	<1,4	<24	<1,3	<1,1	<1	<3,9
	TALU4	<2,2	<1,6	<1,4	<24	<1,3	<1,1	<1	<3,9
	SFV	<2,2	<1,6	<1,4	-	<1,3	<1,1	<1	-
	Iluminación	<2,2	-	<1,4	<24	<1,3	-	<1	<3,9
Extractores	<2,2	<1,6	<1,4	<24	<1,3	<1,1	<1	<3,9	

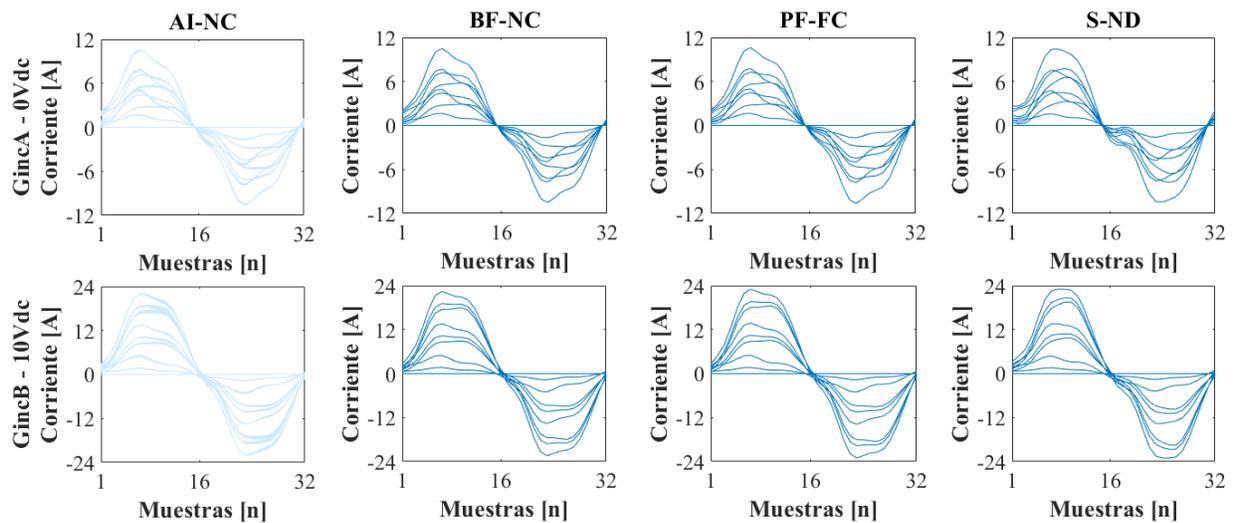
Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

En términos de formas de onda de las señales de corriente, las figuras 14 y 15 muestran las señales de corriente en los conductores TP4-TALU4 y TP4-PV, para la Fase A. La figura 14 describe las formas de onda de corriente del tablero de iluminación TALU4, teniendo en cuenta la relación que existe entre el nivel de dimerización de las luminarias y la irradiancia solar.

En el caso de las señales de corriente en los escenarios donde se opera a niveles de alta irradiancia solar y las luminarias dimerizables funcionan en el mínimo nivel de dimerización (0 Vdc), la amplitud máxima alcanzada es de 10,7 A. Contrario es el caso de los escenarios de operación de baja irradiancia solar y operación de luminarias dimerizables al máximo nivel de dimerización (10 Vdc), donde la amplitud máxima es de 23 A.

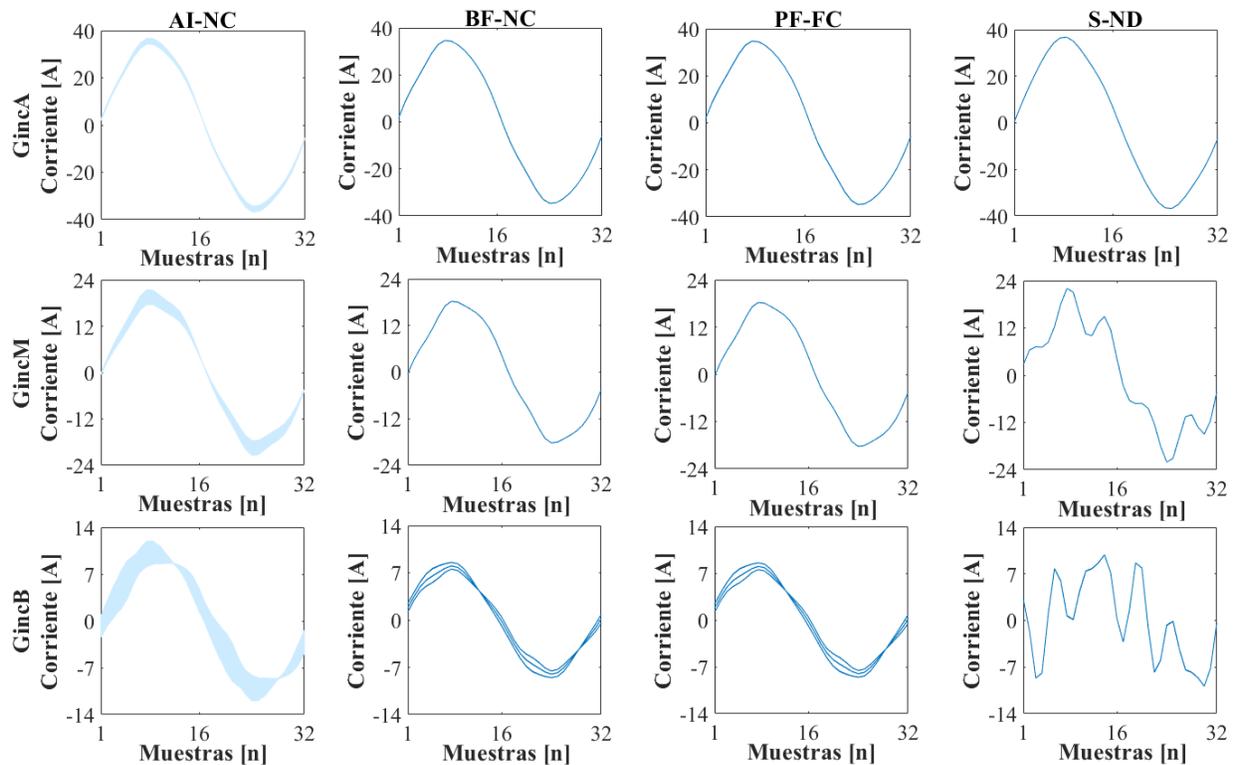
**Figura 14.**

*Formas de onda de corriente conductor TP4-TALU4 en la fase A.*



**Figura 15.**

Formas de onda de las corrientes de los conductores TP4-PV en la fase A.



De igual forma, en la figura 14 se observan diferencias entre las formas de onda de las señales de corriente para los dos tipos de escenarios de operación, esto debido a los niveles de distorsión armónica que las luminarias dimerizables presentan en sus dos estados de dimerización (0 Vdc y 10 Vdc), el  $THDi$  en el mínimo estado de dimerización (0 Vdc) es menor al  $THDi$  en el máximo estado de dimerización (10 Vdc) (Martínez-Peñaloza et al., 2020).

Las tablas 13 y 14 presentan los desempeños de las estrategias de solución en términos de los errores de formas de onda de las señales de corriente. En general, se puede apreciar en las tablas que el desempeño en estimación de las señales de corriente de la estrategia S-ND esta entre regular e inadecuado en condiciones de operación de media y baja irradiancia solar, respectivamente (Regular-  $6 < \text{Error} < 10$ , Inadecuado-  $10 < \text{Error}$ ). Contrario sucede en las condiciones de operación

de alta irradiancia solar y cuando el sistema FV no está operando, donde el desempeño de la estrategia es aceptable ( $1 < \text{Error} < 5$ ).

**Tabla 13.**

*Desempeño las estrategias en términos de los errores de forma de onda de corriente RMSE y*

*NRMSE*

Estrategia	Ramal	RMSE [A]				NRMSE [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>1,6</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>1,3</b>	<b>4,8</b>	<b>8,3</b>	<b>41</b>	<b>3,2</b>
	SLACK-TP4	<1,6	<3	<7	<1,3	<2,3	<8,3	<41	<3,2
	TP4-TALU4	<0,8	<0,2	<1,2	<1,3	<4,7	<2,3	<3,3	<3,2
	TP4-PV	<1,4	<3	<7	-	<2,3	<8,3	<41	-
	Iluminación	<1,2	-	<0,7	<0,6	<4,8	-	<3,3	<3,2
	Extractores	<0,2	<0,1	<0,2	<0,4	<2,4	<2,3	<2,2	<2,5
S-ND	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>
	SLACK-TP4	<0,2	<0,05	<0,5	<0,5	<0,2	<0,2	<0,8	<1,1
	TP4-TALU4	<0,08	<0,03	<0,5	<0,5	<0,4	<0,3	<1,1	<1,1
	TP4-PV	<0,1	<0,03	<0,02	-	<0,2	<0,08	<0,2	-
	Iluminación	<0,03	-	<0,3	<0,2	<0,5	-	<1,4	<1,6
	Extractores	<0,02	<1,6	<0,04	<0,02	<0,5	<0,3	<1	<0,8
	AI-NC superior	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓
Error máximo	<b>1,7</b>	<b>2,7</b>	<b>4</b>	<b>0,6</b>	<b>2,3</b>	<b>8,8</b>	<b>22</b>	<b>2,8</b>	
SLACK-TP4	<1,7	<2,7	<4	<0,6	<2,2	<8,8	<22	<1,5	
TP4-TALU4	<0,2	<0,2	<0,7	<0,6	<2,2	<2	<2,4	<1,5	
TP4-PV	<1,5	<2,4	<4	-	<2,2	<8,8	<24	-	
Iluminación	<1,5	-	<0,4	<0,3	<1,2	-	<1,9	<1,5	
Extractores	<0,1	<0,2	<0,2	<0,2	<2,3	<2,2	<2,9	<2,8	
AI-NC inferior	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓
Error máximo	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>3,4</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1,8</b>	<b>21</b>	<b>2,2</b>	

Estrategia	Ramal	RMSE [A]				NRMSE [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
	SLACK-TP4	<0,6	<0,6	<3,3	<0,5	<1	<1,8	<21	<1,3
	TP4-TALU4	<0,2	<0,08	<0,3	<0,5	<0,9	<0,9	<0,8	<1,3
	TP4-PV	<0,6	<0,6	<3,4	-	<1	<1,8	<21	-
	Iluminación	<0,04	-	<0,07	<0,3	<0,7	-	<0,8	<1,3
	Extractores	<0,02	<0,2	<0,05	<0,2	<0,9	<0,9	<1,1	<2,2

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

Ahora bien, el desempeño general de la estrategia PF-FC en la estimación la señal de corriente es adecuado para la mayoría de las condiciones de operación de alta, media, baja irradiancia solar, y sin sistema FV. Los máximos errores de forma de onda presentados son 1,6 A (RMSE), 1,6% (NRMSE), 0,2 A<sup>2</sup> (MSE) y 0,4 A (MAE).

Por otro lado, en las tablas 13 y 14 se puede observar que el desempeño de la estrategia AI-NC en la estimación de las formas de onda de la señal de corriente presenta un comportamiento similar al desempeño de estimación de las formas de onda de las señales de tensión (tablas 11 y 12). Los errores de forma de onda para las condiciones de operación en el límite del intervalo superior (AI-NC superior) son mayores comparados con los errores en el límite inferior del intervalo (AI-NC inferior), destacando que, para la condición de baja irradiancia solar, la estrategia tiene un desempeño inadecuado (10<Error).

**Tabla 14.**

*Desempeño de las estrategias en términos de los errores de forma de onda de corriente MSE y MAE*

Estrategia	Ramal	MSE [A <sup>2</sup> ]				MAE [A]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
S-ND	Desempeño	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓

Estrategia	Ramal	MSE [A <sup>2</sup> ]				MAE [A]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
	Error máximo	<b>2,5</b>	<b>9,2</b>	<b>51</b>	<b>1,7</b>	<b>1,2</b>	<b>2,6</b>	<b>5,6</b>	<b>1,2</b>
	SLACK-TP4	<2,5	<9,2	<51	<1,7	<1,2	<2,6	<5,4	<1,2
	TP4-TALU4	<0,6	<0,05	<1,7	<1,7	<0,7	<0,2	<1,2	<1,2
	TP4-PV	<1,8	<9,2	<50	-	<1,2	<2,6	<5,6	-
	Iluminación	<0,09	-	<0,4	<0,4	<0,3	-	<0,6	<0,6
	Extractores	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
PF-FC	Error máximo	<b>0,03</b>	<b>0,002</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,05</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
	SLACK-TP4	<0,03	<0,002	<0,2	<0,2	<0,2	<0,05	<0,4	<0,4
	TP4-TALU4	<0,006	<0,001	<0,2	<0,2	<0,07	<0,03	<0,4	<0,4
	TP4-PV	<0,008	<0,002	<0,001	-	<0,09	<0,03	<0,03	-
	Iluminación	<0,001	-	<0,07	<0,07	<0,03	-	<0,2	<0,2
	Extractores	<0,001	<3,0e-4	<0,001	<3,0e-4	<0,02	<0,02	<0,04	<0,04
	Desempeño	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓✓
AI-NC superior	Error máximo	<b>2,3</b>	<b>7</b>	<b>17</b>	<b>0,4</b>	<b>1,6</b>	<b>2,4</b>	<b>3,6</b>	<b>0,5</b>
	SLACK-TP4	<3	<7	<17	<0,4	<1,6	<2,4	<3,6	<0,5
	TP4-TALU4	<0,04	<0,05	<0,5	<0,4	<0,2	<0,2	<0,6	<0,5
	TP4-PV	<2,3	<6,2	<17	-	<1,4	<2,3	<3,6	-
	Iluminación	<0,01	-	<0,2	<0,1	<0,09	-	<0,4	<0,3
	Extractores	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓✓
AI-NC inferior	Error máximo	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>12</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>3</b>	<b>0,4</b>
	SLACK-TP4	<0,4	<0,3	<11	<0,3	<0,5	<0,5	<3	<0,4
	TP4-TALU4	<0,02	<0,006	<0,07	<0,3	<0,09	<0,06	<0,3	<0,4
	TP4-PV	<0,4	<0,3	<12	-	<0,6	<0,5	<3	-
	Iluminación	<0,002	-	<0,03	<0,06	<0,04	-	<0,2	<0,2
	Extractores	<0,002	<0,001	<0,005	<0,01	<0,03	<0,03	<0,1	<0,1
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓✓

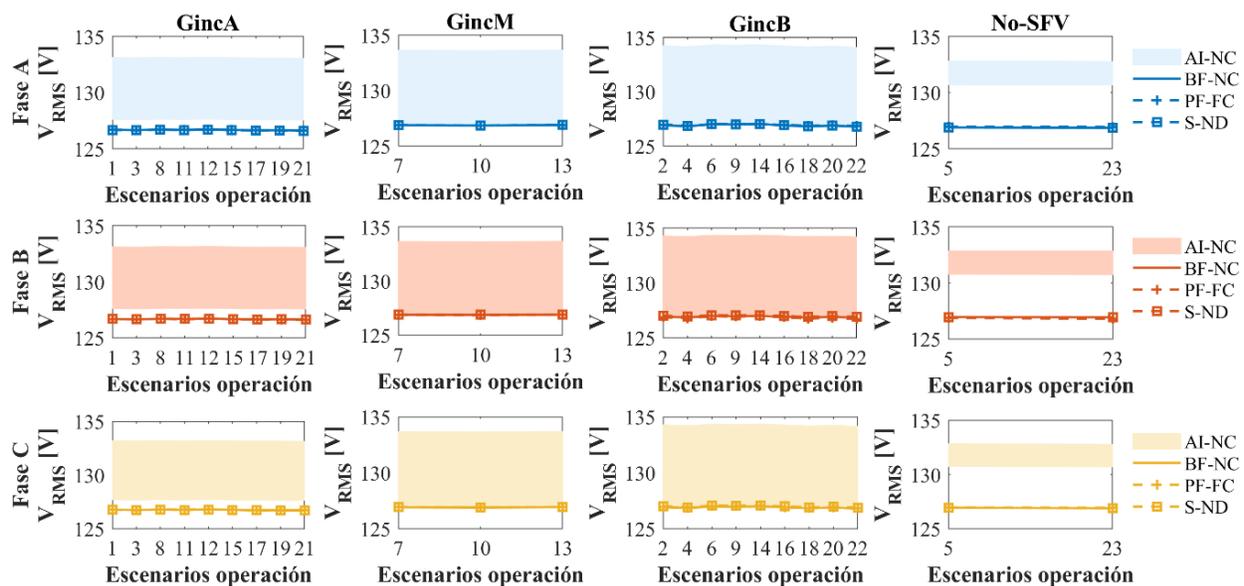
Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

### 4.3 Comparación de valores eficaces (RMS) de las señales de tensión y corriente

La figura 16 presenta los valores eficaces de la tensión del nodo TP4 para todos los escenarios de operación. Indica que el comportamiento de los valores eficaces de las estrategias de estimación BF-NC, PF-FC y S-ND es similar.

**Figura 16.**

*Valores eficaces de la tensión del nodo TP4.*



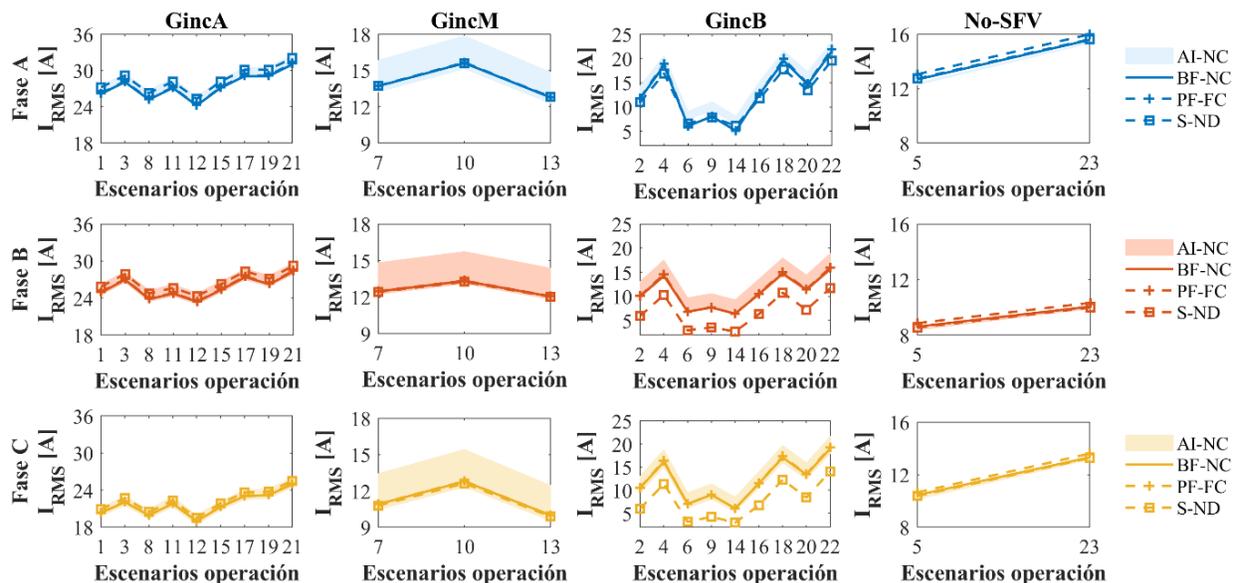
En el caso del nivel de alta irradiancia solar (GincA) y sin sistema FV (No-SFV), los valores eficaces de las estrategias BF-NC, PF-FC y S-ND no logran establecerse dentro del intervalo de operación de tensión eficaces estimado por la estrategia AI-NC por una diferencia sustancial. Sin embargo, en el caso de los niveles de media y baja irradiancia solar (GincM y GincB), los resultados estimados por BF-NC, PF-FC y S-ND son cercanos al límite inferior del intervalo de operación de tensión eficaces de la estrategia AI-NC.

Las figuras 17, 18 y 19 muestran los valores eficaces de las señales de corriente de los ramales principales de la red eléctrica del caso de estudio. En la figura 17 se puede apreciar que los valores eficaces de corriente en los escenarios de alta y media irradiancia solar (GincA y GincM), y sin sistema FV (No-SFV) son muy similares entre las estrategias de estimación BF-NC, PF-FC y S-ND, contrario de los escenarios de baja irradiancia solar (GincB), donde la estrategia S-ND muestra una diferencia considerable en las fases B y C.

De igual forma, se puede observar en la figura 17 que en escenarios de media y baja irradiancia solar (GincM y GincB) los valores eficaces de las estrategias BF-NC, PF-FC y S-ND se encuentran cercanas o por fuera del límite inferior del intervalo de valores eficaces estimado de la estrategia AI-NC.

**Figura 17.**

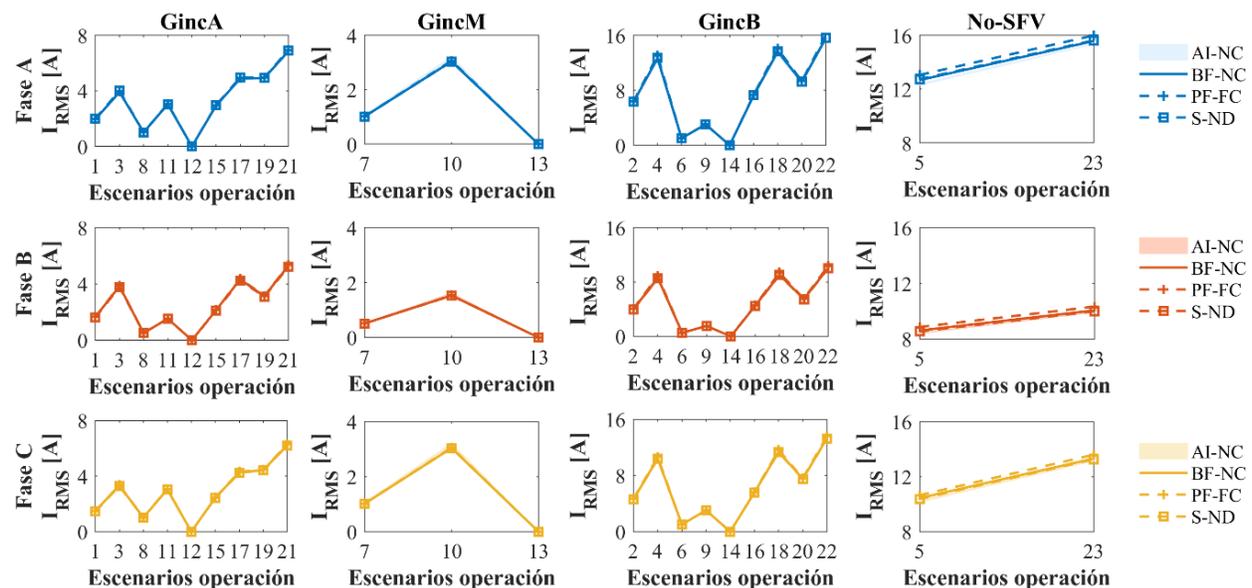
*Valores eficaces de las corrientes en los conductores SLACK-TP4.*



Ahora bien, los valores eficaces de las cuatro estrategias de estimación son similares en la figura 18 y el intervalo de valores eficaces de corriente de la estrategia AI-NC es reducido comparándolo con los otros ramales. Una posible causa del comportamiento de la estrategia AI-NC en este ramal es el nivel bajo de afectación en la potencia de consumo que las cargas tienen con los niveles de irradiación solar.

**Figura 18.**

*Valores eficaces de las corrientes en los conductores TP4-TALU4.*

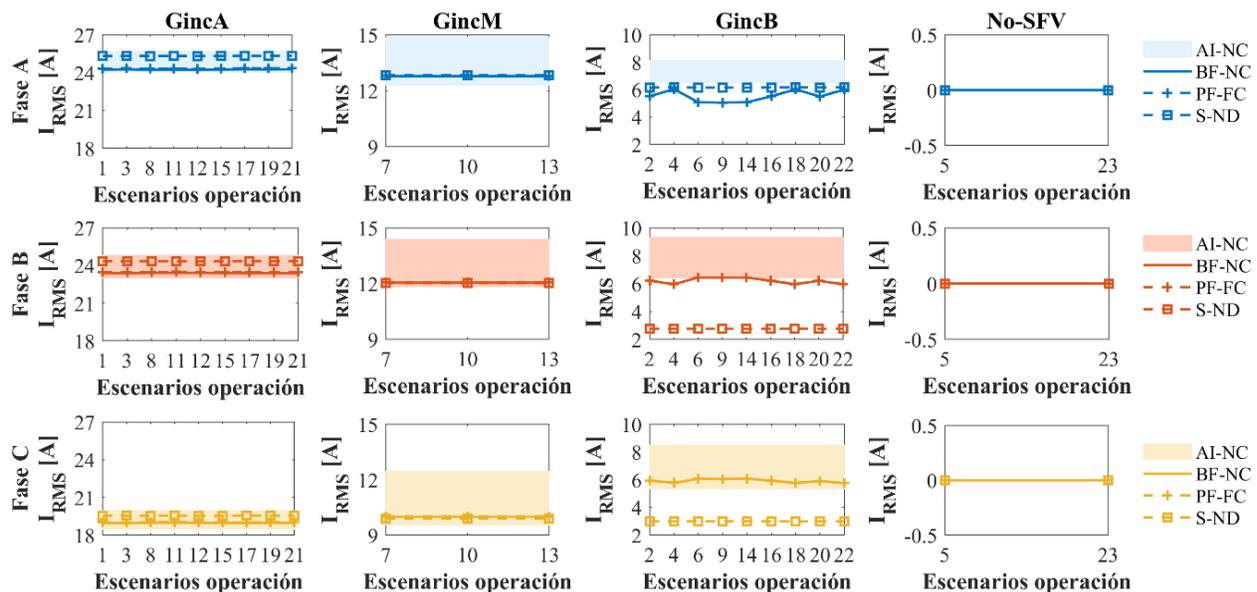


Por otro lado, la figura 19 presenta los valores eficaces de corriente del ramal TP4-PV, el cual representa los valores eficaces de la corriente inyectada por el sistema FV a la red eléctrica. En los escenarios de alta irradiación solar (GincA), los valores eficaces estimados por las estrategias BF-NC y PF-FC son similares a diferencia de los estimados por S-ND, y este grupo de valores eficaces se ubica dentro del intervalo de valores eficaces estimados por la estrategia AI-NC.

En los escenarios de media y baja irradiancia solar (GincM y GincB), los valores eficaces de corriente son cercanos al valor límite inferior del intervalo de operación estimado por la estrategia AI-NC; en el caso de la estrategia S-ND en baja irradiancia solar (GincB), los valores eficaces de las fases B y C presentan una diferencia considerable respecto a los valores eficaces de las otras estrategias.

**Figura 19.**

*Valores eficaces de las corrientes en los conductores TP4-PV.*



La tabla 15 presenta el desempeño de las estrategias de solución en términos de los errores relativos y absolutos de los valores eficaces de las señales de tensión y corrientes estimados.

En el caso de los errores relativos de valores eficaces de tensión, el desempeño general de las estrategias de estimación es PF-FC y S-ND es adecuado y regular, con errores máximos de 1,3% y 0,3%, respectivamente. Cabe resaltar que estos valores se presentan en los escenarios de baja irradiancia solar (Ginc B) y sin sistema FV (No-SFV).

Ahora bien, el desempeño general de la estrategia AI-NC para estimar los valores eficaces de tensión es aceptable, teniendo errores absolutos máximos de 6 V para el límite superior (AI-NC superior) y 3,1 V para el límite inferior del intervalo de operación estimado (AI-NC inferior). Lo anterior corresponde al comportamiento descrito en la figura 16, donde los valores eficaces estimados por la estrategia BF-NC se encuentran cercanos al límite inferior y no al límite superior del intervalo de operación estimado por la estrategia AI-NC.

**Tabla 15.**

*Desempeño de las estrategias en términos de los errores de los valores eficaces de las señales de tensión y corriente.*

Estrategia	Nodo	Error $V_{RMS}$ [%]				Ramal	Error $I_{RMS}$ [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV		GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓✓
S-ND	Error máximo	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	Error máximo	<b>4,5</b>	<b>1,3</b>	<b>58</b>	<b>0,8</b>
	TP4	<0,02	<0,02	<0,07	<0,01	SLACK-TP4	<4,5	<1,3	<58	<0,8
	TALU4	<0,02	<0,02	<0,07	<0,01	TP4-TALU4	<4,5	<0,4	<0,9	<0,8
	PV	<0,02	<0,02	<0,07	-	TP4-PV	<4,5	<1	<58	-
	Iluminación	<0,5	-	<1,3	<1,3	Iluminación	<2,9	-	<0,9	<0,8
	Extractores	<0,4	<0,4	<0,8	<0,8	Extractores	<0,4	<0,4	<0,5	<0,5
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PF-FC	Error máximo	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	Error máximo	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>	<b>3,9</b>	<b>3,8</b>
	TP4	<0,04	<0,03	<0,1	<0,1	SLACK-TP4	<0,6	<0,4	<2,2	<3
	TALU4	<0,05	<0,05	<0,2	<0,2	TP4-TALU4	<1,2	<0,8	<3,2	<3
	PV	<0,04	<0,03	<0,1	-	TP4-PV	<0,4	<0,2	<0,3	-
	Iluminación	<0,06	-	<0,3	<0,3	Iluminación	<1,5	-	<3,9	<3,8
	Extractores	<0,06	<0,05	<0,2	<0,2	Extractores	<1,4	<1,1	<2,3	<2,3
	Desempeño	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓✓	Desempeño	✓✓	✓	✓	✓✓✓
AI-NC superior	Error máximo	<b>5,2</b>	<b>5,4</b>	<b>6</b>	<b>4,8</b>	Error máximo	<b>6,3</b>	<b>25</b>	<b>29</b>	<b>4,6</b>
	TP4	<5,1	<5,4	<5,8	<4,7	SLACK-TP4	<6,1	<25	<29	<3,1
	TALU4	<5,1	<5,3	<5,8	<4,7	TP4-TALU4	<6	<6	<6,4	<3,1
	PV	<5,1	<5,4	<5,8	-	TP4-PV	<6,1	<25	<29	-
	Iluminación	<5,2	-	<6	<4,8	Iluminación	<3,6	-	<5,5	<3,1
	Extractores	<5,1	<5,4	<5,8	<4,8	Extractores	<6,3	<5,9	<7,8	<4,6
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓
AI-NC inferior	Error máximo	<b>0,75</b>	<b>0,1</b>	<b>0,13</b>	<b>3,1</b>	Error máximo	<b>2,9</b>	<b>4,5</b>	<b>61</b>	<b>2,8</b>
	TP4	<0,74	<0,1	<0,1	<3	SLACK-TP4	<2,9	<4,5	<60	<2,1

Estrategia	Nodo	Error $V_{RMS}$ [%]				Ramal	Error $I_{RMS}$ [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV		GincA	GincM	GincB	No-SFV
	TALU4	<0,74	<0,1	<0,1	<3	TP4-TALU4	<1,5	<0,7	<1,7	<2,1
	PV	<0,74	<0,1	<0,1	-	TP4-PV	<2,9	<4,5	<61	-
	Iluminación	<0,75	-	<0,13	<3,1	Iluminación	<1,3	-	<2	<2,1
	Extractores	<0,74	<0,1	<0,1	<3	Extractores	<1,8	<0,9	<1,9	<2,8

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

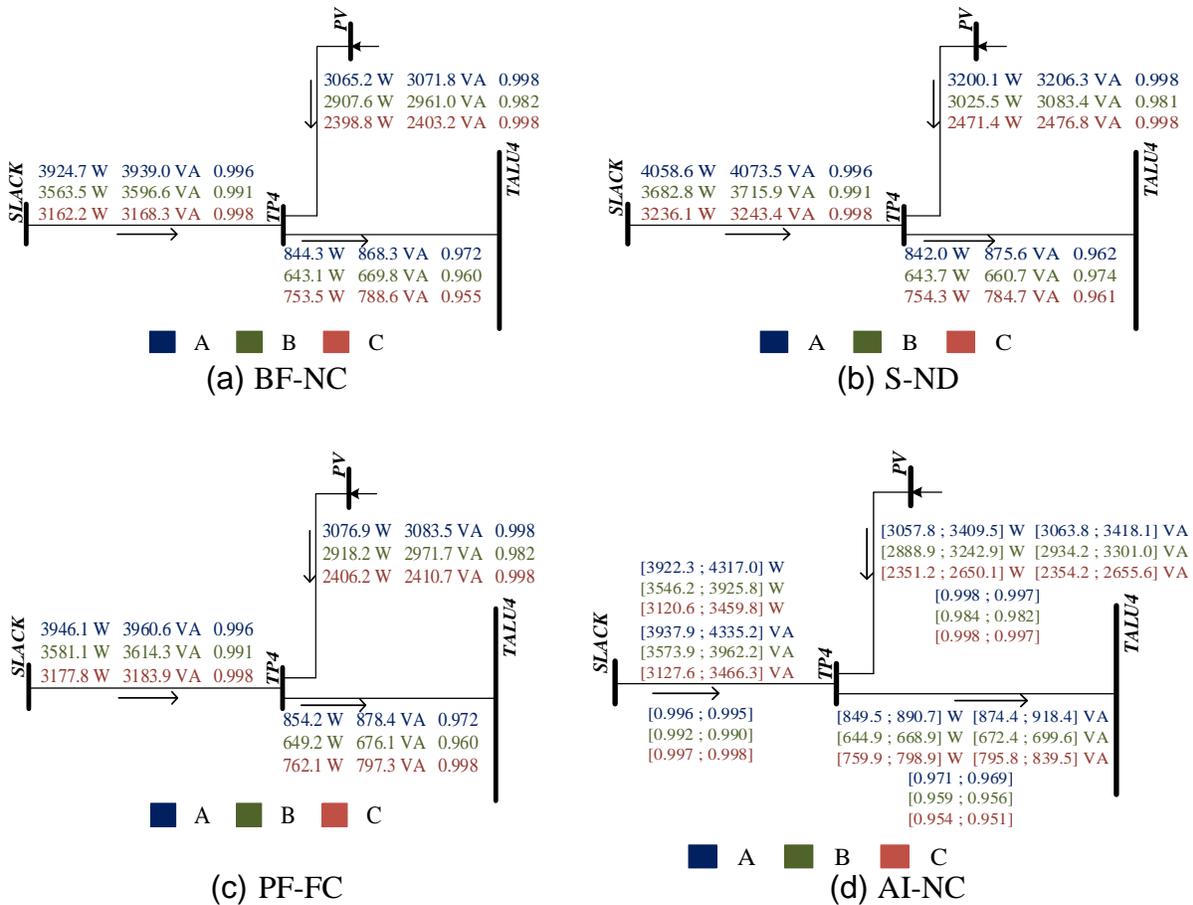
En términos de los errores de los valores eficaces de las señales de corriente, el desempeño general de las estrategias es aceptable presentando errores relativos entre el 1% y el 5%, y errores absolutos entre 1 A y 5 A. No obstante, en los escenarios de baja irradiancia solar (GincB), el desempeño de las estrategias de solución S-ND y AI-NC es inadecuado al estimar un error relativo máximo de 58% (S-ND) y error absoluto máximo de 61 A en el límite inferior del intervalo de la estrategia AI-NC. En contraste, el desempeño de la estrategia PF-FC es aceptable con error relativo máximo de 3,9%.

#### 4.4 Comparación de parámetros de potencia

La figura 20 presenta los valores estimados de potencia activa, potencia aparente y factor de potencia para el escenario de operación 21. Este escenario de operación se caracteriza por operar circuitos de iluminación y extractores de aire en su máxima potencia y el sistema FV en el nivel de alta irradiancia solar. Se evidencia el desbalance que existe entre las fases del sistema FV y el circuito de cargas (TP4-TALU4) en todas las estrategias de solución analizadas.

Figura 20.

Valores estimados de potencia activa, potencia aparente y factor de potencia del Escenario 21.



Asimismo, se puede apreciar en la figura la diferencia entre los valores de potencia activa y potencia aparente estimados por cada una de las estrategias de solución, esto debido a la diferencia que existe en las formas de onda de las señales de corriente estimadas por el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada (BF-NC y AI-NC), el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias desacoplada (S-ND), y el modelo de fuente de corriente (PF-FC).

Por otra parte, la tabla 16 indica el desempeño de las estrategias de estimación para los parámetros de potencia aparente, potencia activa y factor de potencia. En esta se puede apreciar que el desempeño de la estrategia S-ND para los tres parámetros mencionados en escenarios de baja irradiancia solar es inadecuado presentando errores mayores al 10%, y en los otros escenarios de operación (GincA, GincM y No-SFV), la estrategia tiene un desempeño aceptable con errores máximos de 4,5% en las potencias aparente y activa y 4,1% en el factor de potencia.

**Tabla 16.**

*Desempeño de las estrategias en términos de los errores de potencia aparente, potencia activa y factor de potencia.*

	Ramal	S [%]				P [%]				fp [%]			
		Ginc A	Ginc M	Ginc B	No-SFV	Ginc A	Ginc M	Ginc B	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓				✓✓✓✓✓				✓✓✓✓✓			
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓
S-ND	Error máximo	4,5	1,3	57	1,4	4,5	4,3	88	0,8	3,1	4,1	76	1,0
	SLACK-TP4	<4,5	<1,3	<57	<0,8	<4,5	<4,3	<88	<0,3	<0,1	<4,1	<76	<0,9
	TP4-TALU4	<2,5	<0,4	<0,8	<0,8	<0,4	<0,1	<0,3	<0,3	<2,8	<0,3	<1,0	<0,9
	TP4-PV	<4,5	<0,9	<57	-	<4,5	<4,3	<88	-	<0,1	<4,1	<76	-
	Iluminación	<2,8	-	<1,5	<1,4	<0,4	-	<0,6	<0,6	<3,1	-	<1,0	<1,0
	Extractores	<0,6	<0,4	<0,8	<1,0	<0,5	<0,2	<0,6	<0,8	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
PF-FC	Error máximo	1,4	1,1	3,9	3,8	1,5	1,1	3,9	3,8	0,1	0,1	0,1	0,1
	SLACK-TP4	<0,5	<0,3	<2,2	<3,0	<0,5	<0,3	<2,2	<3,0	<0,01	<0,01	<0,02	<0,03
	TP4-TALU4	<1,2	<0,8	<3,2	<3,0	<1,2	<0,8	<3,2	<3,1	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
	TP4-PV	<0,4	<0,2	<0,3	-	<0,4	<0,2	<0,3	-	<0,01	<0,01	<0,01	-
	Iluminación	<1,4	-	<3,9	<3,8	<1,5	-	<3,9	<3,8	<0,1	-	<0,04	<0,03
	Extractores	<1,4	<1,1	<2,3	<2,3	<1,4	<1,1	<2,3	<2,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Desempeño	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓

	Ramal	S [VA]				P [W]				fp			
		Ginc A	Ginc M	Ginc B	No-SFV	Ginc A	Ginc M	Ginc B	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
AI-NC superior	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	396	440	232	59	392	440	240	57	0,01	0,01	0,1	0,01
	SLACK-TP4	<396	<440	229	<59	<392	<440	<240	<57	<0,01	<0,01	<0,1	<0,01
	TP4-TALU4	<51	<45	<63	<59	<46	<41	<56	<57	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	TP4-PV	<352	<397	<232	-	<350	<398	<196	-	<0,01	<0,01	<0,1	-
	Iluminación	<6,4	-	<10	<17	<3,7	-	<5,9	<14	<0,01	-	<0,01	<0,01
	Extractores	<22	<23	<27	<18	<21	<21	<25	<17	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
AI-NC inferior	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	52	60	428	40	51	59	419	36	0,01	0,01	0,1	0,01
	SLACK-TP4	<51	<59	<412	<40	<50	<59	<407	<36	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01
	TP4-TALU4	<8,4	<2,8	<26	<40	<7,5	<2,5	26	<36	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	TP4-PV	<52	<60	<428	-	<51	<59	<419	-	<0,01	<0,01	<0,1	-
	Iluminación	<1,2	-	<14	<11	<1,5	-	<14	<9,2	<0,01	-	<0,01	<0,01
	Extractores	<4,7	<1,8	<3,8	<11	<4,3	<1,5	<3,5	<11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

Por otro lado, la estrategia PF-FC presenta un desempeño aceptable en la estimación de las potencias activa y aparente. Contrario es el caso para la estrategia AI-NC, donde el desempeño es inadecuado al presentar errores absolutos mayores de 30 W y 40 VA en los escenarios de operación.

Conviene destacar que, aunque exista una diferencia entre los valores estimados de potencia aparente y potencia activa de las estrategias BF-NC y AI-NC; ésta no se ve reflejada en su totalidad en la estimación del factor de potencia.

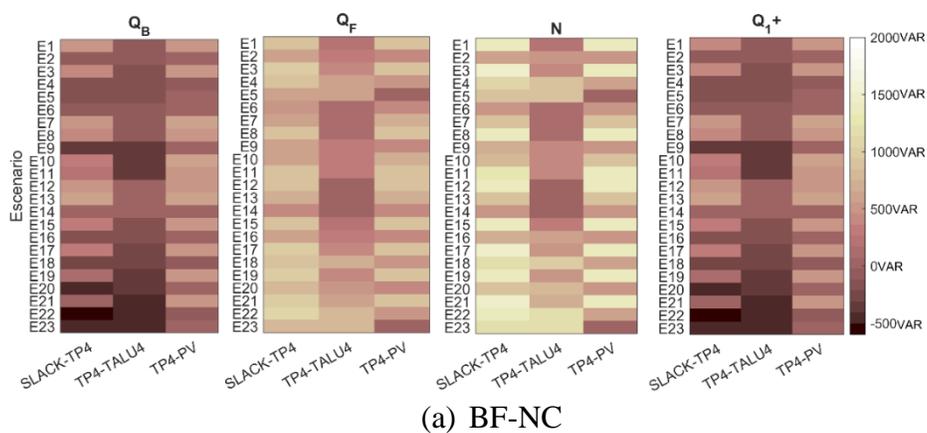
Asimismo, se aprecia en la tabla 16 que los errores absolutos máximos en el límite inferior del intervalo de la estrategia AI-NC son menores comparados con los errores presentados en el límite superior del intervalo de la estrategia (AI-NC superior), exceptuando los errores en

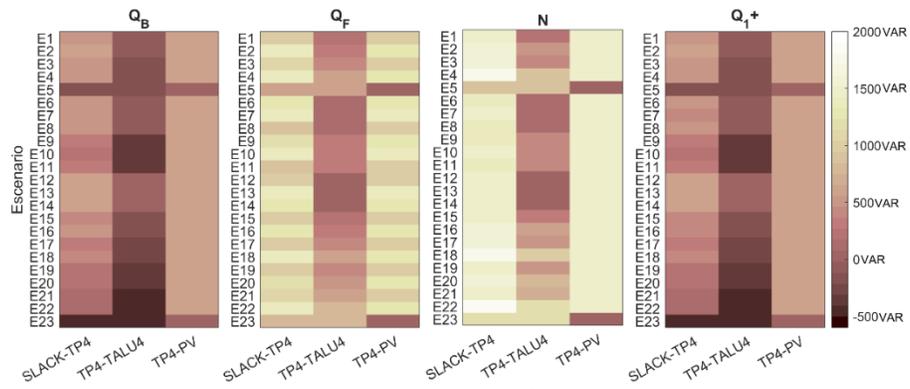
escenarios de baja irradiancia solar (GincB), esto se debe a la cercanía que existe entre el punto de operación de la estrategia BF-NC y el límite inferior del intervalo de la estrategia AI-NC.

La figura 21 presenta una comparación de los valores de potencia no activa estimada desde los enfoques Budeanu ( $Q_B$ ), Fryze ( $Q_F$ ) e IEEE ( $N$  enfoque estándar IEEE 1459 de 2010 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2010)), y la potencia no activa debida a la componente fundamental ( $Q_1^+$  enfoque estándar IEEE 1459 de 2010 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2010)). En general, para las cuatro estrategias de solución estudiadas, los resultados de los enfoques Fryze ( $Q_F$ ) e IEEE ( $N$ ) comparados con los resultados del enfoque Budeanu ( $Q_B$ ) indican que la distorsión armónica y el desbalance producido por las cargas monofásicas y el sistema FV son los responsables de los niveles altos de potencia no activa presentes en la red eléctrica.

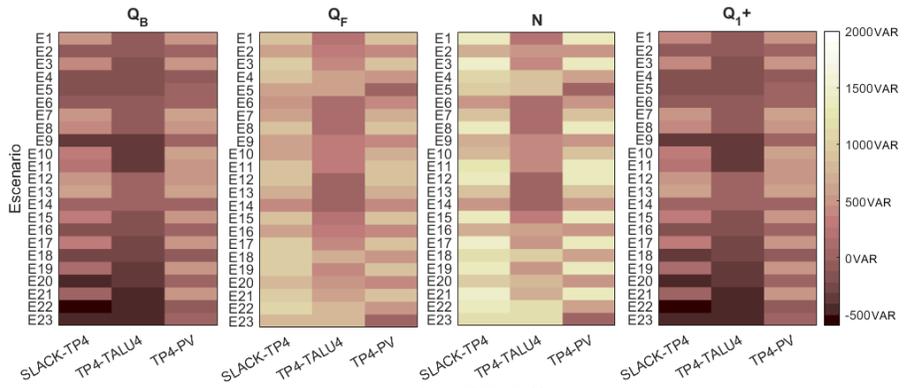
**Figura 21.**

*Valores de potencia no activa para todos los escenarios.*

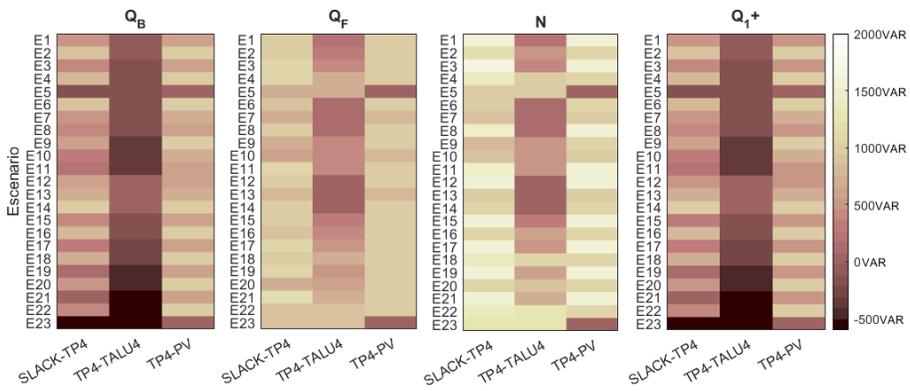




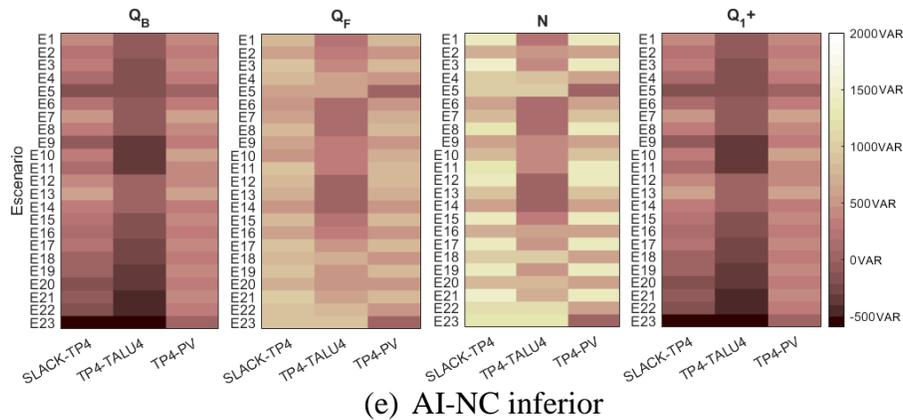
(b) S-ND



(c) PF-FC



(d) AI-NC superior



Las tablas 17 y 18 muestran el desempeño de las estrategias en términos de la potencia no activa estimada por los enfoques Fryze ( $Q_F$ ), IEEE ( $N$ ) y Budeanu ( $Q_B$ ). La tabla 17 muestra que para el enfoque Fryze ( $Q_F$ ), el desempeño de la estrategia S-ND es inadecuado en todos los escenarios de operación al estimar errores relativos máximos de hasta 1437% en el nivel de baja irradiancia solar (GincB). Contrario, sucede con la estrategia PF-FC, donde su desempeño puede considerarse aceptable al tener errores relativos máximos entre el 1% y el 5%.

**Tabla 17.**

*Desempeño de las estrategias en términos de los errores de las potencias no activas de Fryze e IEEE.*

Estrategia	Ramal	Q <sub>F</sub> [%]				N [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>55</b>	<b>292</b>	<b>1437</b>	<b>84</b>	<b>7,6</b>	<b>73</b>	<b>195</b>	<b>2,5</b>
	SLACK-TP4	<27	<292	<388	<83	<7,6	<73	<195	<2,5
S-ND	TP4-TALU4	<55	<2,4	<83	<83	<1,5	<1,0	<2,5	<2,5
	TP4-PV	<14	<245	<1437	-	<7,4	<61	<195	-
	Iluminación	<55	-	<84	<84	-	-	-	-
	Extractores	<2,4	<2,4	<2,5	<2,3	-	-	-	-
	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PF-FC	Error máximo	<b>1,1</b>	<b>0,7</b>	<b>3,3</b>	<b>3,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>2,7</b>	<b>2,8</b>
	SLACK-TP4	<0,9	<0,6	<2,1	<3,7	<0,7	<0,4	<2,3	<2,8

Estrategia	Ramal	$Q_F$ [%]				$N$ [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
	TP4-TALU4	<0,9	<0,6	<3,1	<2,6	<1,0	<0,7	<2,7	<2,4
	TP4-PV	<0,4	<0,2	<0,6	-	<0,5	<0,3	<0,2	-
	Iluminación	<1,1	-	<3,3	<2,9	-	-	-	-
	Extractores	<1,0	<0,7	<1,9	<1,9	-	-	-	-
Estrategia	Ramal	$Q_F$ [VAR]				$Q_{IEEE}$ [VAR]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Error máximo	<b>63</b>	<b>45</b>	<b>307</b>	<b>25</b>	<b>178</b>	<b>51</b>	<b>548</b>	<b>68</b>
AI-NC superior	SLACK-TP4	<63	<45	<307	<25	<178	<46	<548	<68
	TP4-TALU4	<25	<17	<42	<25	<69	<51	<86	<68
	TP4-PV	<57	<45	<245	-	<178	<46	<548	-
	Iluminación	<8,7	-	<21	<15	-	-	-	-
	Extractores	<9,4	<8,8	<10	<6,1	-	-	-	-
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AI-NC inferior	Error máximo	<b>51</b>	<b>28</b>	<b>160</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>57</b>	<b>200</b>	<b>49</b>
	SLACK-TP4	<51	<28	<160	<25	<32	<57	<200	<49
	TP4-TALU4	<4,4	<1,4	<8,4	<25	<12	<3,2	<4,2	<49
	TP4-PV	<49	<27	<159	-	<34	<30	<97	-
	Iluminación	<1,6	-	<6,4	<11	-	-	-	-
	Extractores	<2,3	<1,1	<1,4	<3,3	-	-	-	-

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

En el caso de la potencia no activa en el enfoque IEEE ( $N$ ), el desempeño de la estrategia S-ND presenta una mejora considerable en los errores relativos máximos (7,6%-GincA, 73%-GincM, 195%-GincB y 2,5%-No-SFV); no obstante, el desempeño sigue valorándose como inadecuado en los escenarios de baja irradiancia solar (GincB).

Por otro lado, la estrategia AI-NC presenta un desempeño inadecuado en los enfoques Fryze ( $Q_F$ ) e IEEE ( $N$ ) al obtener errores absolutos máximos desde 25 VAR y 34 VAR, respectivamente, resaltando que en los escenarios de baja irradiancia solar (GincB) se presenta la mayor diferencia entre la estrategia BF-NC y AI-NC.

Tabla 18.

Desempeño de las estrategias en términos de los errores de las potencias no activa de Budeanu y de distorsión de Budeanu.

Estrategia	Ramal	Q <sub>B</sub> [%]				D <sub>B</sub> [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV	GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓	✓	✓
	Error máximo	<b>-38&lt;506</b>	<b>-86&lt;527</b>	<b>-1245&lt;130</b>	<b>-9,4&lt;0</b>	<b>88</b>	<b>361</b>	<b>2618</b>	<b>103</b>
S-ND	SLACK-TP4	-33<506	-86<527	-436<130	-6,2<-0,1	<55	<361	<2563	<103
	TP4-TALU4	-3,2<0	-0,3<0	-11<0	-7,1<-0,4	<88	<21	<104	<103
	TP4-PV	-38<8	0,5<40	-1245<68	-	<16	<361	<2618	-
	Iluminación	-3,4<0	-	-13<0	-9,4<-2,6	<74	-	<101	<101
	Extractores	-0,4<0	-0,4<0	-0,8<0	-0,7<0	<21	<21	<21	<20
	Desempeño	✓✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>-1,2&lt;5,8</b>	<b>-2,8&lt;24</b>	<b>-6,8&lt;1,1</b>	<b>-6,0&lt;0</b>	<b>1,9</b>	<b>1,2</b>	<b>4,2</b>	<b>3,2</b>
PF-FC	SLACK-TP4	-1,0<5,8	-2,8<24	-1,8<1,1	-6,0<-0,1	<0,9	<0,5	<4,2	<3,0
	TP4-TALU4	-1,2<0	-0,6<0	-6,3<0	-5,1<-1,1	<1,0	<0,9	<2,5	<2,4
	TP4-PV	-0,4<0,4	0,1<0,2	-0,3<0,2	-	<0,4	<0,2	<1,4	-
	Iluminación	-1,2<0	-	-6,8<0	-5,5<-0,4	<1,1	-	<2,8	<2,7
	Extractores	-0,9<0	-0,7<0	-1,8<0	0,0	<1,9	<1,2	<3,2	<3,2
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Error máximo	<b>61</b>	<b>46</b>	<b>521</b>	<b>31</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>49</b>	<b>14</b>
AI-NC superior	SLACK-TP4	1,8<61	0,8<46	212<520	8,6<31	<24	<12	<48	<14
	TP4-TALU4	<21	<17	<23	8,6<31	<15	<3,6	<35	<14
	TP4-PV	21<59	5,6<46	223<521	-	<20	<10	<49	-
	Iluminación	<2,9	-	<2,9	3,7<16	<8,3	-	<20	<11
	Extractores	<8,3	<8,7	<9,9	<6,3	<4,6	<2,0	<3,1	<0,9
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Error máximo	<b>45</b>	<b>25</b>	<b>178</b>	<b>24</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>29</b>	<b>13</b>
AI-NC inferior	SLACK-TP4	21<45	0,8<25	48<178	4,5<24	<30	<15	<18	<13
	TP4-TALU4	<5,3	<2,6	<4,4	4,4<24	<3,1	<3,9	<8,9	<13
	TP4-PV	21<43	1,2<24	50<174	-	<30	<15	<29	-
	Iluminación	<0,7	-	<2,7	2,0<15	<1,5	-	<6,8	<8,9
	Extractores	<2,7	<1,6	<2,3	<4,2	<2,4	<3,0	<2,4	<2,5
	Desempeño	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

## 4.5 Comparación de parámetros de calidad de la potencia eléctrica

La siguiente sección presenta la comparación de los parámetros de calidad de la potencia eléctrica estudiados para cada una de las estrategias de solución de flujos de potencia. Los parámetros seleccionados son desbalance de tensión e índices de distorsión armónica de tensión y corriente.

### 4.5.1 Desbalance de tensión

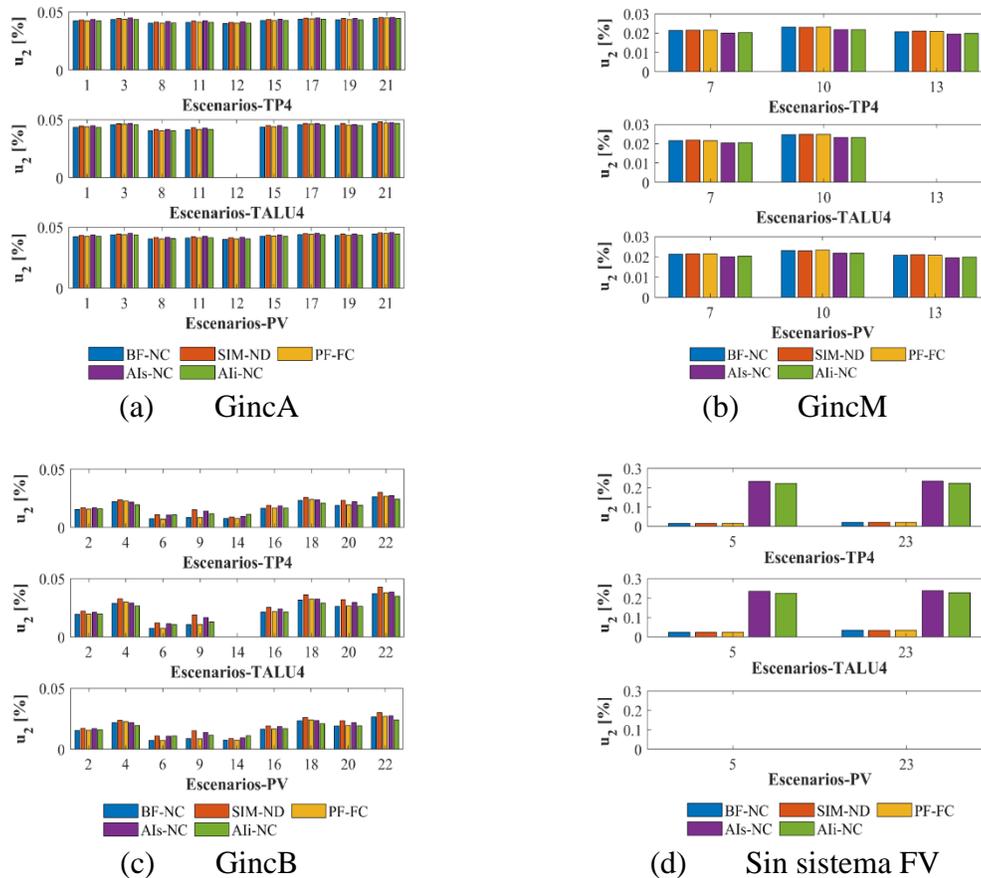
El desbalance de tensión en sistemas trifásicos está definido por la tasa entre la magnitud de la componente de secuencia negativa de tensión y la magnitud de la componente de secuencia positiva de tensión, y se expresa en porcentaje como lo muestra la Ecuación (6).

$$u_2 = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} * 100 \quad (6)$$

La figura 22 muestra el índice de desbalance de tensión para cada una de las estrategias de solución de flujos de potencia. Se puede detallar que el índice de desbalance no supera el 0,05% en los escenarios de alta y baja irradiancia solar. En los escenarios de media irradiancia solar, el índice es cercano a 0,02% en todas las estrategias de solución.

**Figura 22.**

*Índice de desbalance de tensión para cada escenario de operación.*



Por último, en los escenarios donde el sistema FV no está operando, el índice de desbalance de tensión para las estrategias BF-NC, S-ND y PF-FC es cercano a 0,02% y para la estrategia AIs-NC en los límites inferior y superior del intervalo, el índice tiene un valor cercano a 0,2%.

La tabla 19 presenta el desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencia en términos de los errores absolutos del índice de desbalance de tensión  $u_2$ . Se puede observar que el desempeño de las estrategias S-ND y PF-FC en todos los escenarios de operación es excelente, con valores de error absoluto máximo mayores de 0,0082% y 0,0009% en los escenarios de baja irradiancia solar (GincB).

La estrategia AI-NC presenta un desempeño excelente en los escenarios de alta, media y baja irradiancia solar (GincA, GincM, GincB) con valores de error absoluto máximo menores a 0,006% (AI-NC superior) y 0,0036% (AI-NC inferior). No obstante, en los escenarios de operación sin sistema FV (No-SFV) los valores de error absoluto máximo son de aproximadamente 0,22% en el límite superior del intervalo (AI-NC superior) y 0,21% en el límite inferior del intervalo (AI-NC inferior), dando como resultado un desempeño aceptable de la estrategia AI-NC.

**Tabla 19.**

*Desempeño de las estrategias en término de los errores del índice de desbalance de tensión.*

Estrategia	Nodo	$u_2$ [%]			
		GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
S-ND	Error máximo	0,0019	0,0003	0,0082	0,0008
	TP4	0,0012	0,0003	0,0065	0,0007
	TALU4	0,0019	0,0003	0,0082	0,0008
	PV	0,0012	0,0003	0,0065	-
PF-FC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Error máximo	0,0005	0,0002	0,0009	0,0008
	TP4	0,0004	0,0002	0,0007	0,0004
	TALU4	0,0005	0,0002	0,0009	0,0008
	PV	0,0004	0,0002	0,0007	-
AI-NC superior	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	0,0016	0,0014	0,0060	0,2173
	TP4	0,0016	0,0014	0,0052	0,2173
	TALU4	0,0015	0,0014	0,0060	0,2094
AI-NC inferior	PV	0,0016	0,0014	0,0052	-
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓
	Error máximo	0,0003	0,0015	0,0036	0,2068
	TP4	0,0002	0,0013	0,0036	0,2068
	TALU4	0,0003	0,0015	0,0034	0,1991
PV	0,0002	0,0013	0,0036	-	

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

Cabe resaltar que, en ninguno de los escenarios analizados el índice de desbalance de tensión supera el valor de referencia del 2,0% establecido por la norma colombiana NTC 5001

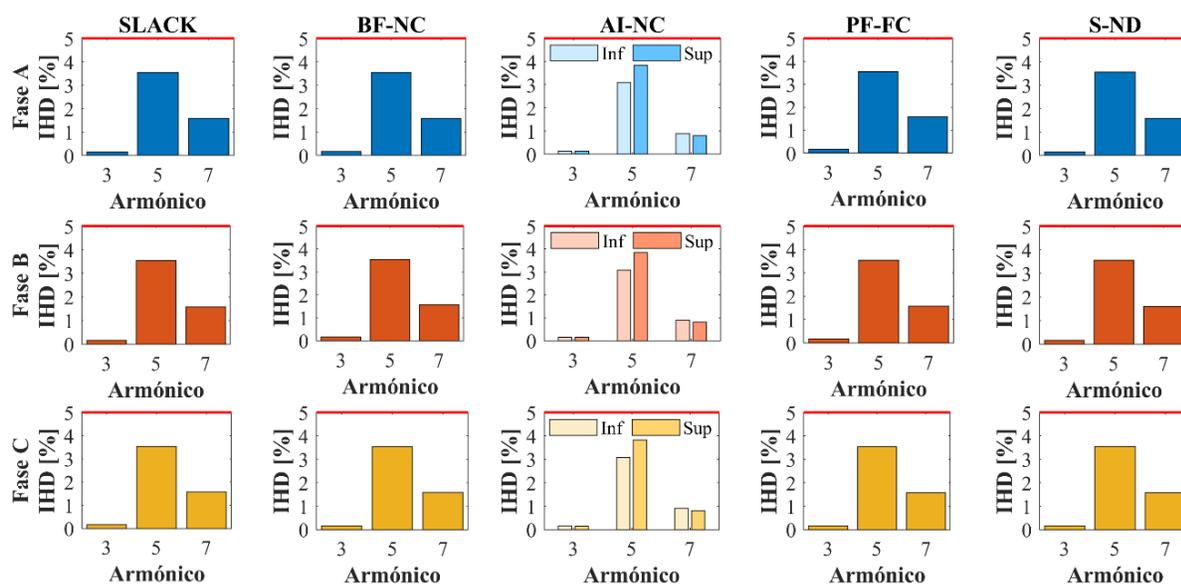
(NTC 5001 - Calidad de La Potencia Eléctrica. Límites y Metodología de La Evaluación En Punto de Conexión Común, 2008) y el estándar internacional IEEE 519 de 2014 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014).

#### 4.5.2 Índices de distorsión armónica

La figura 23 describe el espectro armónico de las señales de tensión para cada estrategia de solución. Se puede evidenciar que la componente de 5<sup>o</sup> orden armónico tiene una mayor magnitud en la forma de onda de tensión que las componentes de 3<sup>er</sup> o 7<sup>o</sup> orden armónico. No obstante, ninguna de las tres componentes armónicas supera el límite de distorsión armónica individual del 5% establecido por el estándar IEEE 519 de 2014 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014).

**Figura 23.**

*Distorsión armónica individual de tensión en cada estrategia de solución.*



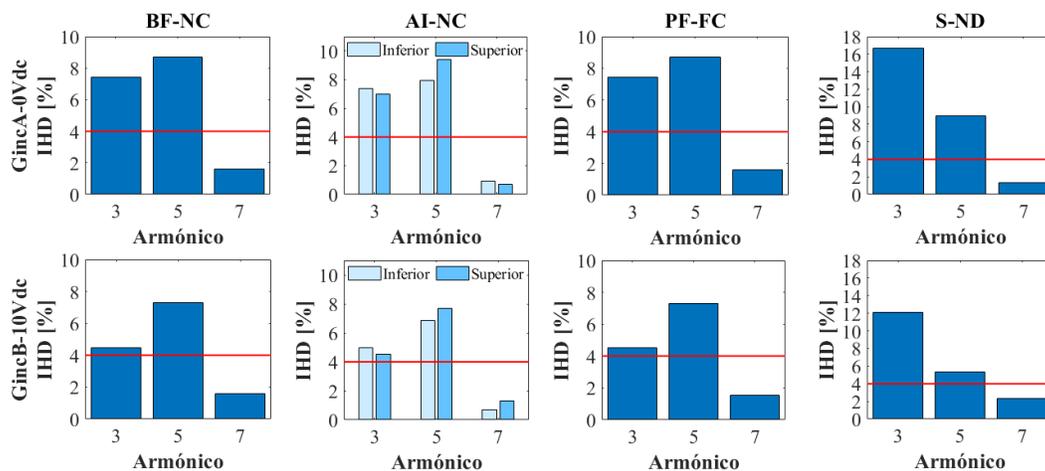
La figura 24 muestra la distorsión armónica individual de corriente en la Fase A del conductor TP4-TALU4. En esta puede observarse la diferencia entre los espectros armónicos de las corrientes estimadas por cada modelo de carga aplicado.

Para las estrategias BF-NC, AI-NC y PF-FC el orden armónico con mayor predominancia es el 5<sup>o</sup> con valores cercanos al 9% en escenarios de alta irradiancia solar (GincA), y valores cercanos al 5% para escenarios de baja irradiancia solar (GincB).

Asimismo, la componente del 3<sup>er</sup> orden armónico presenta valores por encima del 7% en escenarios de alta irradiancia solar (GincA) y del 4% en escenarios de baja irradiancia solar (GincB). En estas tres estrategias (BF-NC, AI-NC y PF-FC), las componentes armónicas señaladas superan el límite establecido del 4% por el estándar IEEE 519 de 2014 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014) y IEEE 1547 de 2018 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2018). En este trabajo de investigación se está considerando el caso más desfavorable de los límites de IDHi, debido al desconocimiento de la relación que hay entre la corriente máxima de cortocircuito  $I_{SC}$  y la corriente de demanda máxima del sistema  $I_L$  ( $I_{SC}/I_L$ ).

**Figura 24.**

*Distorsión armónica individual de la corriente de la fase A en el conductor TP4-TALU4.*



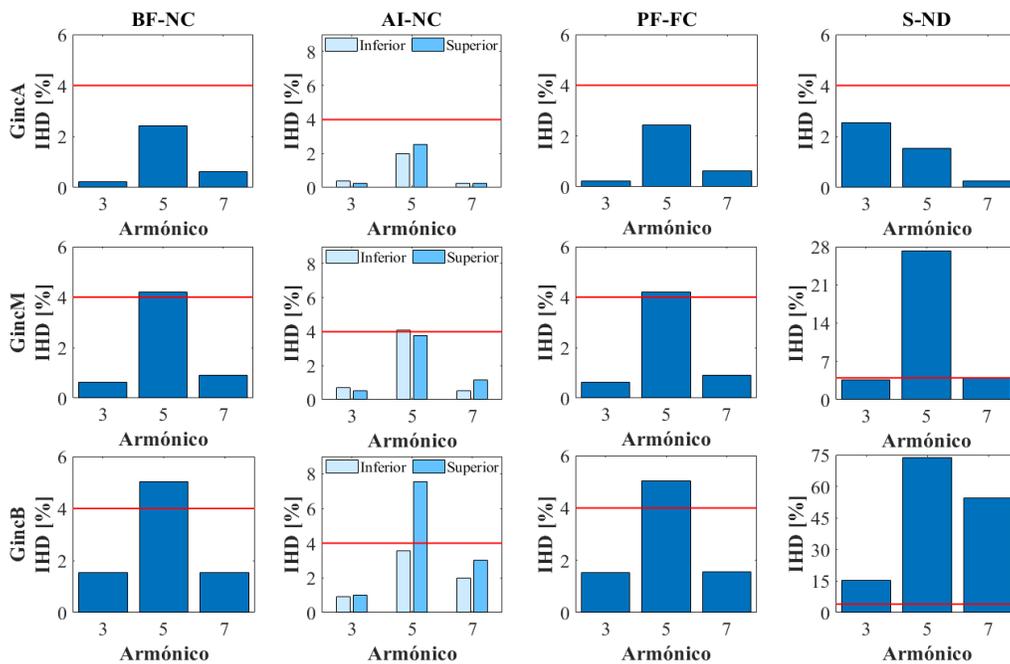
Por el contrario, la estrategia S-ND presenta un comportamiento distinto en el espectro armónico de corriente, donde la 3<sup>er</sup> componente armónica es la predominante con valores mayores al 16% en escenarios de alta irradiancia solar (GincA) y del 12% en escenarios de baja irradiancia solar (GincB). Por su lado, la componente armónica de 5to orden presenta valores del 8% en escenarios de alta irradiancia solar (GincA) y del 5% en escenarios de baja irradiancia solar (GincB).

La figura 25 presenta la distorsión armónica de corriente en el conductor TP4-PV, donde se observa que, para los escenarios de alta irradiancia solar (GincA), el espectro armónico estudiado no supera el límite de 4%. Por el contrario, en los escenarios de baja irradiancia solar (GincB) la componente armónica de 5<sup>o</sup> orden es predominante y supera el límite de 4% en las cuatro estrategias de solución de flujos de potencia.

Sin embargo, para la estrategia S-ND, las componentes armónicas de 3<sup>er</sup>, 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup> orden presentan valores muy por encima del límite, como 15%, 75% y 55%, respectivamente. Teniendo en cuenta la figura 15, puede sospecharse que el espectro armónico de la señal de corriente del sistema FV para la estrategia S-ND es amplio.

Figura 25.

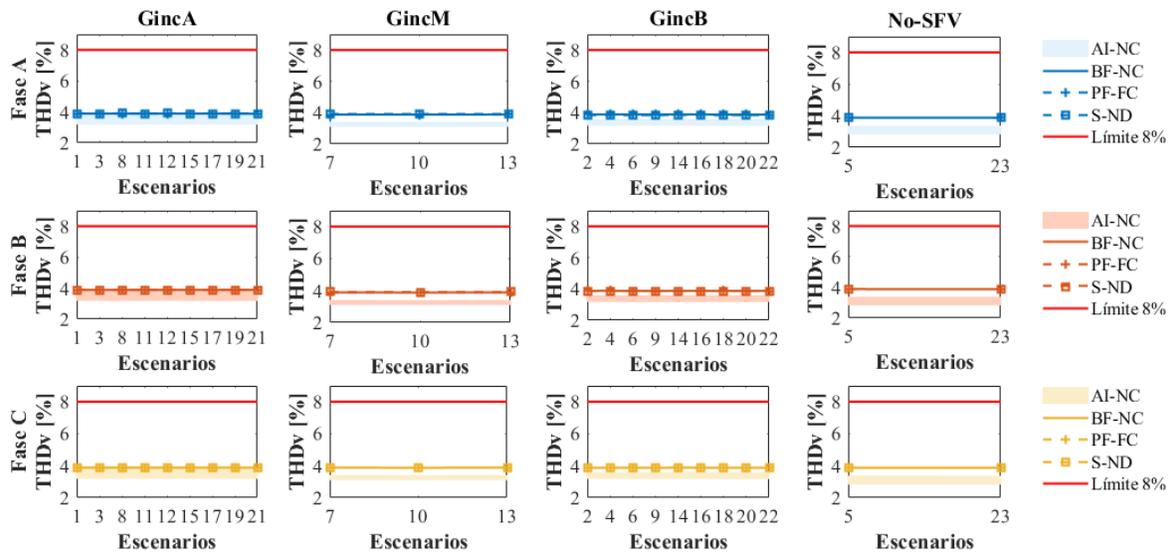
*Distorsión armónica individual de corriente de la fase A en el conductor TP4-PV.*



La figura 26 muestra los índices de distorsión armónica total de tensión (THD<sub>v</sub>) para todos los escenarios de operación. En esta figura se observa que para las estrategias de solución BF-NC, S-ND y PF-FC los THD<sub>v</sub> de las tres fases son cercanos a 3,8%.

Figura 26.

Índice de distorsión armónica total de las tensiones para los diversos escenarios analizados.



Mientras, los límites inferior y superior del intervalo de THDv estimado para la estrategia AI-NC son cercanos a 2,8% y 3,9%, respectivamente. En general, los THDv calculados para cada estrategia de solución son menores al 8% que es el límite establecido por la norma colombiana (NTC 5001 (NTC 5001 - Calidad de La Potencia Eléctrica. Límites y Metodología de La Evaluación En Punto de Conexión Común, 2008)) y el estándar internacional (IEEE 519 de 2014 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014)).

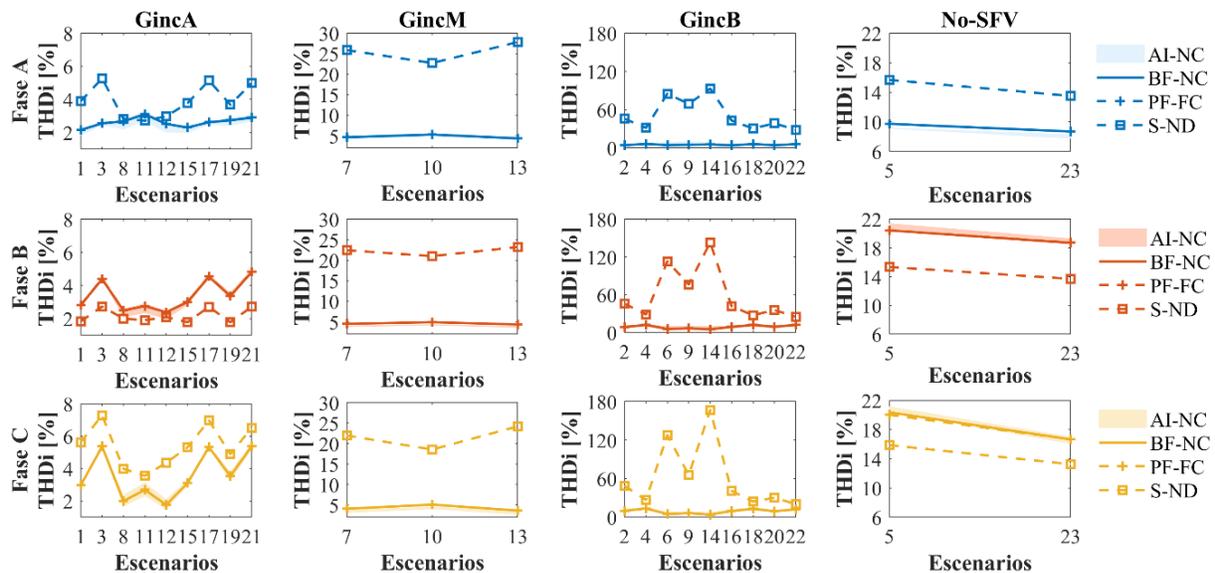
Por otra parte, las figuras 27, 28 y 29 presentan los índices de distorsión armónica total de corriente (THDi) en los tres ramales principales de la red eléctrica en estudio. En la figura 27 puede evidenciarse que en los escenarios de operación de alta irradiancia solar (GincA) los THDi de las estrategias de solución no superan el 8%.

No obstante, en la figura 27 también se puede apreciar que los THDi de la estrategia S-ND en escenarios de media y baja irradiancia solar (GincM y GincB) aumentan hasta valores cercanos

a 30% y 180%, respectivamente; mientras, los valores estimados de THDi de las estrategias BF-NC, PF-FC y AI-NC no superan el 5%.

**Figura 27.**

*Índice de distorsión armónica total de las corrientes en los conductores SLACK-TP4.*



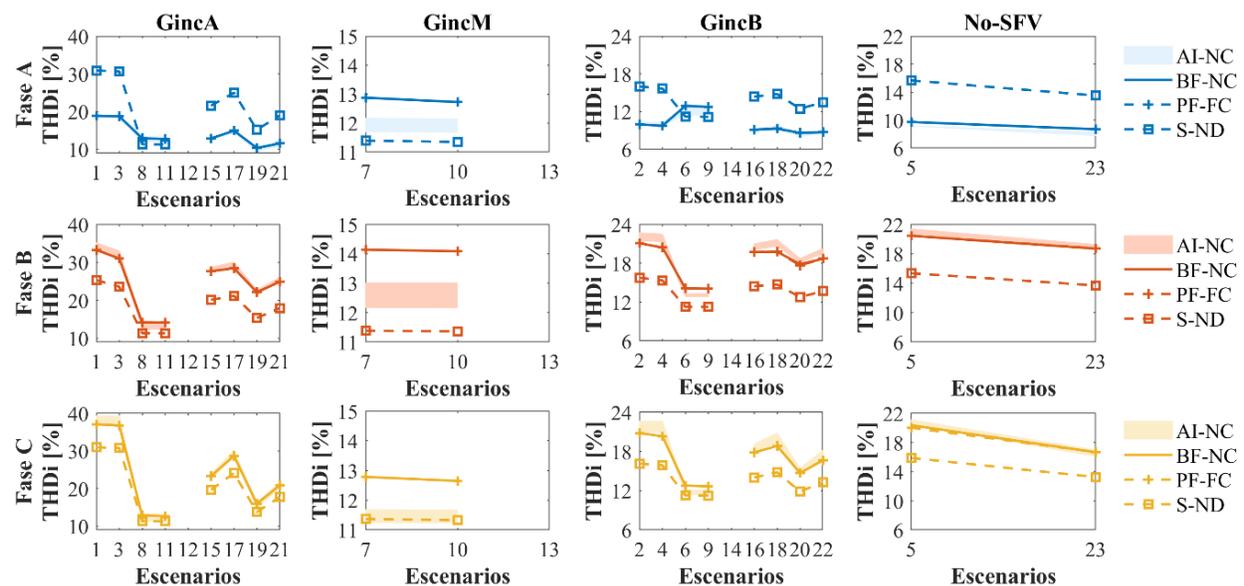
Por el contrario, los índices THDi de los conductores TP4-TALU4 presentados en la figura 28 no superan el 40%, siendo este el valor del límite superior del intervalo de THDi de la estrategia AI-NC en el escenario 1 de alta irradiancia solar.

También se puede diferenciar los escenarios de operación donde actúan los dos niveles de dimerización de la luminaria dimerizable, 0 Vdc y 10 Vdc. En el nivel de 0 Vdc (GincA-E1, E3, E15, E17, E19 y E21) de dimerización, el THDi de una sola luminaria es mayor a un 20%; mientras que, en el nivel de mayor dimerización, 10 Vdc (GincB-E2, E4, E16, E18, E20 y E22, y No-SFV-E5 y E23), el THDi de una luminaria es menor al 13% (Martínez-Peñaloza et al., 2020).

De igual forma, en la figura 28 se evidencia que el THDi de los extractores de aire en los escenarios donde estos actúan en solitario (GincA-E8, E11; GincM-E7, E10; GincB-E6, E9). Los valores de este índice no superan el 14% en las estrategias BF-NC y PF-FC, el 12% en la estrategia S-ND y, por último, para la estrategia AI-NC los límites del intervalo de THDi están entre el 11% y el 14%.

**Figura 28.**

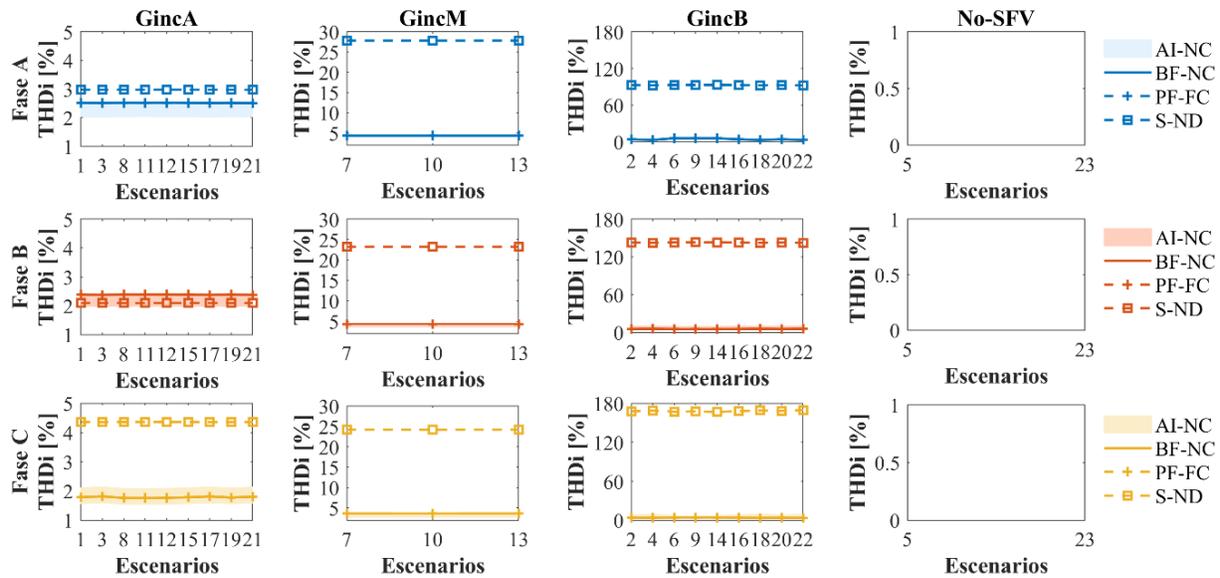
*Índice de distorsión armónica total de las corrientes en los conductores TP4-TALU4.*



La figura 29 presenta el comportamiento del THDi del sistema FV en los distintos escenarios de operación para cada estrategia de solución de flujos de potencia. Se puede ver que no existe afectación entre la operación del tablero de cargas de iluminación y extractores de aire TALU4, y el del sistema FV.

Figura 29.

Índice de distorsión armónica total de corriente en conductor TP4-PV.



Además de eso, se puede observar que el comportamiento de la estrategia S-ND es diferente a las otras tres estrategias, estimando valores máximos distintos para los tres niveles de irradiancia solar: 4,4% en GincA-fase C, 27,9% en GincM-fase A y 170% en GincB-fase C.

Asimismo, las estrategias BF-NC, PF-FC y AI-NC, estimaron índices THDi que superan el 2,5% en GincA, 4,4% en GincM y 10,8% en GincB.

La tabla 20 indica el desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencia estudiadas en términos de errores absolutos de los índices de distorsión armónica. En general, las estrategias de solución presentan un desempeño excelente en la estimación de índice THDv con valores menores a 1,0%.

Tabla 20.

Desempeño de las estrategias en términos de los errores de los índices THD de tensión y corriente.

Estrategia	Nodo	Error THDv				Ramal	Error THDi			
		GincA	GincM	GincB	NSFV		GincA	GincM	GincB	No-SFV
BF-NC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	Desempeño	✓	✓	✓	✓✓
S-ND	Error máximo	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>	Error máximo	<b>12</b>	<b>23</b>	<b>166</b>	<b>6,0</b>
	TP4	<0,01	<0,04	<0,04	<0,01	SLACK-TP4	<2,7	<23	<163	<5,9
	TALU4	<0,01	<0,04	<0,04	<0,01	TP4-TALU4	<12	<2,8	<6,1	<5,9
	PV	<0,01	<0,04	<0,04	-	TP4-PV	<2,6	<23	<166	-
	Iluminación	<0,03	-	<0,08	<0,07	Iluminación	<12	-	<6,1	<6,0
	Extractores	<0,03	<0,05	<0,04	<0,02	Extractores	<2,8	<2,8	<2,9	<2,5
PF-FC	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
	Error máximo	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	Error máximo	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>
	TP4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	SLACK-TP4	<0,03	<0,01	<0,1	<0,3
	TALU4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TP4-TALU4	<0,04	<0,001	<0,2	<0,3
	PV	<0,01	<0,01	<0,01	-	TP4-PV	<5,9e-05	<5,5e-05	<0,001	-
	Iluminación	<0,01	-	<0,03	<0,03	Iluminación	<1,1e-03	-	<0,2	<0,6
AI-NC superior	Extractores	<0,03	<0,02	<0,03	<0,03	Extractores	<6,9e-04	<0,001	<0,001	<2,5e-04
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>0,04</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	Error máximo	<b>2,7</b>	<b>1,1</b>	<b>5,8</b>	<b>1,1</b>
	TP4	<0,04	<0,5	<0,3	<0,5	SLACK-TP4	<0,4	<1,0	<4,3	<0,9
	TALU4	<0,04	<0,5	<0,3	<0,5	TP4-TALU4	<2,5	<1,1	<2,3	<0,9
	PV	<0,04	<0,5	<0,3	-	TP4-PV	<0,3	<0,9	<5,8	-
AI-NC inferior	Iluminación	<0,04	-	<0,3	<0,6	Iluminación	<2,7	-	<2,3	<1,0
	Extractores	<0,04	<0,5	<0,3	<0,5	Extractores	<0,9	<1,1	<1,2	<1,1
	Desempeño	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓	Desempeño	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Error máximo	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	Error máximo	<b>1,8</b>	<b>2,0</b>	<b>2,1</b>	<b>2,2</b>
	TP4	<0,7	<0,8	<0,7	<1,0	SLACK-TP4	<0,5	<0,7	<2,1	<0,9
	TALU4	<0,7	<0,8	<0,7	<1,0	TP4-TALU4	<1,8	<2,0	<1,5	<0,9
AI-NC inferior	PV	<0,7	<0,8	<0,7	-	TP4-PV	<0,5	<0,5	<1,4	-
	Iluminación	<0,7	-	<0,7	<1,0	Iluminación	<0,5	-	<1,1	<0,8
	Extractores	<0,7	<0,8	<0,7	<1,0	Extractores	<1,8	<2,0	<1,9	<2,2

Nota: ✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente.

En el caso del índice THDi, la estrategia PF-FC tiene un desempeño excelente en los escenarios de alta y media irradiancia solar y adecuado en los escenarios de baja irradiancia solar y sin sistema FV. En cambio, el desempeño de la estrategia S-ND es inadecuado en los escenarios de alta, media y baja irradiancia solar, al presentar errores absolutos mayores al 10%, y regular en los escenarios sin sistema FV al tener un error absoluto máximo del 6%.

En términos de la estrategia AI-NC, su desempeño en general es aceptable con errores absolutos máximos entre el 1,0% y el 5,0% para la mayoría de los escenarios de operación estudiados.

#### 4.6 Resultados estrategia Newton-Raphson

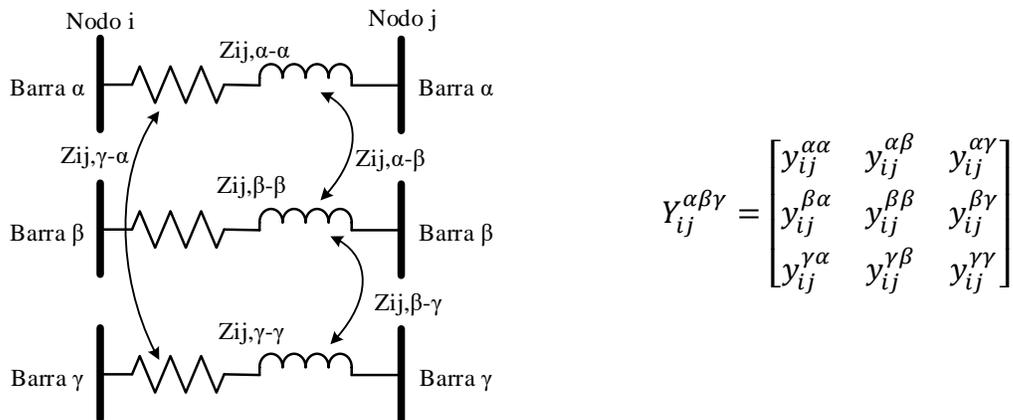
Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica de la estrategia de Newton-Raphson con inyección de corrientes y las adaptaciones planteadas en el algoritmo mostradas en la figura 7 (b), son considerados distintos aspectos durante la programación del algoritmo en MATLAB.

En primer lugar, se revisa el planteamiento de una matriz  $Ybus$  para un sistema trifásico desbalanceado. En la construcción de la  $Ybus$  para un sistema trifásico con cargas de distintas topologías (monofásicas, bifásicas y/o trifásicas), aparecen relaciones mutuas entre las impedancias de las fases.

Por tanto, los efectos mutuos entre las fases se reflejan en la matriz  $Ybus$  de cada elemento del sistema, en las posiciones por fuera de la diagonal principal, como lo muestra la figura 30.

**Figura 30.**

Esquemático de la construcción de la matriz  $Y_{bus}$  de un elemento trifásico.



(a) Modelo de conductor trifásico.

(b) Matriz  $Y_{bus}$  de elemento trifásico.

No obstante, este modelado de efectos mutuos entre las fases de los elementos de un sistema eléctrico es aplicable a líneas de transmisión o redes de distribución de una longitud determinada según lo indicado por Anderson (Anderson, 1995).

Debido a que la red eléctrica considerada como caso de estudio no cumple con los requerimientos necesarios para aplicar el modelado de efectos mutuos, se construye la matriz  $Y_{bus}$  de la red eléctrica sin tener en cuenta estos valores.

El segundo aspecto a revisar es el modelo para representar las cargas no lineales y el sistema FV. Para ello, el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada se utiliza en primera instancia, debido a que este permite representar la interacción armónica entre tensión y corriente.

En vista de los problemas de convergencia del algoritmo, se plantea la hipótesis de que la complejidad del modelo y la interacción armónica podrían estar afectando la convergencia del algoritmo.

De este modo, el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias desacoplada es aplicado. Sin embargo, el algoritmo también presentó problemas de convergencia.

Por último, el modelo de potencia constante es utilizado para analizar el algoritmo de Newton-Raphson tradicional, siendo este modelo de carga el más utilizado en la literatura.

Ahora bien, durante el desarrollo de las pruebas del algoritmo planteado son aplicados 5 enfoques distintos, teniendo en cuenta que son encontradas en la literatura diferentes formas de plantear las ecuaciones de los elementos de la matriz de Jacobianos del método de Newton-Raphson con inyección de corrientes y con potencias. La tabla 21 resume las características de los enfoques utilizados y las referencias donde fueron encontrados.

**Tabla 21.**

*Enfoques de Newton-Raphson ensayados.*

#	Modelo de cargas	Balanceado/ Desbalanceado	Distorsión armónica	Observaciones	Referencia
1	Norton con matriz acoplada			NR polar current mismatch: Los elementos de la matriz Ybus se descomponen en magnitud y ángulo de fase $ Y_{ki} $ y $\theta_{ki}$	(Thongkrajay et al., 2006)
2	Norton con matriz acoplada	Desbalanceado	Si	NR polar current mismatch: Los elementos de la matriz Ybus se descomponen en los valores de conductancia y susceptancia $G_{ki}$ y $B_{ki}$	(Sereeter et al., 2017)
3	Norton con matriz desacoplada desagregada			NR polar current mismatch: Los elementos de la matriz Ybus se descomponen en magnitud y ángulo de fase $ Y_{ki} $ y $\theta_{ki}$	(Thongkrajay et al., 2006)
4	Norton con matriz desacoplada			NR polar current mismatch: Los elementos de la matriz Ybus se descomponen en los valores de conductancia y susceptancia $G_{ki}$ y $B_{ki}$	(Thongkrajay et al., 2006)
5	Potencia constante	Balanceado	No	NR polar current mismatch: Los elementos de la matriz Ybus se descomponen en los valores de conductancia y susceptancia $G_{ki}$ y $B_{ki}$	(Sereeter et al., 2019), (D'Orto, 2021), (Zhang & Cheng, 1997)

En la aplicación de los enfoques 1 y 2 de Newton-Raphson con inyección de corrientes, el modelo Norton equivalente con matriz de admitancias acoplada es utilizado para representar las cargas no lineales y el sistema FV. Por el contrario, en los enfoques 3 y 4, es aplicado el modelo Norton equivalente de matriz de admitancias desacoplado. Por último, en el enfoque 5, el modelo de carga potencia constante es utilizado.

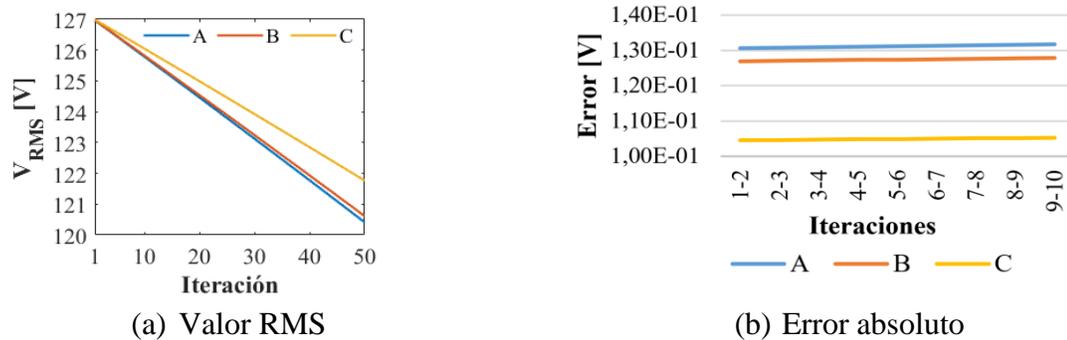
En términos de desbalance y distorsión armónica, en los enfoques 1 a 4 el algoritmo es adaptado a estas condiciones características de las cargas y la señal de tensión de alimentación, en el caso de la distorsión armónica.

No obstante, en el enfoque 5 el algoritmo del método Newton-Raphson tradicional de ecuaciones de potencia para sistemas balanceados y a frecuencia fundamental es utilizado.

La Figura 31 muestra la evolución del valor eficaz de las tensiones del nodo TP4 para el enfoque 1 ensayado. La Figura 31(a) indica una disminución permanente del valor eficaz de tensión en las tres fases, a medida que las iteraciones van aumentando. Sin embargo, en la Figura 31(b), los errores absolutos entre los valores eficaces de la iteración actual ( $X^k$ ) con la iteración futura ( $X^{k+1}$ ), se mantienen constantes para las fases A, B y C en valores de 0,13 V, 0,12 V y 0,10 V, respectivamente.

**Figura 31.**

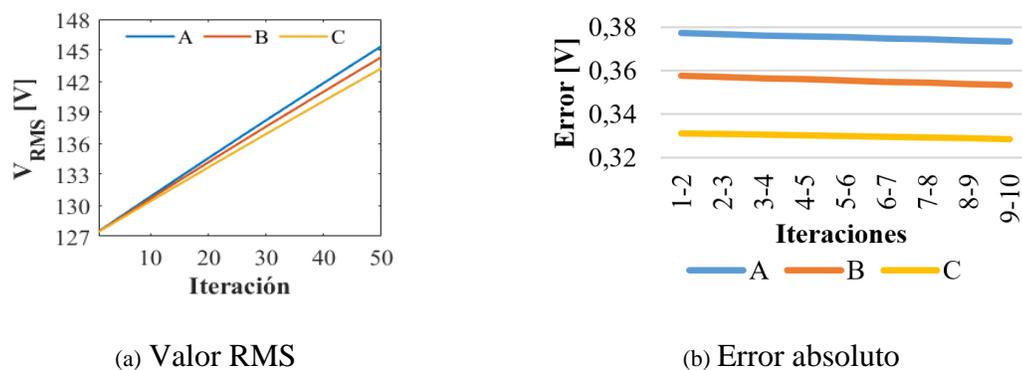
*Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 1.*



Por otro lado, la figura 32 presenta la evolución del valor eficaz de las tensiones de fase del nodo TP4 para el enfoque 2, mostrando que aun cuando el error absoluto entre los valores eficaces disminuye con el paso de las iteraciones, los valores eficaces de la tensión van en un aumento constante llegando a valores de 145,4 V en la fase A, 144,3 V en la fase B y 143,3 V en la fase C.

**Figura 32.**

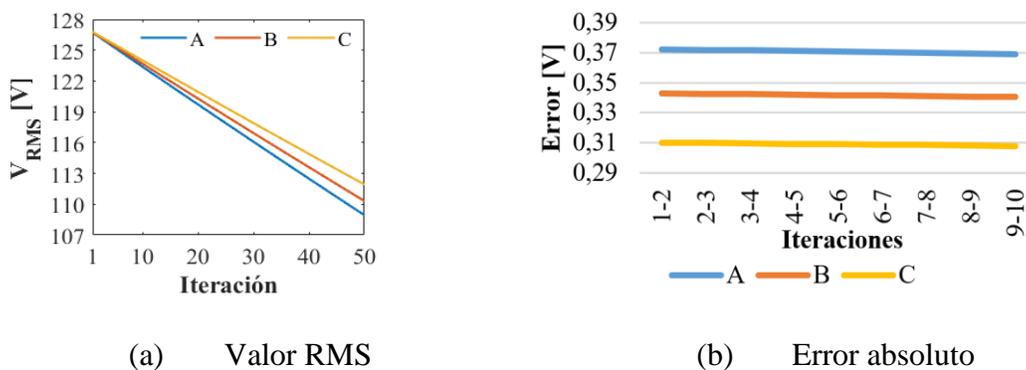
*Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 2.*



Un comportamiento similar al de la Figura 31(a) se presenta en la evolución del valor eficaz de las tensiones de fase del nodo TP4 para el enfoque 3 como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La diferencia entre estas dos figuras está en que los valores eficaces del enfoque 3 son menores a 110 V en las iteraciones mayores a la número 50 y los errores absolutos disminuyen progresivamente desde 0,37 V para la fase A, 0,34 V para la fase B y 0,31 V para la fase C.

**Figura 33.**

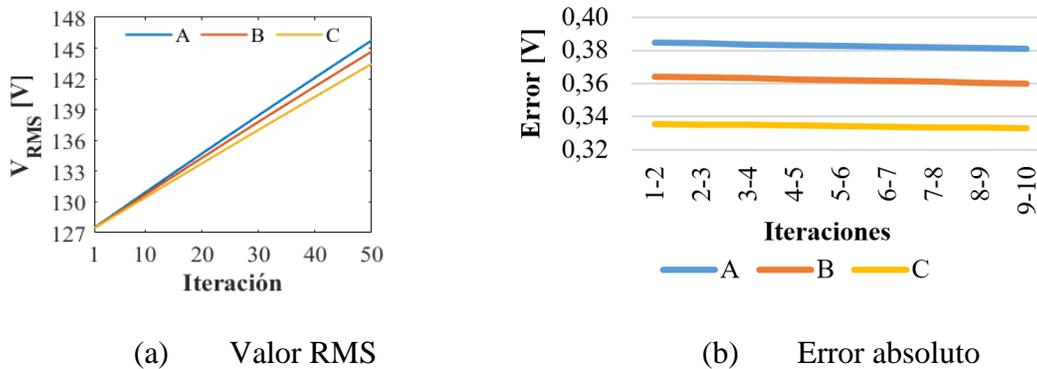
*Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 3.*



Ahora bien, en la evolución del valor eficaz de las tensiones de fase para el enfoque 4, mostrado en la Figura 34, el comportamiento de los valores eficaces y de los errores absolutos es muy similar al presentado en la Figura 32. Cabe resaltar que el planteamiento de ecuaciones de los elementos de la matriz Jacobiana de estos dos enfoques es totalmente distinto aun cuando sus resultados son similares.

**Figura 34.**

*Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 4.*

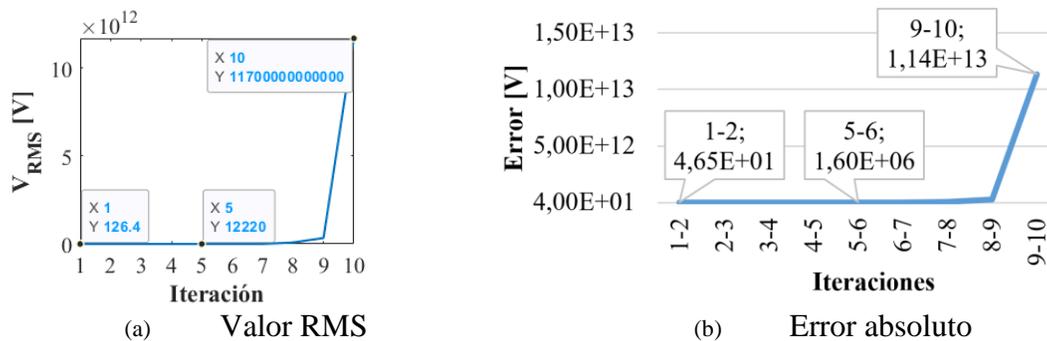


Por último, la Figura 35 muestra la evolución del valor eficaz de las tensiones de fase, aplicando el enfoque 5. La Figura 35(a) indica que el valor eficaz de las tensiones de fase aumenta de una forma descontrolada a medida que las iteraciones aumentan llegando a valores del orden de 1012 y los errores absolutos entre iteración actual e iteración futura (Figura 35(b)) tienen la misma tendencia de crecimiento que los valores eficaces, con diferencias mayores a 40 V desde la segunda iteración, señalando de esta forma que el método diverge.

La aplicación de este último enfoque tiene el propósito de descartar sospechas que indiquen que el problema de convergencia de los enfoques anteriores se deba al modelo de cargas aplicado, al planteamiento de la matriz Ybus para un sistema trifásico desbalanceado o a la distorsión armónica de la señal de alimentación de la red eléctrica.

**Figura 35.**

*Evolución del valor eficaz de las tensiones en el nodo TP4 en cada iteración para el enfoque 5.*



No obstante, se presume que la razón de la no convergencia de la estrategia puede encontrarse en el planteamiento de la matriz Jacobiana y/o en las características propias de la red de caso de estudio, lo cual lleva a plantear preguntas de exploración como ¿Qué características debe tener la red eléctrica de estudio para evitar problemas de convergencia? o ¿Cómo puede plantearse la matriz Jacobiana para evitar problemas de convergencia?

Lo anterior se ha mencionado con frecuencia en la literatura como una desventaja de los métodos de solución de flujos de potencia tradicionales como Newton-Raphson (Al-sakkaf & AlMuhaini, 2018; Eminoglu & Hocaoglu, 2005; Milovanović et al., 2020; Ouali & Cherkaoui, 2020; Rupa & Ganesh, 2014; Suchite-Remolino et al., 2020; X. Wang et al., 2018), los cuales fueron propuestos originalmente para estudiar sistemas de transmisión. De igual forma, al ser aplicados a redes distribución, el algoritmo puede tener problemas de convergencia debido a las características propias de las redes de distribución, y por ende en la construcción de la matriz Jacobiana.

Es preciso destacar que, en la literatura no se encontró un planteamiento del método Newton-Raphson unificado con ecuaciones específicas, dejando así el desarrollo de ecuaciones a

los investigadores de una forma abierta para proponer distintos enfoques de trabajo (Sereeter et al., 2019).

## 5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se realiza un análisis de desempeño de cinco estrategias de estimación de flujos de potencia (Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff, Backward/Forward basada en aritmética de intervalos, PowerFactory, Simulink y Newton-Raphson), adaptadas a las condiciones de operación de la red eléctrica del Piso 4º del Edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. El modelado de la red eléctrica tiene en cuenta las cargas monofásicas no lineales de iluminación y extractores de aire, y el sistema FV instalado en la terraza del edificio. Estos elementos son representados con modelos en el dominio de la frecuencia. Las estrategias Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff y Backward/Forward basada en aritmética de intervalos utilizan el modelo Norton equivalente de matriz de admitancia acoplada; la estrategia PowerFactory, utiliza el modelo de fuente de corriente; y la estrategia Simulink, utiliza el modelo Norton equivalente de matriz de admitancia desacoplada. La señal de tensión en el barraje de alimentación de BT del edificio es modelada como una fuente con distorsión armónica similar a una señal Flat-Top.

Cuatro estrategias de solución (Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff, Backward/Forward basada en aritmética de intervalos, PowerFactory y Simulink) fueron adaptadas a las condiciones características de la red de caso de estudio, estimando las señales de

tensión en los nodos y corrientes en ramales. No obstante, la adaptación de la estrategia Newton-Raphson tuvo inconvenientes en la convergencia del método, sin llegar a un resultado concreto de las señales de tensión estimadas por el mismo.

Existen sospechas que los problemas de convergencia tenidos con la estrategia Newton-Raphson para este caso específico, se relacionan con la creación de la matriz Jacobiana la cual tiene una estrecha relación con los datos de la matriz  $Y_{bus}$ , y por ende con la propia red eléctrica en estudio y sus características. Sin embargo, no hay evidencia contundente que pruebe lo anterior.

La evaluación del desempeño de las cuatro estrategias adaptadas aborda cuatro aspectos: formas de onda de tensión y corriente, valores eficaces de tensión y corriente, parámetros de potencia y parámetros de calidad de la potencia eléctrica. El desempeño de las estrategias en términos de las formas de onda es evaluado con los índices RMSE, NRMSE, MSE y MAE; el desempeño de las estrategias en términos de los valores eficaces, los parámetros de potencia y los parámetros de calidad (índice de desbalance de tensión y los índices de distorsión armónica) fueron evaluados con errores relativos y errores absolutos.

En este trabajo de investigación se establece una métrica de evaluación mediante intervalos de error, para los cuales se le asigna a cada intervalo un adjetivo calificador de desempeño y a cada calificador se le asigna una representación visual (✓ - Inadecuado, ✓✓ - Regular, ✓✓✓ - Aceptable, ✓✓✓✓ - Adecuado, ✓✓✓✓✓ - Excelente).

La estrategia Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff fue tomada como referencia para comparar las otras estrategias. Se planteó su desempeño general en los aspectos evaluados es excelente, debido a que dentro de los modelos de carga en el dominio de la frecuencia trabajados en la investigación, el modelo Norton equivalente de matriz de admitancia acoplada presenta en la literatura resultados precisos en la estimación de la corriente de una carga no lineal (Caicedo et al.,

2017; Guo et al., 2019; Martínez-Penalosa et al., 2019; Martínez-Peñaloza & Osma-Pinto, 2021; Muller et al., 2018; Tavukcu et al., 2019; Xu et al., 2018). Además, en la literatura se menciona la necesidad de utilizar modelos que representen la interacción armónica entre señales de tensión y corriente de las cargas (Arabsalmanabadi et al., 2017; Garcés Ruiz et al., 2004; Gárces Ruiz et al., 2005; Milovanović et al., 2019; Tagore & Gupta, 2017).

En el aspecto de formas de onda de tensión, las estrategias obtuvieron un desempeño excelente. Por el contrario, en la evaluación del desempeño en término de las formas de onda de las señales de corriente, la estrategia PowerFactory obtuvo un desempeño adecuado, y la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos obtuvo un desempeño aceptable. Para el caso de la estrategia Simulink, su desempeño general es aceptable; sin embargo, en los escenarios de baja irradiancia solar, los índices de evaluación superaron el 10% lo cual indica un desempeño inadecuado en la estimación de formas de onda de las señales de corriente.

Evaluando el desempeño de las estrategias en términos de los valores eficaces de las tensiones, las estrategias obtuvieron distintas valoraciones. La estrategia PowerFactory obtuvo un desempeño general excelente con errores máximos menores al 0,1%, mientras que la estrategia Simulink obtuvo un desempeño general adecuado con errores máximos entre el 0,1% y el 0,9%, y la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos obtuvo un desempeño general aceptable, con errores máximos entre el 1,0 V y el 5,0 V. En el caso de la evaluación de los valores eficaces de las señales de corriente, las estrategias Simulink y PowerFactory obtuvieron un desempeño aceptable, mientras que la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos tiene un desempeño regular, al obtener errores entre el 6,0 A y el 10 A. El desempeño general de estas estrategias con relación a la estimación de los valores eficaces de las señales de

corriente se ve afectado por el modelo del sistema FV empleado para escenarios de niveles de baja irradiancia solar.

En la revisión del aspecto de parámetros de potencia, el desempeño general en potencia aparente y potencia activa de las estrategias Simulink y PowerFactory fue aceptable, contrario del desempeño general de Backward/Forward basada en aritmética de intervalos, el cual es inadecuado. Ahora bien, en términos de evaluar el desempeño del factor de potencia, las tres estrategias presentan valoraciones distintas; Simulink obtuvo una evaluación aceptable, mientras que PowerFactory obtuvo una evaluación adecuada y, por último, Backward/Forward basada en aritmética de intervalos obtuvo una evaluación excelente. En el caso de la potencia no activa, las estrategias Simulink y Backward/Forward basada en aritmética de intervalos lograron un desempeño general inadecuado contrario del desempeño general aceptable de la estrategia PowerFactory.

En la estimación de los parámetros de calidad de la potencia eléctrica relacionados con la tensión (desbalance de tensión, distorsión armónica individual de tensión IHDv y distorsión armónica total de tensión THDv), el desempeño de las estrategias PowerFactory y Simulink es excelente con errores máximos menores a 0,1%; por el contrario, la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos tiene un desempeño excelente respecto al índice de desbalance de tensión (errores máximos menores a 0,1%), y adecuado respecto a los índices de distorsión armónica de tensión (errores máximos entre 0,1% y 0,9%).

Cabe resaltar que, los índices de desbalance de tensión estimados por las cuatro estrategias no superaron el 0,4%, estando muy por debajo del límite que la normativa colombiana (2,0% por NTC 5001 (NTC 5001 - Calidad de La Potencia Eléctrica. Límites y Metodología de La Evaluación En Punto de Conexión Común, 2008)) y estándares internacionales (5,0% IEEE 1159 de 2019

(Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014)) establecen para indicar cuando la presencia de cargas monofásicas está impactando a un sistema trifásico. En términos de los índices IHDv y THDv, los valores estimados por las estrategias no superan los límites establecidos en la IEEE 519 de 2014 (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2014) del 5,0% y del 8,0%, respectivamente.

En cuanto al índice de distorsión armónica total de corriente THDi, el desempeño de la estrategia PowerFactory fue excelente (errores máximos menores a 0,1%), mientras que el desempeño obtenido por la estrategia Backward/Forward basada en aritmética de intervalos es aceptable (errores máximos entre 1% y 5%); contrario del desempeño de la estrategia Simulink el cual es inadecuado en todos los escenarios de operación planteados (errores máximos mayores a 10%).

En general, el análisis de desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencia evidencia que el modelo de cargas no lineales empleado en el modelado y solución de flujos de potencia influye en gran parte de los resultados de la estimación de las señales de tensión los nodos y corrientes en ramas de la red eléctrica que se esté estudiando.

También conviene destacar que, la elección de la red eléctrica que supone el estudio de flujo de potencia puede afectar el desarrollo y adaptación de estrategias de solución que no estén condicionadas y planteadas a las características de las redes, como por ejemplo redes de distribución, las cuales tienden a llamarse redes mal condicionadas por sus características de: desbalance en las cargas, topología radial, tener generación distribuida, entre otras.

De igual forma, se puede evidenciar que la técnica de barrido para solucionar flujos de potencia Backward/Forward, y el uso de software o herramientas computacionales como PowerFactory y Simulink pueden ser ajustados y aplicados a redes eléctricas con características

de no linealidad en las cargas, que además considere que la señal de tensión de alimentación está distorsionada, así como diferentes topologías de cargas (monofásicas, bifásicas y trifásicas) y la posibilidad de integrar sistemas de generación eléctrica de fuentes renovables y distribuida en el sistema eléctrico, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía.

Como trabajo futuro de este trabajo de investigación se plantea realizar una evaluación del desempeño de las estrategias de solución de flujos de potencias analizadas comparando los resultados de cada una de estas con datos reales obtenidos a partir de la monitorización de la red eléctrica del Piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander.

Asimismo, se propone explorar y ahondar en la búsqueda de soluciones al problema de convergencia que los métodos de solución de flujos de potencia basados en ecuaciones no lineales, como Newton-Raphson, tienen al estudiar las redes eléctricas de distribución, identificando cuales características de las redes de distribución ocasionan la divergencia de estos métodos, y cómo podría modificarse el planteamiento matemático de los métodos para lograr unos resultados concretos.

Otro aspecto a explorar como trabajo futuro es la posible desviación de tiempo que existe en las simulaciones realizadas debido al uso del modelo Norton equivalente planteado. Dado que el modelo Norton equivalente no es un modelo independiente de la ubicación de una referencia de tiempo específica (ej.  $t=0$ ), se hace necesario ajustar las señales de tensión de referencia en las estrategias de solución con el propósito de evitar una desviación en el tiempo de las señales de corriente estimadas por el modelo cuando se someten a estas señales. No obstante, las herramientas computacionales y software no permiten realizar este ajuste a las señales de tensión, por lo que se vería necesario realizar una corrección de ángulos de fase en las señales de corriente para igualar la referencia de tiempo del modelo con la referencia de tiempo de la simulación.

**Referencias Bibliográficas**

- Al-sakkaf, A., & AlMuhaini, M. (2018). Power Flow Analysis of Weakly Meshed Distribution Network Including DG. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(5), 3398–3404.
- Anderson, P. M. (1995). Analysis of Faulted Power Systems. In *IEEE PRESS*. IEEE Press power system engineering series. <https://doi.org/10.1109/9780470544129>
- Arabsalmanabadi, B., Javadi, A., & Al-Haddad, K. (2017). Harmonic power flow in unbalanced and polluted radial distribution systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1504–1509. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.7915589>
- Balamurugan, K., & Srinivasan, D. (2011). Review of power flow studies on distribution network with distributed generation. *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, December*, 411–417. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147281>
- Blanco, A. M., Gupta, M., Castro, A. G. De, Rönnerberg, S., & Meyer, J. (2018). Impact of flat-top voltage waveform distortion on harmonic current emission and summation of electronic household appliances. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ*, 1(16), 698–703.
- Bosovic, A., Renner, H., Abart, A., Traxler, E., Meyer, J., Domagk, M., & Music, M. (2016). Validation of aggregated harmonic current source models based on different customer type configurations. *10th International Conference - 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016, Proceedings*, 77–84. <https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724093>

- Caicedo, J. E., Romero, A. A., & Zini, H. C. (2017). Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction. *2017 3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/PEPQA.2017.7981641>
- Cataliotti, A., Cosentino, V., Di Cara, D., Russotto, P., Telaretti, E., & Tine, G. (2016). An Innovative Measurement Approach for Load Flow Analysis in MV Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 889–896. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2430891>
- Correa, H. P., & Vieira, F. H. T. (2020). Matrix-Based Generalization for Power-Mismatch Newton-Raphson Load Flow Computations with Arbitrary Number of Phases. *IEEE Access*, 8, 40261–40268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976770>
- D’Orto, M. (2021). *Comparing Different Approaches for Solving Large Scale Power-Flow Problems with the Newton-Raphson Method*. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- D’Orto, M., Sjoblom, S., Chien, L. S., Axner, L., & Gong, J. (2021). Comparing Different Approaches for Solving Large Scale Power-Flow Problems with the Newton-Raphson Method. *IEEE Access*, 9, 56604–56615. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072338>
- Das, B. (2006). Consideration of input parameter uncertainties in load flow solution of three-phase unbalanced radial distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1088–1095. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.876698>
- Deng, Z., Todeschini, G., Koo, K. L., & Mulimakwenda, M. (2021). Modelling renewable energy sources for harmonic assessments in DIgSILENT PowerFactory: Comparison of different approaches. *Proceedings of the 11th International Conference on Simulation and Modeling*

- Methodologies, Technologies and Applications, SIMULTECH 2021, Simultech*, 130–140.  
<https://doi.org/10.5220/0010580101300140>
- Duncan Glover, J. (2004). *Sistemas de potencia - Análisis y diseño* (Tercera ed). International Thomson Editores.
- Eminoglu, U., & Hocaoglu, M. H. (2005). A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models. *Electric Power Systems Research*, 76(1–3), 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.05.008>
- Eminoglu, U., & Hocaoglu, M. H. (2009). Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: A review and comparison study. *Electric Power Components and Systems*, 37(1), 91–110. <https://doi.org/10.1080/15325000802322046>
- Garcés Ruiz, A., Galvis Manso, J. C., & Gallego, R. A. (2004). Flujo De Carga Armónico Para Sistemas Radiales. *Scientia Et Technica*, 10(25), 65–70.  
<https://doi.org/10.22517/23447214.7187>
- Gárces Ruiz, A., Galvis Manso, J. C., & Gallego, R. A. (2005). Análisis de sistemas de distribución radiales bajo condiciones de polución armónica. *Revista de Ingeniería*.
- Grainger, J., & Stevenson, W. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia* (Primera ed). McGraw-Hill.
- Guo, Z., Al-Shibli, N., Xiao, X., Djokic, S., Collin, A., Langella, R., Testa, A., Papic, I., Blanco, A., & Meyer, J. (2019). Aggregate Harmonic Load Models of Residential Customers. Part 2: Frequency-Domain Models. *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905621>

- Hussain, T., Min Ullah, F. U., Muhammad, K., Rho, S., Ullah, A., Hwang, E., Moon, J., & Baik, S. W. (2021). Smart and intelligent energy monitoring systems: A comprehensive literature survey and future research guidelines. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 3590–3614. <https://doi.org/10.1002/er.6093>
- Ibrahim, I. A., Hossain, M. J., & Ibrahim, I. A. (2021). Low Voltage Distribution Networks Modeling and Unbalanced (Optimal) Power Flow: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 9, 143026–143084. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120803>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. (2010). *IEEE Std. 1459-2010. Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. (2014). *IEEE Std. 519-2014. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (Vol. 2014).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. (2018). *IEEE Std. 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*.
- NTC 5001 - Calidad de la Potencia Eléctrica. Límites y Metodología de la Evaluación en Punto de Conexión Común, 62 (2008).
- Khan, Z. A., Hussain, T., & Baik, S. W. (2022). Boosting energy harvesting via deep learning-based renewable power generation prediction. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101815. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101815>
- Lin, W., Zhan, T., & Tsay, M. (2004). Multiple-Frequency Three-Phase Load Flow for Harmonic Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 897–904.

- Marín, J. A., Jurado, M. F., Pérez, F. E., Arcos, H. N., & Quilumba, F. L. (2017). Study and analysis of harmonic disturbances in the network of the quito electric company to the incorporation of the metro system in quito. *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017, 2017-Janua*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2017.8126747>
- Martínez-Peñaloza, A., Carrillo-Sandoval, L., Malagón-Carvajal, G., Duarte-Gualdrón, C., & Osma-Pinto, G. (2020). Determination of parameters and performance analysis of load models for fluorescent recessed lightings before power supply signal. *DYNA (Colombia)*, 87(215), 163–173. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.85239>
- Martínez-Penaloza, A., Carrillo-Sandoval, L., & Osma-Pinto, G. (2019). Determination and Performance Analysis of the Norton Equivalent Models for Fluorescents and LED Recessed Lightings. *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/PEPQA.2019.8851554>
- Martínez-Peñaloza, A., & Osma-Pinto, G. (2021). Analysis of the performance of the Norton equivalent model of a photovoltaic system under different operating scenarios. *International Review of Electrical Engineering - IREE*, 16(4).
- MathWorks. (n.d.). *How Simscape Electrical Specialized Power Systems Software Works*. Retrieved July 16, 2022, from <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/how-simpowersystems-software-works.html>
- Milovanović, M., Radosavljević, J., & Perović, B. (2020). A backward/forward sweep power flow method for harmonic polluted radial distribution systems with distributed generation units.

- International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(5), 1–17.  
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12310>
- Milovanović, M., Radosavljević, J., Perović, B., & Dragičević, M. (2019). Power flow in radial distribution systems in the presence of harmonics. *IJEEC - INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING*, 2(1), 10–19.  
<https://doi.org/10.7251/ijeec1801011m>
- Moore, R. E., Kearfott, R. B., & Cloud, M. J. (2009). Introduction to Interval Analysis. In *Society for Industrial and Applied Mathematics* (Vol. 1, Issue 1).  
<https://doi.org/10.3156/jsoft.15.147>
- Moreno Jaramillo, A. F., Lavery, D. M., Morrow, D. J., Martinez del Rincon, J., & Foley, A. M. (2021). Load modelling and non-intrusive load monitoring to integrate distributed energy resources in low and medium voltage networks. *Renewable Energy*, 179, 445–466.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.056>
- Muller, S., Meyer, J., Myrzik, J., Langella, R., Testa, A., Xu, X., Collin, A., & Djokic, S. (2018). Aggregate harmonic fingerprint models of PV inverters. Part 2: Operation of parallel-connected units. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2018-May(Lv)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378835>
- Oliveira, L. C. O., E Melo, G. A., Souza, J. B., Canesin, C. A., Bonatto, B. D., Belchior, F. N., Oliveira, M., & Mertens, E. A. (2011). Harmonic propagation analysis in electric energy distribution systems. *Proceeding of the International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, 528–533. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128827>

- Oskouei, M. Z., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). Integration of Renewable Energy Sources Into the Power Grid Through PowerFactory. In *Www.Springer.Com*.  
<https://www.springer.com/gp/book/9783030443757>
- Osma-Pinto, G., & Ordóñez-Plata, G. (2019a). Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy*, 185.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>
- Osma-Pinto, G., & Ordóñez-Plata, G. (2019b). Measuring the effect of forced irrigation on the front surface of PV panels for warm tropical conditions. *Energy Reports*, 5, 501–514.  
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.010>
- Ouali, S., & Cherkaoui, A. (2020). An Improved Backward/Forward Sweep Power Flow Method Based on a New Network Information Organization for Radial Distribution Systems. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020.  
<https://doi.org/10.1155/2020/5643410>
- Padilha-Feltrin, A., Gallego, L. A., & López-Lezama, J. M. (2008). Flujo De Potencia En Sistemas De Distribución Considerando Incertidumbre En La Demanda Y En Los Parámetros De Los Alimentadores. *Scientia Et Technica*, 14(39), 25–30.  
<https://doi.org/10.22517/23447214.3139>
- Pereira, L. E. S., Da Costa, V. M., & Rosa, A. L. S. (2012). Interval arithmetic in current injection power flow analysis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 43(1), 1106–1113. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.034>
- Rupa, J. A. M., & Ganesh, S. (2014). Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward / Forward Sweep Method. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 8(10), 1537–1541.

- Sereeter, B., Vuik, C., & Witteveen, C. (2019). On a comparison of Newton–Raphson solvers for power flow problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 360, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.04.007>
- Sereeter, B., Vuik, K., & Witteveen, C. (2017). Newton power flow methods for unbalanced three-phase distribution networks. *Energies*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/en10101658>
- Stott, B. (1974). Review of Load-Flow Calculation Methods. *Proceedings of the IEEE*, 62(7), 916–929. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9544>
- Suchite-Remolino, A., Ruiz-Paredes, H. F., & Torres-Garcia, V. (2020). A New Approach for PV Nodes Using an Efficient Backward/Forward Sweep Power Flow Technique. *IEEE Latin America Transactions*, 18(6), 992–999. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9099675>
- T. Srinivasa Rao, & P. Mallikarajuna Rao. (2015). Solving Electrical Power Flow Problems using Intervals Arithmetic. *International Journal of Engineering Research And*, V4(04), 1327–1331. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041435>
- Tagore, A. K., & Gupta, A. R. (2017). Harmonic load flow analysis of radial distribution system in presence of distributed generation. *International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2017*, 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081077>
- Taheri, R., Khajezadeh, A., Rezaeian Koochi, M. H., & Sharifi Nasab Anari, A. (2019). Line independency-based network modelling for backward/forward load flow analysis of electrical power distribution systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(6), 4551–4566. <https://doi.org/10.3906/ELK-1812-137>
- Tavukcu, E., Müller, S., & Meyer, J. (2019). Assessment of the performance of frequency domain models based on different reference points for linearization. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 17(17), 435–440. <https://doi.org/10.24084/repqj17.337>

- Thongkrajay, U., Poolsawat, N., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2006). Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation in Unbalanced Three-phase Power Distribution Systems. *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, 2006*, 24–29.
- Variz, A. M., Pereira, J. L. R., Carneiro, S., & Barbosa, P. G. (2009). Harmonic analysis of the power distribution Neutral-to-Earth Voltage (NEV) test case using four-wire three-phase harmonic current injection method. *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*, 10–16. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275758>
- Variz, A. M., Pereira, J. L. R., Carneiro, S. J., & Barbosa, P. G. (2000). Three-phase harmonic power flow using the current injection method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2), 508–514. <https://doi.org/10.1109/59.867133>
- Wang, X., Shahidehpour, M., Jiang, C., Tian, W., Li, Z., & Yao, Y. (2018). Three-Phase Distribution Power Flow Calculation for Loop-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4), 3955–3967. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2788055>
- Wang, Z., & Alvarado, F. L. (1992). Interval Arithmetic in Power Flow Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1341–1349.
- Xu, X., Collin, A., Djokic, S., Muller, S., Meyer, J., Myrzik, J., Langella, R., & Testa, A. (2018). Aggregate harmonic fingerprint models of PV inverters. part 1: Operation at different powers. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2018-May*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378824>
- Yadaiah, C., Goswami, S. K., & Chatterjee, D. (2016). Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 83, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.03.043>

- Yang, N. C., & Chen, H. C. (2018). Decomposed Newton algorithm-based three-phase power-flow for unbalanced radial distribution networks with distributed energy resources and electric vehicle demands. In *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (Vol. 96, pp. 473–483). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.042>
- Zhang, F., & Cheng, C. S. (1997). A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis. *IEEE Power Engineering Review*, 17(2), 68.

## Apéndices

### Apéndice A. Estrategias de solución de flujos de potencia

Este apéndice muestra pseudocódigos de los algoritmos de las estrategias de solución Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff, Backward/Forward basada en aritmética de intervalos y Newton-Raphson, PowerFactory y Simulink.

---

Algoritmo 1: Backward/Forward basado en leyes de Kirchhoff

---

1: Ingreso de parámetros de conductores ( $R_F, X_F, R_N, X_N$ , fase A, fase B, fase C y neutro)

2: Datos de nodos

-Especificar el tipo de nodo (SLACK, PV o PQ) y fases (A, B y/o C)

3: Ingreso del modelo Norton equivalente de cargas y sistema FV

$$\text{Cargas} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]$$

$$\text{Sistema FV} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]P$$

4: Ingresar la cantidad de cargas por circuito

5: Creación de las conexiones de la red eléctrica

-Definición de hipermatrices correspondientes a las conexiones entre los nodos, las corrientes de los conductores y las tensiones en los nodos

-Establecer la conexión entre nodos teniendo en cuenta los parámetros de los conductores y la topología de cada uno (trifásico, bifásico o monofásico)

6: Inicialización de las tensiones en los nodos de la red

---

---

7: iteración =1

**while** iteración<=10

**for** k=1:4

-Cálculo de corrientes por fase inyectadas a cada nodo

$$I_L$$

-Cálculo de corrientes en los conductores utilizando las corrientes inyectadas a los nodos

$$I_B = I_L + \sum I_{i,N}$$

-Cálculo de las caídas de tensión en los conductores

$$I_B Z$$

-Reinicio de la tensión en el nodo SLACK

-Cálculo de tensiones en nodos inferiores al nodo SLACK

$$V_N = V_{N-1} + I_B Z$$

-Almacenamiento de tensiones y corrientes

**end**

**end**

8: Criterio de convergencia

$$|V^{iteracion+1} - V^{iteracion}| \cong 0$$

9: Valores de tensión y corrientes deseados

---



---

Algoritmo 2: Backward/Forward basado en aritmética de intervalos

---

1: Ingreso de parámetros de conductores ( $R_F, X_F, R_N, X_N$ , fase A, fase B, fase C y neutro)

2: Datos de nodos

---

---

-Especificar el tipo de nodo (SLACK, PV o PQ) y fases (A, B y/o C)

3: Ingreso del modelo Norton equivalente de cargas y sistema FV

$$\text{Cargas} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]$$

$$\text{Sistema FV} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]P_{superior} \text{ y } [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]P_{inferior}$$

4: Ingresar la cantidad de cargas por circuito

5: Creación de las conexiones de la red eléctrica

-Definición de hipermatrices de límite superior(u) del intervalo definido correspondientes a las conexiones entre los nodos, las corrientes de los conductores y las tensiones en los nodos

-Definición de hipermatrices de límite inferior(l) del intervalo definido correspondientes a las conexiones entre los nodos, las corrientes de los conductores y las tensiones en los nodos

-Establecer la conexión entre nodos teniendo en cuenta los parámetros de los conductores y la topología de cada uno (trifásico, bifásico o monofásico) para límites superior e inferior definidos

6: Inicialización de las tensiones en los nodos de la red teniendo en cuenta los valores del intervalo de operación definido (Tensión límite inferior y tensión límite superior)

7: iteración =1

**while** iteración<=10

**for** k=1:4

-Cálculo de corrientes por fase inyectadas a cada nodo para límites superior e inferior del intervalo definido

$$I_{Lu} \text{ y } I_{Ll}$$

-Cálculo de corrientes en los conductores utilizando las corrientes inyectadas a los nodos para límites superior e inferior del intervalo definido

$$I_{Bu} = I_{Lu} + \sum I_{i,Nu} \text{ y } I_{Bl} = I_{Ll} + \sum I_{i,Nl}$$


---

---

-Cálculo de las caídas de tensión en los conductores para límites superior e inferior del intervalo definido

$$I_{Bu}Z \text{ y } I_{Bl}Z$$

-Reinicio de la tensión en el nodo SLACK

-Cálculo de tensiones en nodos inferiores al nodo SLACK para límites superior e inferior del intervalo definido

$$V_{Nu} = V_{(N-1)u} + I_{Bu}Z \text{ y } V_{Nl} = V_{(N-1)l} + I_{Bl}Z$$

-Almacenamiento de tensiones y corrientes

**end**

**end**

8: Criterio de convergencia

$$|V^{iteracion+1} - V^{iteracion}| \cong 0$$

9: Valores de tensión y corrientes deseados

---



---

Algoritmo 3: Newton-Raphson

---

1: Datos de nodos

-Especificar el tipo de nodo (SLACK, PV o PQ) y fases (A, B y/o C)

2: Ingreso de la Ybus

3: Ingreso del modelo Norton equivalente de cargas y sistema FV

$$\text{Cargas} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]$$

$$\text{Sistema FV} \rightarrow [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]P$$

4: Creación de la hipermatriz de tensión de nodos

---

5: Inicialización de las tensiones en los nodos

6: iteración=1

**while** iteración<=50

**for** k=1:4

-Cálculo de corrientes de las cargas y sistema FV por fase

$$F_i^p \text{ y } H_i^p$$

-Cálculo de corrientes calculadas  $\Delta F_i$  y  $\Delta H_i$

$$\Delta F_i^p = F_i^p - F_{cal,i}^p = F_i^p - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \cos(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi)$$

$$\Delta H_i^p = H_i^p - H_{cal,i}^p = H_i^p - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \sin(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi)$$

-Cálculo de las submatrices Jacobiana  $J_1, J_2, J_3$  y  $J_4$

-Actualización de tensiones

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{h+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^h + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix}^h$$

**end**

- Criterio de convergencia

$$|V^{iteracion+1} - V^{iteracion}| \cong 0$$

-Almacenamiento de tensiones y corrientes

**end**

7: Valores de tensión y corrientes deseados

### Apéndice B. Modelos Norton equivalente de luminarias, extractores y sistema fotovoltaico

Este apéndice muestra los modelos Norton equivalente de matriz de admitancias acoplada y desacoplada empleados en el trabajo de investigación y describe brevemente aspectos generales sobre su adquisición.

- Luminarias fluorescentes On-Off

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,8265 - 0,0096i & -0,0023 + 0,0002i & -0,0001 - 4,08e^{-5}i & -0,000 - 9,56e^{-7}i & -0,0002 - 3,28e^{-6}i \\ -0,0684 + 0,0033i & 0,0003 - 5,81e^{-5}i & 0,0044 + 0,0002i & -0,0002 + 2,67e^{-6}i & -0,0002 + 1,16e^{-5}i \\ -0,0087 + 0,0052i & -3,96e^{-5} - 2,86e^{-5}i & -0,0002 - 6,35e^{-5}i & 0,0043 + 0,0001i & -0,0002 + 2,02e^{-5}i \\ -0,0044 + 0,0032i & -2,96e^{-5} - 1,55e^{-5}i & -0,0002 + 4,43e^{-5}i & -0,0002 - 4,23e^{-5}i & 0,0043 + 0,0002i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,8265 - 0,0096i & -0,0023 + 0,0002i & 0 & 0 & 0 \\ -0,0684 + 0,0033i & 0 & 0,0044 + 0,0002i & 0 & 0 \\ -0,0087 + 0,0052i & 0 & 0 & 0,0043 + 0,0001i & 0 \\ -0,0044 + 0,0032i & 0 & 0 & 0 & 0,0043 + 0,0002i \end{bmatrix}$$

- luminarias fluorescentes dimerizables

-0Vdc

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,2775 + 0,0050i & -0,0008 + 0,0001i & -0,0002 - 4,35e^{-5}i & -0,0001 - 3,44e^{-5}i & -8,65e^{-5} - 3,14e^{-5}i \\ -0,0507 + 0,0053i & 0,0001 - 5,33e^{-5}i & 0,0020 + 0,0003i & -0,0006 - 7,92e^{-6}i & -0,0002 - 2,7e^{-5}i \\ -0,0067 + 0,0012i & -1,68e^{-6} - 2,77e^{-5}i & -0,0005 + 1,70e^{-5}i & 0,0020 + 0,0005i & -0,0006 + 1,93e^{-5}i \\ -0,0039 - 0,0003i & 9,67e^{-6} - 1,69e^{-5}i & -0,0002 - 3,76e^{-5}i & -0,0005 + 1,96e^{-5}i & 0,0021 + 0,0007i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,2775 + 0,0050i & -0,0008 + 0,0001i & 0 & 0 & 0 \\ -0,0507 + 0,0053i & 0 & 0,0020 + 0,0003i & 0 & 0 \\ -0,0067 + 0,0012i & 0 & 0 & 0,0020 + 0,0005i & 0 \\ -0,0039 - 0,0003i & 0 & 0 & 0 & 0,0021 + 0,0007i \end{bmatrix}$$

-10Vdc

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,9285 + 0,0013i & -0,0028 + 0,0001i & -0,0003 - 4,67e^{-5}i & -0,0002 - 1,23e^{-5}i & -0,0002 - 3,93e^{-5}i \\ -0,0862 + 0,0083i & 0,0003 - 7,23e^{-5}i & 0,005 + 0,0001i & -0,0006 + 3,10e^{-5}i & -0,0004 - 5,00e^{-5}i \\ -0,0015 + 0,0056i & -0,0001 - 3,0e^{-5}i & -0,0005 + 2,59e^{-5}i & 0,0054 + 0,0002i & -0,0006 + 1,45e^{-5}i \\ 0,0017 + 0,0040i & -7,54e^{-5} - 2,33e^{-5}i & -0,0004 + 6,19e^{-5}i & -0,0005 + 6,16e^{-5}i & 0,0053 + 0,0002i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,9285 + 0,0013i & -0,0028 + 0,0001i & 0 & 0 & 0 \\ -0,0862 + 0,0083i & 0 & 0,005 + 0,0001i & 0 & 0 \\ -0,0015 + 0,0056i & 0 & 0 & 0,0054 + 0,0002i & 0 \\ 0,0017 + 0,0040i & 0 & 0 & 0 & 0,0053 + 0,0002i \end{bmatrix}$$

- Extractor de aire

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,0030 + 0,0007i & 0,0037 + 0,0013i & 5,21e^{-5} - 8,04e^{-5}i & -4,22e^{-5} - 3,66e^{-6}i & 1,36e^{-5} - 4,56e^{-5}i \\ -0,0018 + 0,0018i & 0,0001 - 0,0002i & 0,01370 + 0,0018i & -0,0004 - 0,0002i & 6,18e^{-5} - 3,45e^{-5}i \\ 0,0001 - 0,0002i & 1,76e^{-5} + 2,48e^{-5}i & -0,0003 - 0,0005i & 0,0080 - 0,0091i & -0,0001 + 0,0002i \\ 8,52e^{-5} - 4,73e^{-5}i & 1,05e^{-6} - 7,58e^{-7}i & 0,0001 + 9,56e^{-5}i & -0,0002 + 0,0001i & 0,0031 - 0,0074i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 0,0030 + 0,0007i & 0,0037 + 0,0013i & 0 & 0 & 0 \\ -0,0018 + 0,0018i & 0 & 0,01370 + 0,0018i & 0 & 0 \\ 0,0001 - 0,0002i & 0 & 0 & 0,0080 - 0,0091i & 0 \\ 8,52e^{-5} - 4,73e^{-5}i & 0 & 0 & 0 & 0,0031 - 0,0074i \end{bmatrix}$$

- Sistema fotovoltaico

-GincA

Fase A

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 17,4473 + 0,6025i & -0,0732 - 0,0033i & 0,0922 + 0,1185i & 0,0132 - 0,0554i & -0,1274 + 0,0735i \\ -0,1170 - 0,1799i & 0,0009 + 0,0012i & 0,0318 - 0,0221i & 0,0001 + 0,0015i & 0,0028 - 0,0010i \\ 0,0536 - 0,0190i & -0,0004 + 0,0007i & 0,0036 - 0,0214i & -0,0141 - 0,0165i & 0,0146 - 0,0097i \\ -0,0819 + 0,0256i & 0,0002 - 0,0001i & 0,0201 - 0,0164i & -0,0034 + 0,0007i & 0,0148 - 0,0374i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 17,4473 + 0,6025i & -0,0732 - 0,0033i & 0 & 0 & 0 \\ -0,1170 - 0,1799i & 0 & 0,0318 - 0,0221i & 0 & 0 \\ 0,0536 - 0,0190i & 0 & 0 & -0,0141 - 0,0165i & 0 \\ -0,0819 + 0,0256i & 0 & 0 & 0 & 0,0148 - 0,0374i \end{bmatrix}$$

Fase B

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]$$

$$= \begin{bmatrix} -9,3775 - 13,8427i & -0,0673 - 0,0027i & 0,1345 + 0,0177i & 0,0439 + 0,0391i & -0,1158 + 0,0647i \\ 0,0862 - 0,0224i & -0,0002 - 0,0007i & 0,0064 - 0,0188i & 0,0017 - 0,0029i & 0,0022 + 0,0036i \\ 0,1355 + 0,0012i & 0,0013 - 0,0006i & 0,0113 + 0,0055i & -0,0114 - 0,0134i & -0,0199 - 0,0172i \\ 0,01377 + 0,1514i & 0,0007 + 0,0004i & -0,0199 + 0,0042i & 0,0028 - 0,0001i & -0,0080 - 0,0328i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -9,3775 - 13,8427i & -0,0673 - 0,0027i & 0 & 0 & 0 \\ 0,0862 - 0,0224i & 0 & 0,0064 - 0,0188i & 0 & 0 \\ 0,1355 + 0,0012i & 0 & 0 & -0,0114 - 0,0134i & 0 \\ 0,01377 + 0,1514i & 0 & 0 & 0 & -0,0080 - 0,0328i \end{bmatrix}$$

Fase C

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]$$

$$= \begin{bmatrix} -10,4395 + 14,5585i & -0,0765 - 0,0163i & 0,1713 - 0,1126i & -0,0496 + 0,0200i & -0,1243 + 0,0505i \\ -0,2274 + 0,0985i & -0,0014 - 0,0012i & 0,01840 - 0,0267i & -0,0015 + 0,0015i & -0,0021 + 0,0050i \\ -0,2519 + 0,1967i & -0,0024 - 0,0012i & 0,0061 - 0,04164i & -0,0120 - 0,0150i & -2,52e^{-5} + 0,0190i \\ -0,0489 - 0,0111i & -0,0006 - 0,0006i & 0,0061 - 0,0215i & -2,67e^{-5} + 0,0107i & 0,0102 - 0,0162i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -10,4395 + 14,5585i & -0,0765 - 0,0163i & 0 & 0 & 0 \\ -0,2274 + 0,0985i & 0 & 0,01840 - 0,0267i & 0 & 0 \\ -0,2519 + 0,1967i & 0 & 0 & -0,0120 - 0,0150i & 0 \\ -0,0489 - 0,0111i & 0 & 0 & 0 & 0,0102 - 0,0162i \end{bmatrix}$$

-GincM

Fase A

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 14,4750 - 6,2554i & -0,0532 + 0,0477i & 0,1331 - 0,0115i & -0,0015 + 0,065i & 0,0637 - 0,0878i \\ 0,0562 - 0,2804i & -0,0002 + 0,0020i & 0,0035 - 0,0396i & 0,0031 + 0,0060i & 0,0036 - 0,0334i \\ 1,2718 + 1,3787i & -0,0093 - 0,0102i & 0,0245 + 0,0223i & -0,0216 - 0,0514i & -0,0148 + 0,0226i \\ -0,4440 + 0,0756i & 0,0031 - 0,0004i & -0,0110 - 0,0389i & 0,0061 + 0,0023i & 0,0110 - 0,0681i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 14,4750 - 6,2554i & -0,0532 + 0,0477i & 0 & 0 & 0 \\ 0,0562 - 0,2804i & 0 & 0,0035 - 0,0396i & 0 & 0 \\ 1,2718 + 1,3787i & 0 & 0 & -0,0216 - 0,0514i & 0 \\ -0,4440 + 0,0756i & 0 & 0 & 0 & 0,0110 - 0,0681i \end{bmatrix}$$

Fase B

$$\begin{aligned}
 & [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] \\
 & = \begin{bmatrix} -13,3977 - 6,1253i & -0,0349 + 0,0505i & 0,5163 - 0,5988i & -0,0402 - 0,0405i & 0,1609 - 0,0824i \\ 0,4753 + 0,1019i & 0,0017 - 0,0025i & -0,0385 - 0,0858i & -0,0089 + 0,0002i & -0,0055 - 0,0275i \\ -1,4737 + 0,5231i & -0,0018 + 0,0113i & 0,0957 - 0,0171i & -0,0050 - 0,0583i & 0,0364 + 0,0061i \\ -0,0322 + 0,1638i & 0,0003 + 0,0010i & 0,0107 - 0,0395i & -0,0043 - 0,0056i & -0,0037 - 0,0757i \end{bmatrix} \\
 \\ 
 & [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -13,3977 - 6,1253i & -0,0349 + 0,0505i & 0 & 0 & 0 \\ 0,4753 + 0,1019i & 0 & -0,0385 - 0,0858i & 0 & 0 \\ -1,4737 + 0,5231i & 0 & 0 & -0,0050 - 0,0583i & 0 \\ -0,0322 + 0,1638i & 0 & 0 & 0 & -0,0037 - 0,0757i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Fase C

$$\begin{aligned}
 & [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] \\
 & = \begin{bmatrix} -2,9642 + 14,8850i & -0,0520 + 0,0322i & 0,4604 - 0,1024i & 0,0357 - 0,0123i & 0,1025 - 0,0388i \\ 0,0284 - 0,0087i & 0,0002 + 0,0001i & 0,0022 - 0,0491i & 0,0022 - 0,0004i & 0,0076 - 0,0048i \\ 0,2036 - 1,6345i & 0,0112 - 0,0045i & -0,0198 - 0,1416i & -0,0105 - 0,0498i & -0,0178 - 0,0386i \\ 0,4532 - 0,4279i & 0,0040 + 0,0015i & 0,0157 - 0,045i & 0,0018 - 0,0072i & 0,0034 - 0,0666i \end{bmatrix} \\
 \\ 
 & [\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -2,9642 + 14,8850i & -0,0520 + 0,0322i & 0 & 0 & 0 \\ 0,0284 - 0,0087i & 0 & 0,0022 - 0,0491i & 0 & 0 \\ 0,2036 - 1,6345i & 0 & 0 & -0,0105 - 0,0498i & 0 \\ 0,4532 - 0,4279i & 0 & 0 & 0 & 0,0034 - 0,0666i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

-GincB

Fase A

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 38,6805 - 6,0512i & -0,2701 + 0,0155i & 9,6439 + 6,9394i & -1,6679 - 0,5483i & -0,2546 + 1,5498i \\ 0,04499 + 0,9868i & 0,0011 - 0,0081i & -0,3205 + 0,1213i & 0,0435 - 0,0334i & -0,0511 - 0,0342i \\ -2,0484 + 3,0577i & 0,0205 - 0,0207i & -1,6119 - 0,9346i & 0,2314 - 0,0443i & 0,0124 - 0,2908i \\ 0,8356 + 3,3833i & -0,0066 - 0,0279i & -0,4497 + 0,9047i & 0,0187 - 0,1215i & -0,0778 - 0,2115i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 38,6805 - 6,0512i & -0,2701 + 0,0155i & 0 & 0 & 0 \\ 0,04499 + 0,9868i & 0 & -0,3205 + 0,1213i & 0 & 0 \\ -2,0484 + 3,0577i & 0 & 0 & 0,2314 - 0,0443i & 0 \\ 0,8356 + 3,3833i & 0 & 0 & 0 & -0,0778 - 0,2115i \end{bmatrix}$$

Fase B

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 5,2464 - 28,9026i & -0,1591 - 0,1568i & 3,3061 + 4,7485i & 0,4517 - 1,3777i & 0,2788 - 0,0969i \\ -0,7105 - 1,7785i & -0,0157 + 0,0011i & 0,4038 - 0,1544i & -0,088 - 0,0609i & -0,0150 - 0,0145i \\ 2,2570 + 1,7301i & 0,0147 - 0,0154i & -0,6294 + 0,9081i & 0,2725 - 0,1317i & -0,0012 + 0,0480i \\ 1,6498 + 0,2649i & 0,0044 - 0,0128i & -0,2471 + 0,5489i & 0,1225 - 0,0198i & 0,0056 - 0,1454i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} 5,2464 - 28,9026i & -0,1591 - 0,1568i & 0 & 0 & 0 \\ -0,7105 - 1,7785i & 0 & 0,4038 - 0,1544i & 0 & 0 \\ 2,2570 + 1,7301i & 0 & 0 & 0,2725 - 0,1317i & 0 \\ 1,6498 + 0,2649i & 0 & 0 & 0 & 0,0056 - 0,1454i \end{bmatrix}$$

Fase C

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -30,6547 - 4,9429i & -0,0771 - 0,2472i & 6,6274 - 1,5414i & 0,7515 + 1,3534i & 1,7091 + 0,1827i \\ 0,0510 - 0,1952i & 0,0013 - 0,0003i & 0,0769 - 0,0729i & 0,0098 + 0,0038i & 0,0135 - 0,0037i \\ -4,1194 + 0,9110i & -0,0266 - 0,0163i & 0,1439 - 1,2945i & 0,2400 - 0,1332i & 0,1601 - 0,2365i \\ 0,8108 - 2,7423i & 0,0186 - 0,0094i & 0,2499 + 0,4305i & -0,0651 + 0,1067i & 0,0857 - 0,0254i \end{bmatrix}$$

$$[\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}] = \begin{bmatrix} -30,6547 - 4,9429i & -0,0771 - 0,2472i & 0 & 0 & 0 \\ 0,0510 - 0,1952i & 0 & 0,0769 - 0,0729i & 0 & 0 \\ -4,1194 + 0,9110i & 0 & 0 & 0,2400 - 0,1332i & 0,1601 - 0,2365i \\ 0,8108 - 2,7423i & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Aspectos generales para la adquisición de los modelos

Los modelos Norton equivalentes de las luminarias fluorescentes y extractor de aire son obtenidos a partir de la adquisición de señales de tensión y corriente medidas en un montaje experimental realizado en un laboratorio mediante un barrido de frecuencia con el experimento de un armónico a la vez.

El primer paso del barrido es alimentar la carga con una señal de tensión a frecuencia fundamental (60 Hz) variando la magnitud de la señal entre 115 V y 150 V, con  $\Delta V = 1$  V; el ángulo de fase se mantiene en  $0^\circ$ . El segundo y último paso del barrido es alimentar la carga con señales de tensión con componentes armónicas de 3<sup>er</sup>, 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup> orden. La magnitud de cada componente armónica toma valores de 1 V, 3 V, 5 V, 10 V, 15 V y 20 V, con variaciones de ángulos de fase entre  $0^\circ$  y  $300^\circ$ , con un paso de  $60^\circ$ . En este segundo paso, la magnitud de la componente fundamental se establece en un valor constante de 127 V.

En el caso del modelo Norton equivalente del sistema fotovoltaico la adquisición de las señales de tensión y corriente se realizó directamente en el punto de acople común entre la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica y el sistema FV. Fueron delimitados tres niveles de operación del sistema FV asociados a la irradiancia solar estableciendo intervalos de potencia generada y el índice de distorsión armónica total de corriente THDi.

El nivel de alta irradiancia solar se asocia a valores de potencia generada mayores a 2000 W con valores de THDi menores a 3,5%; el nivel de media irradiancia solar es asociado a potencias generadas entre 1000 W y 2000 W con índices THDi entre 3,5% y 10%. Por último, el nivel de baja irradiancia solar se asocia con valores de potencia generada menores a 1000 W y valores de THDi mayores a 10%.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo Norton equivalente del sistema FV tiene una correlación entre el valor RMS de la señal de corriente, la irradiancia solar y, por ende, la potencia generada, causando una modificación en la aplicación del enfoque original del modelo (Ecuaciones (4) y (5)).

$$\bar{I} = ([\bar{I}_{ref} \quad \bar{Y}]P) \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta\bar{V} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### Apéndice C. Señales de tensión condiciones iniciales

Este apéndice muestra los espectros de las señales de tensión empleadas como condiciones iniciales en los métodos iterativos Backward/Forward basada en leyes de Kirchhoff, Backward/Forward basada en aritmética de intervalos y Newton-Raphson, y herramientas computacionales PowerFactory y Simulink.

Estrategia	V <sub>1</sub>			α <sub>1</sub>			V <sub>3</sub>			α <sub>3</sub>			V <sub>5</sub>			α <sub>5</sub>			V <sub>7</sub>			α <sub>7</sub>			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
BF-NC	127	127	127	0	-	120	0,2	0,2	0,2	110	110	110	4,54,54,5	-175	-55	65	2	2	2	65	-55	-175			
AI-NC superior	133,4	133,4	133,4	0	-	120	0,170	0,170	0,170	80,680	680	65,15,15,1	178,9	-	59,71	0,061	0,061	0,061	82,3	-	-	40,5	154,7		
AI-NC inferior	127,9	127,9	127,9	0	-	120	0,170	0,170	0,17	-	-	-	3,93,93,9	-	-	64,71	1,141	1,141	1,141	52,5	-	173,8	66,8		
Newton Raphson	127	127	127	0	-	120	0,2	0,2	0,2	110	110	110	4,54,54,5	-175	-55	65	2	2	2	65	-55	-175			
PF-FC	127	127	127	0	-	120	0,2	0,2	0,2	110	110	110	4,54,54,5	-175	-55	65	2	2	2	65	-55	-175			
S-ND	127	127	127	0	-	120	0,2	0,2	0,2	110	110	110	4,54,54,5	-175	-55	65	2	2	2	65	-55	-175			