

**FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA  
DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA  
DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES**

**AUTOR:  
CRISTHIAN DAMIAN VEGA GUACOLLANTES**

**TUTOR:  
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

**Quito, julio 2020**

Cristhian Damian Vega Guacollantes

**FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Cristhian Damian Vega Guacollantes** (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Experimental Salesiano “Don Bosco” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos con características desbalanceadas. [cvegag@est.ups.edu.ec](mailto:cvegag@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Carlos Andrés Barrera Singaña** (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. [cbarrera@ups.edu.ec](mailto:cbarrera@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

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

**DERECHOS RESERVADOS**

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES*” realizado por Cristhian Damian Vega Guacollantes, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., julio de 2020



.....  
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Cristhian Damian Vega Guacollantes, con documento de identificación N° 1750302828, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., julio de 2020



.....

Cristhian Damian Vega Guacollantes

C.C.: 1750302828

## 1. ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	2
2	MARCO TEÓRICO .....	3
2.1	Desbalances en sistemas eléctricos .....	3
2.2	Desequilibrio de voltaje .....	4
2.3	Modelos de componentes en condiciones desbalanceadas.....	5
2.3.1	Generadores Sincrónicos.....	5
2.3.2	Transformadores.....	5
2.3.3	Líneas de transmisión.....	8
2.3.4	Compensación de potencia reactiva .....	11
2.3.5	Formación de matriz de barra del sistema.....	11
3	FORMULACIÓN DEL MÉTODO NEWTON RAPHSON PARA SISTEMAS DESBALANCEADOS .....	11
3.1	Modelación matemática .....	12
4	IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE SOLUCIÓN.....	13
4.1	Sistemas de prueba .....	15
4.1.1	Sistema 1 .....	15
4.1.2	Sistema 2 .....	16
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	17
5.1	Sistema 1 .....	17
5.1.1	Caso de prueba 1 .....	17
5.1.2	Caso de prueba 2 .....	18
5.2	Sistema 2 .....	20
5.2.1	Caso de prueba 1 .....	20
5.2.2	Caso de prueba 2 .....	22
5.2.3	Caso de prueba 3 .....	24
6	CONCLUSIONES .....	27
6.1	TRABAJOS FUTUROS .....	27
7	REFERENCIAS .....	27
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	30
7.2	Resumen de Indicadores.....	32
8	ANEXOS.....	34
8.1	Datos de los elementos del sistema de prueba 1 .....	34
8.1.1	Sistema balanceado .....	34

8.1.2	Sistema Desbalanceado .....	36
8.2	Datos del sistema de prueba 2 .....	40

## 2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Representación del generador sincrónico en componentes por fase. ....	5
Figura 2.	Transformador de núcleo común. ....	6
Figura 3.	Impedancias de un transformador trifásico.....	6
Figura 4.	Banco de transformadores trifásicos.....	7
Figura 5.	Modelo de una línea corta.....	8
Figura 6.	Modelo $\pi$ para líneas medias. ....	8
Figura 7.	Modelo T para líneas medias. ....	8
Figura 8.	Línea trifásica en componentes de fase. ....	9
Figura 9.	Representación matricial de una línea trifásica. ....	9
Figura 10.	Línea trifásica en admitancia compuesta. ....	9
Figura 11.	Transposición de conductores. ....	9
Figura 12.	Líneas trifásicas mutuamente acopladas.....	10
Figura 13.	Representación matricial de dos líneas con acoplamiento. ....	10
Figura 14.	Sistema de Prueba 1 .....	15
Figura 15.	Sistema de Prueba 2.....	16
Figura 16.	Perfil de voltaje en las barras del sistema 1 en condiciones balanceadas.....	17
Figura 17.	Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 en condiciones balanceadas.....	18
Figura 18.	Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 en condiciones balanceadas.....	18
Figura 19.	Perfil de voltajes en las barras del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.....	18
Figura 20.	Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	19
Figura 21.	Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 desbalanceado. ....	19
Figura 22.	Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 desbalanceado. ....	19
Figura 23.	Perfil de voltaje en las barras del sistema 2 en condiciones balanceadas.....	20
Figura 24.	Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado.....	21

Figura 25. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado. ....	21
Figura 26. Perfil de voltajes en las barras del sistema 2 con red desbalanceada. ....	22
Figura 27. Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 2 con red desbalanceada. ....	23
Figura 28. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada. ....	23
Figura 29. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada. ....	23
Figura 30. Perfil de voltajes en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	25
Figura 31. Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	25
Figura 32. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	25
Figura 33. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada. ....	26
Figura 34. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte .....	32
Figura 35. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	32
Figura 36. Indicador de solución - Estado del arte .....	33

### 3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de conexiones de los transformadores. ....	6
Tabla 2. Orden de los matices de acoplamiento.....	10
Tabla 3. Cargas por fase del sistema de prueba 1. P en MW y Q en Mvar .....	15
Tabla 4. Datos de la línea 13-14.....	16
Tabla 5. Cargas por fase del sistema de prueba 2. P en MW y Q en Mvar .....	17
Tabla 6. Voltaje en las barras del sistema 1 balanceado. ....	17
Tabla 7. Potencia trifásica del sistema 1 balanceado. ....	17
Tabla 8. Flujo de potencia de generadores del sistema 1 balanceado. ....	18
Tabla 9. Flujo de potencia de transformadores del sistema 1 balanceado. ....	18
Tabla 10. Flujo de potencia de líneas del sistema 1 balanceado. ....	18
Tabla 11. Potencias totales del sistema 1 balanceado. ....	18
Tabla 12. Voltaje en las barras del sistema 1 desbalanceado.....	18
Tabla 13. Potencia trifásica del sistema 1 desbalanceado.....	19
Tabla 14. Flujo de potencia de generadores del sistema 1 desbalanceado.....	20
Tabla 15. Flujo de potencia de transformadores del sistema 1 desbalanceado.....	20

Tabla 16. Flujo de potencia de líneas del sistema 1 desbalanceado.....	20
Tabla 17. Potencias totales del sistema 1 desbalanceado.....	20
Tabla 18. Voltaje en las barras del sistema 2 balanceado .....	20
Tabla 19. Potencia trifásica del sistema 2 balanceado. ....	21
Tabla 20. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 balanceado .....	21
Tabla 21. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 balanceado .....	21
Tabla 22. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 balanceado .....	21
Tabla 23. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 balanceado.....	22
Tabla 24. Potencias totales del sistema 2 balanceado. ....	22
Tabla 25. Voltaje en las barras del sistema 2 con red desbalanceada. ....	22
Tabla 26. Potencia trifásica del sistema 2 con red desbalanceada. ....	23
Tabla 27. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 con red desbalanceada. ....	24
Tabla 28. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 con red desbalanceada. ..	24
Tabla 29. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 con red desbalanceada. ....	24
Tabla 30. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 con red desbalanceada.....	24
Tabla 31. Potencias totales del sistema 2 con red desbalanceada. ....	24
Tabla 32. Voltaje en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	25
Tabla 33. Potencia trifásica del sistema 2 con carga desbalanceada.....	25
Tabla 34. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	26
Tabla 35. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 con carga desbalanceada.....	26
Tabla 36. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	26
Tabla 37. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	26
Tabla 38. Potencias totales del sistema 2 con carga desbalanceada. ....	26
Tabla 39. Matriz de estado del arte .....	30
Tabla 40. Datos generales del sistema 1 en condiciones balanceadas. ....	34
Tabla 41. Datos de cargas por fase del sistema 1 en condiciones balanceadas. ....	34
Tabla 42. Datos de los generadores del sistema 1 en condiciones balanceadas. ....	34
Tabla 43. Datos de los transformadores del sistema 1 en condiciones balanceadas.....	35
Tabla 44. Datos de las líneas simples del sistema 1 en condiciones balanceadas. ....	35
Tabla 45. Datos generales del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.....	36
Tabla 46. Datos de carga por fase del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.....	36
Tabla 47. Datos de los generadores del sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	36
Tabla 48. Datos de los transformadores del sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	37
Tabla 49. Datos de las líneas simples del sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	37

Tabla 50. Datos de las líneas paralelas y dobles sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	37
Tabla 51. Datos de las líneas en grupos de cuatro del sistema 1 en condiciones desbalanceadas. ....	38
Tabla 52. Datos generales del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	40
Tabla 53. Datos de cargas por fase del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	41
Tabla 54. Datos de los generadores del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	41
Tabla 55. Datos de los transformadores del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	42
Tabla 56. Datos de los compensadores del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	42
Tabla 57. Datos de las líneas simples del sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	43
Tabla 58. Datos de las líneas paralelas y dobles sistema 2 en condiciones balanceadas. ....	44

# FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES

## Resumen

En un análisis de flujos de potencia los sistemas eléctricos son aproximados a características balanceadas, con las que se obtienen las condiciones de operación del sistema en estado estable. Las aproximaciones realizadas en ellos reducen la comprensión real del sistema, es por lo que, el presente trabajo tiene un enfoque en el desbalance existente en los sistemas. El presente artículo plantea la elaboración de un software de código abierto para el cálculo de flujos de potencia en sistemas eléctricos con condiciones desbalanceadas, basados en la representación de los equipos en componentes de fase, esto permite realizar cualquier cambio en alguna de las fases de un elemento que conforme el sistema y observar cual es la afectación que recibe el mismo bajo todas estas modificaciones. El software toma como base para el desarrollo de este trabajo es el método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, el cual permite incluir el análisis de los generadores y su respectivo regulador de voltaje. Este trabajo demuestra su validez por medio dos sistemas eléctricos, los cuales son sometidos a diferentes condiciones de desbalance, para obtener las variables operativas reales del sistema.

**Palabras Clave:** Componentes de fases, Sistemas desbalanceados, Desequilibrio de voltaje, Flujo de potencia desbalanceado, Newton Raphson Desacoplado Rápido.

## Abstract

In an analysis of power flows, electrical systems are approximated to balanced characteristics, with the operating conditions of the system in a stable state. The approaches made in them reduce the real understanding of the system, which is why the present work has a focus on the existing imbalance in the systems. The present article exposes the elaboration of an open source software for the calculation of the power flows in electrical systems with unbalanced conditions, in the representation of the equipment in phase components, this allows any change to be made in any of the phases of a element that complies with the system and observe which is the affectation that it receives under all these modifications. The software takes as a basis for the development of this work is the Newton-Raphson Rapid Decoupled method, which allows to include the analysis of the generators and their respective voltage regulator. This work demonstrates its validity by means of two electrical systems, which are sometimes different unbalance conditions, to obtain the real operating variables of the system.

**Keywords:** Phase components, Unbalanced systems, Voltage unbalance, Power flow, Newton-Raphson fast decoupled.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la antigüedad los sistemas eléctricos de potencia se consideraban muy simples en comparación a la actualidad, debido a que se encontraban constituidos por sistemas muy pequeños en los cuales se encontraban centros de generación que suministraban energía eléctrica únicamente a las cargas que se encontraban a su alrededor, debido al poco desarrollo que se tenía en el sistema de transmisión [1].

Esta problemática produjo el desarrollo de un sistema eléctrico de transmisión, el cual planteaba poseer un nivel de voltaje y un número específico de circuitos, los cuales suministrarían la energía necesaria para abastecer su demanda existente [2].

Para poder brindar un servicio continuo y aumentar la confiabilidad de los sistemas existentes, en el caso ecuatoriano, fue creado el sistema nacional interconectado (SNI), el cual tiene como objetivo enlazar toda la generación existente en el país y unirla a toda la carga demandada del mismo [3], teniendo como resultado la unificación de todos los sistemas existentes [4][5].

Desde ese entonces el sistema nacional interconectado se ha ido desarrollando y expandiendo hasta la actualidad, esto ha llevado a la creación de nuevas leyes de electrificación y entidades encargadas de regular el funcionamiento y operación del sistema como son el ARCONEL Y CENACE [6].

Los sistemas eléctricos poseen diversos elementos, los cuales al momento de trabajar en conjunto realizan los procesos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, los mismos que son regulados y monitoreados con el objetivo de que cada uno de ellos cumplan las normativas que establece el ente regulador, teniendo

como objetivo abastecer a la demanda con energía que posea estándares tanto de calidad y confiabilidad [7][8].

A lo largo de los años se ha realizado varios estudios a los elementos que conforman un sistema eléctrico de potencia, con el objetivo de obtener una representación matemática de los mismos, la cual aporta a tener una mejor comprensión de su funcionamiento interno y cómo actúan ante la presencia de los demás elementos del sistema [9], con esto se entiende que el sistema está compuesto por elementos de características desequilibradas, los que intervienen en el proceso del cálculo de flujos de potencia, considerando que para facilitar el proceso, el desequilibrio existente desaparece, obteniendo una aproximación del estado real del sistema [10].

Los flujos de potencia en sistemas eléctricos juegan un papel fundamental, al momento de realizar la planeación y operación de estos. Son tomados como parte principal debido a que ellos proporcionan las características de operación del sistema, lo que permite conocer cuál es la afectación al momento de realizar modificaciones, ayudando a profundizar los estudios en los elementos del sistema que presenten algún altercado en el cambio realizado, logrando así la creación de nuevos sistemas o la expansión de los mismos [11].

La principal forma de resolver un flujo de potencia desequilibrado es considerando que el sistema se encuentra en equilibrio por medio de una representación en redes de secuencia (positiva, negativa y cero), pero se encuentra muy alejado de la realidad, dado que los sistemas eléctricos presentan características desbalanceadas por naturaleza, esta es la razón por la cual el presente trabajo se basa en el desarrollo de un modelo desbalanceado, el cual

considera todas las características existentes en los elementos como son la presencia de desequilibrio en sus componentes o en la carga que se encuentra conectada al sistema.

Esto se realiza por medio de la representación del sistema en componentes por fase (abc), lo cual hace que los cálculos sean más complejos debido al aumento de las variables desconocidas [12], dentro de un método de solución de flujos de potencia tradicional.

Para conocer el estado real de un sistema eléctrico, se han desarrollado diversas investigaciones, las cuales plantean que la forma correcta de representar a un sistema eléctrico es expresarlo por medio de componentes de fase. Estos otorgan la información completa del sistema, logrando una representación real y obteniéndose las variables principales en cada barra del mismo [13].

En este trabajo, se utiliza la herramienta de software Matlab para el desarrollo del software, en la cual realiza un flujo de potencia basado en el método de Newton-Raphson desacoplado rápido con modificaciones que permiten incluir las componentes de fases, al igual que el cálculo del voltaje interno y terminal de los generadores.

En adelante el artículo se estructura de la siguiente manera; en la sección II se presentará un detalle de cuáles son las consecuencias del desbalance de ciertos elementos del sistema, al igual que la representación matemática de los elementos para la realización del flujo de potencia. En la sección III se describe la formulación del modelo del flujo de potencia por medio del método de Newton-Raphson desacoplado rápido, con las variaciones para resolver flujos trifásicos. En la sección IV se detalla la implementación del modelo matemático.

En la sección V se realiza el análisis de resultados en los sistemas de prueba propuestos. En la sección VI se describe las respectivas conclusiones y trabajos futuros.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Desbalances en sistemas eléctricos**

Los sistemas eléctricos trifásicos, en sus voltajes y corrientes presentan un desfase propio entre cada fase de 120 grados eléctricos, lo cual en su mayoría no siempre se cumple, dado que las características propias del sistema realizan algunas variaciones, siendo esta separación angular distinta a ese valor.

Es de conocimiento que, al realizar un análisis en estado estable de un sistema eléctrico de potencia, se lo considera de tal forma que los elementos que lo constituyen se encuentran en un total equilibrio. Tomando esta consideración se realiza un análisis monofásico, el cual únicamente toma en cuenta la secuencia positiva. Sin embargo, en la práctica las cargas no están por completo equilibradas, al igual que tener un sistema de transmisión con una impedancia completamente equilibrada.

Los elementos que se consideran con un equilibrio propio son los generadores y transformadores, los cuales debido a su construcción poseen las mismas características para todas las fases y la falla de una de ellas provocaría la salida del equipo completo.

Existen algunos motivos por los cuales el sistema eléctrico puede llegar a presentar desbalances en su funcionamiento como pueden ser:

- La diferencia de potencia que se puede presentar entre las fases referente a la carga conectada. Es decir, la conexión de una carga desbalanceada al sistema, lo que

provoca que el sistema altere su funcionamiento, provocándole un desbalance en sus características operativas (voltaje y corriente), con el fin de poder suministrar la potencia requerida por cada fase [14].

- La transposición de líneas no es más que el cambio físico de la posición de los conductores de fase referente a su configuración inicial, esto ayuda a la anulación de reactancias distribuidas que se generan debido a la configuración geométrica, las cuales pueden ser inductivas como capacitivas, logrando así evitar el desbalance en las líneas.
- Dos o más líneas de transmisión ocupan el mismo derecho de vía, en ciertos tramos, produciéndose entre ella un acoplamiento magnético entre cada fase [15].

Es importante que el sistema tenga características mínimas de desbalance cuando este se encuentre en operación, debido a que el desbalance puede ocasionar la aparición de componentes de corriente de secuencia inversa y homopolar, las cuales llegan a ser perjudiciales por las siguientes razones:

- Pueden llegar a producir pérdidas adicionales de potencia y energía.
- Pueden producir un incremento de temperatura en ciertas máquinas, llegando a limitar la capacidad de carga nominal.
- Puede existir propagación del desbalance a las demás barras del sistema.

## 2.2 Desequilibrio de voltaje

La energía eléctrica debe cumplir con ciertos índices e indicadores de calidad, los cuales permiten verificar si la energía está dentro de los rangos permitidos para su comercialización, caso contrario se

presentarían sanciones debido al incumplimiento de estos [16].

Unos de los requerimientos es la calidad del producto técnico, este posee cuatro indicadores muy importantes como son:

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones rápidas de voltaje (flicker).
- Distorsión armónica de voltaje.
- Desequilibrio de voltaje.

El desequilibrio de voltaje es un fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos y se presenta debido a que el voltaje y/o ángulos de las fases no son similares. Para poseer un balance perfecto se necesita que la magnitud de los voltajes en las fases sea el mismo y que los ángulos tengan una diferencia de 120 grados eléctricos, lo que no es posible debido a los argumentos previamente expuestos [17][18].

Como es de conocimiento el porcentaje de desbalance que existe en los voltajes debe ser 0% para evitar problemas de funcionamiento del sistema eléctrico, es por esto por lo que existen normativas internacionales, las cuales indican que el porcentaje admisible de desbalances se encuentra entre un rango del 1% al 3%, dependiendo de la normativa aplicada en el país a realizar el estudio[16].

Para calcular el porcentaje de desbalance se utiliza el método de componentes simétricas como se observa en la ecuación (1).

$$\text{Desequilibrio de voltaje} = \frac{V^-}{V^+} \times 100 \quad (1)$$

Considerando que:

$V^-$	Voltaje	de	secuencia
	negativa.		
$V^+$	Voltaje	de	secuencia
	negativa.		

Para el presente artículo se utilizara la norma IEC 61000-4-30, la cual expresa que el límite máximo para el índice de desequilibrio de voltaje permitido en el punto de medición es del 2% [17][19].

## 2.3 Modelos de componentes en condiciones desbalanceadas

Una de las partes importantes en el cálculo de flujos de potencia es la creación de la matriz de admitancia de barra del sistema, esta representa la impedancia propia y mutua que existe entre cada barra. Para formarla es necesario que todos los elementos estén representados en componentes abc.

### 2.3.1 Generadores Sincrónicos

El generador sincrónico está diseñado para tener una simetría exacta en su parte interna debido a que la excitación de los devanados es equilibrada, por lo que se los modela en sus impedancias de secuencia [20].

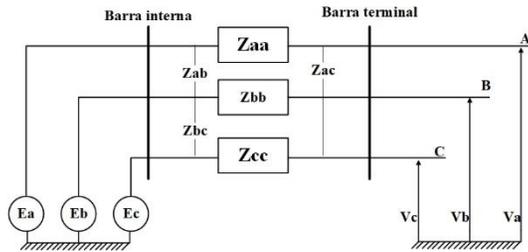


Figura 1. Representación del generador sincrónico en componentes por fase.

Esto conlleva a que sus voltajes internos cumplan (2) y (3).

$$E_n^a = E_n^b = E_n^c \quad (2)$$

$$\theta_n^a = \theta_n^b + \frac{2\pi}{3} = \theta_n^c - \frac{2\pi}{3} \quad (3)$$

Para el caso de este estudio se necesita realizar una transformación de componentes de secuencia a componentes de fase por medio de la matriz de transformación de componentes

simétricas (5), consiguiendo la matriz de impedancias de fase del generador (4).

$$[Z_g]_{abc} = [T] * [Z_g]_{012} * [T]^{-1} \quad (4)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Es muy importante recordar que, para resolver flujos de potencia trifásicos, es necesario modelar el regulador de voltaje interno del generador, el cual se encarga de comparar los voltajes terminales con los internos y calcular la variación de la excitación de los devanados para así mantener los límites establecidos.

Por medio de la matriz de impedancia del generador se halla la matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  de este subsistema, con la cual se puede relacionar las corrientes y voltajes de las barras.

$$[Y_g] = [Z_g]^{-1} \quad (6)$$

$$[Y_{g_{\text{barra}}}] = \begin{bmatrix} [Y_g] & -[Y_g] \\ -[Y_g] & [Y_g] \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.3.2 Transformadores

Al realizar un análisis de flujos trifásicos desbalanceados es muy importante tomar en cuenta todas las características del transformador. Este tipo de análisis descompone al transformador en componentes de fase a, b y c, los que permiten modelar todas las conexiones existentes en transformadores, así como tomar en cuenta la posición de los taps tanto del primario como del secundario.

Por medio de procedimientos matemáticos basados en la red primitiva y el tipo de conexión establecida de los mismos, se ha logrado obtener la admitancia primitiva que poseen, esto ayudo a comprender que los transformadores sin importar su conexión siempre van a poseer cuatro submatrices,

las cuales varían su orden dependiendo de la conexión [21].

Tabla 1. Tabla de conexiones de los transformadores.

Conexiones del transformador					
Barra P	Barra Q	Y <sub>pp</sub>	Y <sub>ss</sub>	Y <sub>ps</sub>	Y <sub>sp</sub>
Estrella tierra	Estrella tierra	Y <sub>I</sub>	Y <sub>I</sub>	-Y <sub>I</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>
Estrella tierra	Estrella	Y <sub>I</sub>	Y <sub>II/3}</sub>	-Y <sub>II/3}</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>
Estrella tierra	Delta	Y <sub>I</sub>	Y <sub>II}</sub>	Y <sub>III}</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>
Estrella	Estrella	Y <sub>II/3}</sub>	Y <sub>II/3}</sub>	-Y <sub>II/3}</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>
Estrella	Delta	Y <sub>II/3}</sub>	Y <sub>II}</sub>	Y <sub>III}</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>
Delta	Delta	Y <sub>II}</sub>	Y <sub>II}</sub>	-Y <sub>II}</sub>	Y <sub>ps}^T</sub>

Una vez establecidas las matrices características del transformador se procede a la creación de la matriz Y<sub>BARRA</sub> del subsistema, con la que se relacionan las corrientes y voltajes de las barras. Se toma en cuenta que las submatrices son de orden 3x1 en el caso de la corriente y voltaje; y 3x3 para las matrices características del transformador.

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{pp}] & [Y_{ps}] \\ [Y_{sp}] & [Y_{ss}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_s] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[I]_{6 \times 1} = [Y_{t_{barras}}]_{6 \times 6} [V]_{6 \times 1} \quad (9)$$

### 2.3.2.1 Transformadores trifásicos de núcleo común

Como se observa en la Figura 2. Transformador de núcleo común., la configuración de un transformador trifásico de núcleo común con dos devanados, está comprendido por tres primarios (1-2-3) y tres secundarios (4-5-6), los cuales se colocan dos devanados (un primario y un secundario) por cada una de las columna que posee el núcleo. Esta configuración ayuda a que las perdidas existentes en el flujo se minimicen, además que el equipo sea más compacto, ganando resistencia y simplicidad [22].

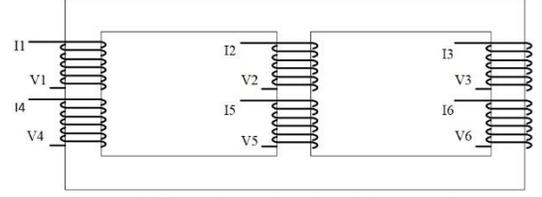


Figura 2. Transformador de núcleo común.

Las matrices que describen las impedancias del transformador son expresadas mediante admitancia compuesta como se observa en la Figura 3. Impedancias de un transformador trifásico..

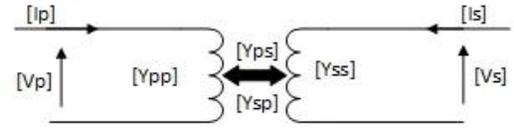


Figura 3. Impedancias de un transformador trifásico.

Las matrices propias de un transformador con núcleo común poseen acoplamientos magnéticos entre los primarios y también entre los secundarios, adicionalmente existen acoplamientos entre primarios y secundarios de diferentes núcleos. Las matrices son las siguientes:

$$[Y_i] = \begin{bmatrix} y_p & y_{m'} & y_{m''} \\ y_{m'} & y_p & y_{m''} \\ y_{m''} & y_{m''} & y_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[Y_{II}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2(y_s - y_{m''}) & -(y_s - y_{m''}) & -(y_s - y_{m''}) \\ -(y_s - y_{m''}) & 2(y_s - y_{m''}) & -(y_s - y_{m''}) \\ -(y_s - y_{m''}) & -(y_s - y_{m''}) & 2(y_s - y_{m''}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[Y_{III}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -(y_s + y_{m''}) & (y_s + y_{m''}) & 0 \\ 0 & -(y_s + y_{m''}) & (y_s + y_{m''}) \\ (y_s + y_{m''}) & 0 & -(y_s + y_{m''}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[Y_{IV}] = [Y_{III}]^T \quad (13)$$

Como ejemplo se plantea una conexión estrella-delta:

Y<sub>I</sub> Submatriz característica de la conexión estrella.

Y<sub>II</sub> Submatriz característica de la conexión delta.

Y<sub>III</sub>, Y<sub>IV</sub> Submatrices mutuas entre el lado estrella y delta

$y_p$	Admitancia propia de los bobinados primarios.
$y_s$	Admitancia propia de los bobinados secundarios.
$y_m$	Admitancia mutua entre bobinados primario y secundarios del mismo núcleo.
$y_{m'}$	Admitancia mutua entre bobinados primarios.
$y_{m''}$	Admitancia mutua entre bobinados primarios y secundarios de diferentes núcleos.
$y_{m'''}$	Admitancia mutua entre bobinados secundarios.

### 2.3.2.2 Banco de Transformadores trifásicos

En ocasiones los transformadores trifásicos estas conformados por un grupo de transformadores monofásicos como se muestra en la Figura 4, estos cumplen la misma función que un compacto, por lo que se puede representar por medio de admitancia compuesta al igual que el transformador de la Figura 3.

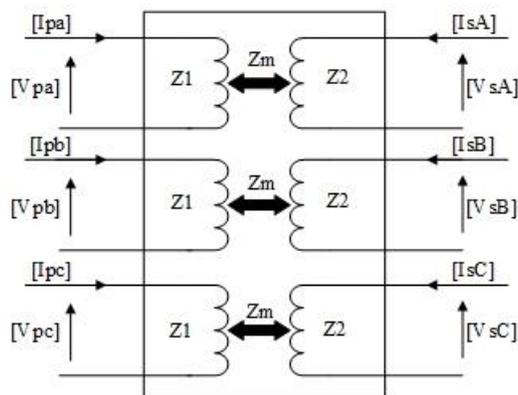


Figura 4. Banco de transformadores trifásicos.

En el caso de los bancos de transformadores se aplica la misma metodología que en el caso anterior para obtener las matrices características, tomando la consideración que, al poseer diferentes núcleos por transformador, llegan a anularse las admitancias mutuas

que existen entre los bobinados de los transformadores, quedando solo las admitancias propias y la admitancia entre primario y secundario.

Las matrices características son las siguientes:

$$[Y_I] = \begin{bmatrix} y & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & y \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[Y_{II}] = \begin{bmatrix} 2y & -y & -y \\ -y & 2y & -y \\ -y & -y & 2y \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[Y_{III}] = \begin{bmatrix} -y & y & 0 \\ 0 & -y & y \\ y & 0 & -y \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[Y_{IV}] = [Y_{III}]^T \quad (17)$$

### 2.3.2.3 Taps en transformadores trifásicos

El cambiador de tap en los equipos de transformación es muy importante, dado que este permite realizar pequeñas variaciones en la relación de voltaje. Al dar un paso con el cambiador de tap, este realiza un cambio en la relación de vueltas de los bobinados, esto se puede realizar en plena carga o con el transformador desenergizado, esto depende del tipo de cambiador de tap que posea el equipo. Esto produce una pequeña variación en las matrices antes mencionadas.

- A la submatriz propia del lado primario se la divide para el valor del tap del lado primario al cuadrado.
- A la submatriz propia del lado secundario se la divide para el valor del tap del lado secundario al cuadrado.
- A las submatrices mutuas de los devanados se las divide para la multiplicación de los taps anteriores.

Se debe considerar que, si existen la conexión delta en algún devanado, la posición del tap en el mismo es  $\sqrt{3}$ .

### 2.3.3 Líneas de transmisión

El sistema de transmisión es el enlace por el cual se realiza la transferencia de energía eléctrica, creando una conexión entre el sistema de generación y la carga. Este es uno de los elementos principales del sistema eléctrico, y es el único elemento que por naturaleza presenta una asimetría.

Las líneas de transmisión se las modelan como circuitos con constantes distribuidas (resistencia, conductancia, inductancia y capacitancia) a lo largo de su longitud y se las considera como la conexión entre dos barras una emisora y una receptora. Las líneas de transmisión para un flujo de potencia se las clasifica en dependiendo de su longitud:

- *Líneas cortas*: son aquellas que poseen una longitud máxima de 80 km, en este tipo de líneas de la admitancia en paralelo es despreciable y se considera únicamente la impedancia en serie, se utilizan principalmente en sistemas de distribución [23]. El modelo de la línea corta es representado en la Figura 5.

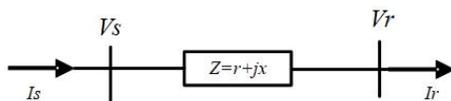


Figura 5. Modelo de una línea corta.

- *Líneas medias*: son aquellas que poseen una longitud mínima de 80 km y una máxima de 240 km. Existen dos modelos con los que se puede llegar a representar las líneas medias, la Figura 6 muestra la representación del modelo  $\pi$  nominal, en el que se observa que la admitancia paralelo se encuentra distribuida en los extremos equitativamente; y, la Figura 7

muestra el modelo T nominal, el mismo que se caracteriza por tener la admitancia paralelo concentrada en el centro de la línea y la impedancia serie dividida en partes iguales [23].

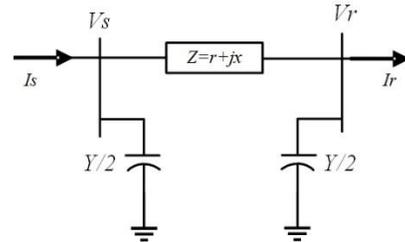


Figura 6. Modelo  $\pi$  para líneas medias.

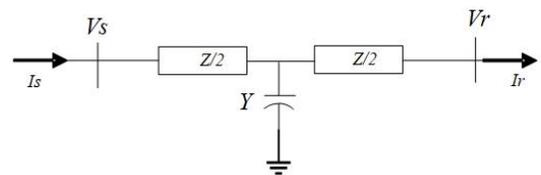


Figura 7. Modelo T para líneas medias.

- *Líneas largas*: son aquellas que poseen una distancia mínima de 240 km, se las puede representar por medio de los modelos antes mencionados y su característica principal es que la admitancia e impedancia son consideradas uniformemente distribuidas a lo largo de la línea. Los valores de admitancia e impedancia están caracterizados por poseer funciones matemáticas de naturaleza hiperbólicas [23].

#### 2.3.3.1 Línea de transmisión trifásica

Para realizar un análisis de flujos desbalanceados, es necesario representar la línea de transmisión de forma trifásica, tal como se observa en la Figura 8, dado que se requieren las características de la línea por fase y el acoplamiento magnético existente.

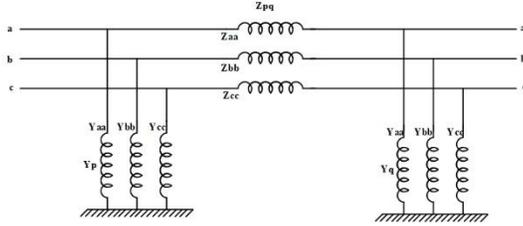


Figura 8. Línea trifásica en componentes de fase.

La impedancia y admitancia de la línea es representada matemáticamente por medio de una matriz de orden 3, como se indica en la Figura 9, en la cual su diagonal expresa la impedancia y admitancia propia de cada fase, y los elementos fuera de la diagonal son los acoplamientos magnéticos entre fases. Para facilitar el cálculo se utiliza el modelo  $\pi$  de la línea, adicional se presenta en la Figura 10 la representación de la línea en admitancia compuesta.

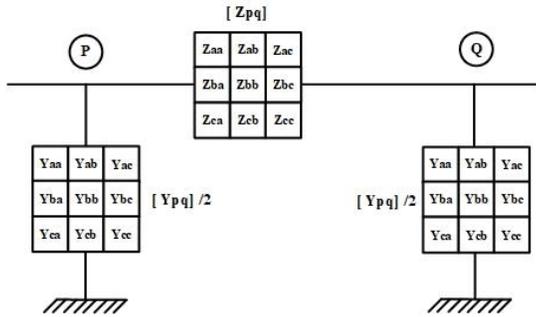


Figura 9. Representación matricial de una línea trifásica.

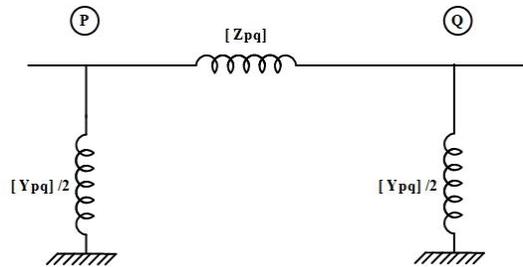


Figura 10. Línea trifásica en admitancia compuesta.

La forma de relacionar el voltaje y la corriente de las barras donde se encuentra ubicada la línea, es por medio de la matriz admitancia de barra del subsistema, esto se presenta en la ecuación (18), la cual es de orden 6x6.

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{pq}]^{-1} + [Y_{pq}]/2 & -[Z_{pq}]^{-1} \\ -[Z_{pq}]^{-1} & [Z_{pq}]^{-1} + [Y_{pq}]/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_q] \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[I]_{6 \times 1} = [Y]_{barras} [V]_{6 \times 1} \quad (19)$$

### 2.3.3.2 Línea de transmisión trifásica con transposición de conductores

Cuando los conductores en líneas trifásicas se disponen de forma asimétrica, se vuelve un problema hallar la inductancia, dado que los flujos y la inductancia de cada una de las fases no son iguales, debido a que dependen de su disposición.

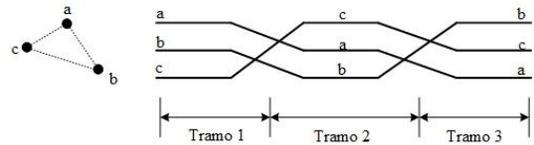


Figura 11. Transposición de conductores.

La alternativa para evitar la asimetría y los diferentes valores de inductancia es la transposición de conductores. Este método se basa en intercambiar la ubicación de los conductores en intervalos a lo largo de la línea como se observa en la Figura 11, logrando que cada conductor ocupe la posición de los demás en un tramo de la línea [24].

Para realizar el análisis en flujos de potencia desbalanceados se considera una impedancia y admitancia para cada tramo de la línea como se observa en las ecuaciones (20), (21) y (22). Una vez obtenidas estas matrices se procede a conseguir la matriz característica de la línea y aplicar la ecuación (18).

$$Z_{Tramo I} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Y_{Tramo I} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix}$$

$$Z_{Tramo II} = \begin{bmatrix} Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{ba} \\ Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aa} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Y_{Tramo II} = \begin{bmatrix} Y_{bb} & Y_{bc} & Y_{ba} \\ Y_{cb} & Y_{cc} & Y_{ca} \\ Y_{ab} & Y_{ac} & Y_{aa} \end{bmatrix}$$

$$Z_{Tramo III} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{ca} & Z_{cb} \\ Z_{ac} & Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{bc} & Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$Y_{Tramo III} = \begin{bmatrix} Y_{cc} & Y_{ca} & Y_{cb} \\ Y_{ac} & Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{bc} & Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_r] \\ [I_q] \\ [I_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{pq}]^{-1} + [Y_p] & [Z_{pq-rs}]^{-1} + [Y_{pr}] & -[Z_{pq}]^{-1} & -[Z_{pq-rs}]^{-1} \\ [Z_{rs-pq}]^{-1} + [Y_{pr}] & [Z_{rs}]^{-1} + [Y_r] & -[Z_{rs-pq}]^{-1} & -[Z_{rs}]^{-1} \\ -[Z_{pq}]^{-1} & -[Z_{pq-rs}]^{-1} & [Z_{pq}]^{-1} + [Y_q] & [Z_{pq-rs}]^{-1} + [Y_{qs}] \\ -[Z_{rs-pq}]^{-1} & -[Z_{rs}]^{-1} & [Z_{rs-pq}]^{-1} + [Y_{qs}] & [Z_{rs}]^{-1} + [Y_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_r] \\ [V_q] \\ [V_s] \end{bmatrix} \quad (23)$$

### 2.3.3.3 Líneas de transmisión trifásicas mutuamente acopladas

Las líneas trifásicas pueden llegar a presentar acoplamientos electrostáticos y electromagnéticos entre ellos, debido a que se componen de conductores desnudos. Dando lugar a la creación de admitancias e inductancias entre cada una de las fases de las líneas como se observa en la Figura 12.

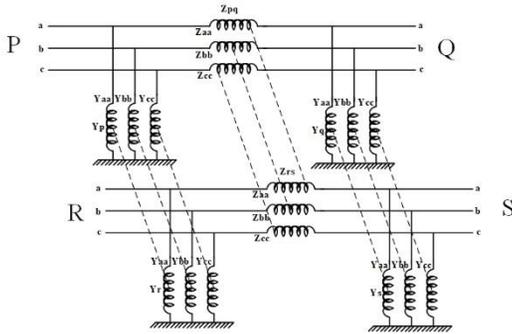


Figura 12. Líneas trifásicas mutuamente acopladas.

En la ecuación (23) se plantea la formación de la matriz que relaciona el voltaje con la corriente para dos líneas acopladas.

Para facilitar la comprensión en la representación de las líneas acopladas, se presenta en la Figura 13 las matrices que engloban las submatrices de impedancias y admitancias de la ecuación (23). Para este tipo de líneas se puede ocupar el mismo modelo de admitancia compuesta que se plantea en la Figura 10; y, tomando

en cuenta que las matrices Y y Z son de orden 6x6 [25].

Al realizar el análisis de flujos desbalanceados se aplica el mismo modelo descrito en las ecuaciones (18) y (19).

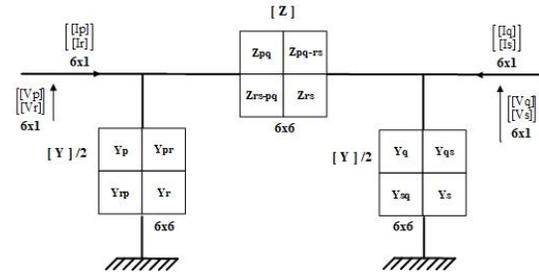


Figura 13. Representación matricial de dos líneas con acoplamiento.

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_r] \\ [I_q] \\ [I_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y]/2 & -[Z]^{-1} \\ -[Z]^{-1} & [Z]^{-1} + [Y]/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_r] \\ [V_q] \\ [V_s] \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[I]_{12 \times 1} = [Y]_{barras} [V]_{12 \times 1} \quad (25)$$

En un sistema eléctrico pueden existir más de dos líneas mutuamente acopladas, las cuales van a seguir el mismo procedimiento antes mencionado, con la diferencia que se expande la matriz.

Tabla 2. Orden de los matices de las líneas mutuamente acopladas. acoplamiento.

Líneas mutuamente acopladas	Orden de las matrices Y & Z
1	3x3
2	6x6
3	9x9
4	12x12
5	15x15

### 2.3.4 Compensación de potencia reactiva

Los elementos utilizados para realizar compensación reactiva se clasifican en elementos capacitivos e inductivos. Los elementos capacitivos son aquellos que almacenan energía en forma de campo eléctrico y su característica principal, es proporcionar potencia reactiva al sistema. Al realizar una conexión en paralelo, producen un incremento del nivel de voltaje en la barra, mientras que al realizar una conexión en serie reducen el valor de la reactancia serie de la línea de transmisión logrando incrementar la capacidad de transmisión.

Los elementos inductivos son aquellos que almacenan la energía en forma de campo magnético, teniendo como característica principal consumir potencia reactiva. Al conectarlos en paralelo se encargan de absorber reactivos y disminuir el nivel de voltaje en la barra [21][22].

Para el flujo de potencia los elementos de compensación se modelan de forma trifásica por medio de una matriz de orden 3x3, como se indica en la ecuación (26).

$$Y_c = \begin{bmatrix} y_a & 0 & 0 \\ 0 & y_b & 0 \\ 0 & 0 & y_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

La ecuación que relaciona las corrientes y voltajes de barras para los elementos de compensación tiene una variación entre los elementos en serie y paralelo. Para los elementos en paralelo se utiliza la ecuación (28) y para los elementos en serie la ecuación (30).

$$\begin{bmatrix} I_{p-a} \\ I_{p-b} \\ I_{p-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_a & 0 & 0 \\ 0 & y_b & 0 \\ 0 & 0 & y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{p-a} \\ V_{p-b} \\ V_{p-c} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[I_p]_{3x1} = [Y_c]_{3x3} [V_p]_{3x1} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_c] & -[Y_c] \\ -[Y_c] & [Y_c] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_q] \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[I]_{6x1} = [Y_{c\text{serie}}]_{6x6} [V]_{6x1} \quad (30)$$

### 2.3.5 Formación de matriz de barra del sistema

Para la formación de la matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  del sistema se toma todas las matrices de los subsistemas, es decir las ecuaciones (7), (9), (19), (25), (28) y (30); y se las fragmenta en matrices de orden 3x3, tomando en cuenta las barras en donde se encuentran conectadas y se sigue los siguientes pasos:

- Para los elementos de la diagonal, se dice que la admitancia propia de orden 3x3 de la barra, es igual a la suma de cada admitancia de orden 3x3 conectada a esa barra.

$$[Y_{ii}]_{3x3} = \sum_{j=1}^n [Y_{ij}]_{3x3} + \sum_{j=1}^n [Y_{ji}]_{3x3} \quad (31)$$

- Para los elementos fuera de la diagonal, se dice que la admitancia mutua de orden 3x3 entre las barras, es el negativo de la sumatoria de todas las admitancias mutuas de orden 3x3 que existan entre esas barras. De no existir ninguna admitancia entre las barras el termino sería reemplazado por una matriz de ceros de orden 3x3.

$$[Y_{ij}]_{3x3} = - \sum [Y_{ij}]_{3x3} \quad i \neq j \quad (32)$$

$$[Y_{ji}]_{3x3} = [Y_{ij}]_{3x3} \quad (33)$$

## 3 FORMULACIÓN DEL MÉTODO NEWTON RAPHSON PARA

## SISTEMAS DESBALANCEADOS

Dentro del análisis de sistemas desbalanceados es necesario conocer las características operativas del sistema por medio de un flujo de potencia, cuyo método de solución puede ser el método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido

$$P_{ip} = |V_{ip}| \sum_k \sum_m |V_{km}| (G_{pmik} \cos(\theta_{ip} - \theta_{km}) + B_{pmik} \sin(\theta_{ip} - \theta_{km})) \quad (34)$$

$$Q_{ip} = |V_{ip}| \sum_k \sum_m |V_{km}| (G_{pmik} \sin(\theta_{ip} - \theta_{km}) - B_{pmik} \cos(\theta_{ip} - \theta_{km})) \quad (35)$$

$$(\Delta V_{reg,x}) = f(V_{al}, V_{bl}, V_{cl}) \quad (36)$$

$$P_{gj} = \sum_p |V_{intj}| \sum_k \sum_m |V_{km}| (G_{pmjk} \cos(\theta_{jp} - \theta_{km}) + B_{pmjk} \sin(\theta_{jp} - \theta_{km})) \quad (37)$$

### 3.1 Modelación matemática

Para resolver el problema de flujo de potencia trifásico con características desbalanceadas, se necesita satisfacer ecuaciones no lineales de potencia activa y reactiva para cada fase y para cada barra del sistema, con las ecuaciones (34) y (35). El regulador de voltaje de cada máquina sincrónica se modela con la ecuación (36), considerando a que fase se le aplica. Adicionalmente se establece la ecuación (37) que expresa la generación total de potencia activa de cada máquina sincrónica, excluyendo al generador oscilante. Donde:

- p, m: a, b, c
- k: 1.....(n<sub>b</sub> + n<sub>gen</sub>)
- i: 1.....n<sub>b</sub>
- j: 1.....(n<sub>gen</sub> - 1)
- x: 1.....n<sub>gen</sub>
- l: Barra terminal del generador  
x

Para encontrar las variables de cada barra se emplea el método iterativo de Newton-Raphson basándose en la

(NRDR), el cual esta transformado de tal manera que considere las fases en cada una de las barras del sistema, las barras internas de los generadores y el regulador de voltaje empleado en cada uno de los generadores.

ecuación (38), y realizando aproximaciones para obtener el modelo desacoplado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_g \\ \Delta Q \\ \Delta V_{reg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E & I & M \\ B & F & J & N \\ C & G & K & P \\ D & H & L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \theta_{int} \\ \Delta V/V \\ \Delta V_{int}/V_{int} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Para poder reducir el Jacobiano a dos submatrices se aplica el principio de desacoplamiento, el cual aprovecha la fuerte relación que posee la potencia activa con el ángulo y la potencia reactiva con el voltaje. Teniendo como objetivo la anulación de los términos I, M, J, N, C y G como se muestra en las ecuaciones (39) y (40), adicional la especificación del regulador está en termino de voltaje y toda relación con los ángulos es nula, dando como resultado la anulación de los términos D y H [28].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E \\ B & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \theta_{int} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta V_{reg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & P \\ L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V/V \\ \Delta V_{int}/V_{int} \end{bmatrix} \quad (40)$$

A estas ecuaciones se aplican ciertas reducciones, dado que el método desacoplado rápido necesita submatrices del Jacobiano constantes para optimizar el proceso de cálculo.

Se realiza una comparación de potencia, admitancia y la diferencia angular que existente entre cada una de las fases para obtener una representación reducida de las submatrices Jacobiano como de observa en las ecuaciones (41), (42).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ip} \\ \Delta P_{gj} \\ \Delta \theta_{km} \\ \Delta \theta_{int_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_{ip} M_{pmik} V_{km}] & \left[ \sum_m V_{ip} M_{pmik} V_{int_l} \right] \\ \left[ \sum_p V_{int_j} M_{pmjk} V_{km} \right] & \left[ \sum_m \sum_p V_{int_j} M_{pmjk} V_{int_l} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{km} \\ \Delta V_{int_l} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{ip} \\ \Delta V_{reg_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_{ip} M_{pmik} V_{km}] & \left[ \sum_m V_{ip} M_{pmik} V_{int_l} \right] \\ V_{km} [L_{mjk}] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{km} / V_{km} \\ \Delta V_{int_l} / V_{int_l} \end{bmatrix} \quad (42)$$

En estas ecuaciones se plantean dos términos que son constantes y no varían en ninguna aproximación y se los calcula como se observa en las ecuaciones (43) y (44).

$$M_{pmik} = G_{pmik} \sin(\theta_{ip} - \theta_{km}) - B_{pmik} \cos(\theta_{ip} - \theta_{km}) \quad (43)$$

$$L_{mjk} = V_{km} [L_{mjk}]' \quad (44)$$

El término  $[L_{mjk}]'$  puede tomar el valor de 1 o 0.

- Es 1, si k es la barra terminal de generador j y m es igual a la fase donde se aplica el regulador de voltaje.
- Es 0, si k es la barra terminal de generador j y m es diferente a la fase donde se aplica el regulador de voltaje.
- Es 0, si k no es una barra terminal de un generador.

La última aproximación que se realiza es que los voltajes de los términos del

primer subjacobiano se los aproxima a 1.0 p.u.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ip} / V_{ip} \\ \Delta P_{gj} / V_{int_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{pmik}] & \left[ \sum_m M_{pmik} \right] \\ \left[ \sum_p M_{pmjk} \right] & \left[ \sum_m \sum_p M_{pmjk} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{km} \\ \Delta \theta_{int_l} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Donde:

$$\begin{aligned} p, m: & \quad a, b, c \\ i, k: & \quad 1 \dots \dots n_b \\ j, l: & \quad (n_b + 1) \dots (n_b + n_{gen} - 1) \end{aligned}$$

Mientras que los voltajes del segundo subjacobiano se reducen con los términos del vector del lado derecho.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{ip} / V_{ip} \\ \Delta V_{reg_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{pmik}] & \left[ \sum_m M_{pmik} \right] \\ [L_{mjk}] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{km} \\ \Delta V_{int_l} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Donde:

$$\begin{aligned} p, m: & \quad a, b, c \\ i, k: & \quad 1 \dots \dots n_b \\ j, l: & \quad (n_b + 1) \dots (n_b + n_{gen}) \end{aligned}$$

Este procedimiento da como resultado las ecuaciones matriciales (45) y (46), las cuales se las conoce como  $[B']$  de orden  $(3(n_b) + (n_{gen} - 1))$  y  $[B'']$  de orden  $(3(n_b) + (n_{gen}))$  respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ip} / V_{ip} \\ \Delta P_{gj} / V_{int_j} \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_{km} \\ \Delta \theta_{int_l} \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{ip} / V_{ip} \\ \Delta V_{reg_j} \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta V_{km} \\ \Delta V_{int_l} \end{bmatrix} \quad (48)$$

## 4 IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE SOLUCIÓN

El presente artículo de investigación describe un modelo matemático para resolver flujos de potencia en sistemas trifásicos con características desbalanceadas, el cual tiene la capacidad

de resolver diversos tipos de sistemas, sin poseer un límite máximo de barras o acoplamientos en las líneas.

La presente investigación es desarrollada en la plataforma de programación Matlab, la cual brinda la facilidad de realizar los cálculos establecidos en menor tiempo.

Para verificar la validez de esta investigación se han planteado dos sistemas de prueba, los cuales poseen sus datos de forma trifásica, al igual que poseen características desbalanceadas tanto en carga como en la red. A continuación, se presenta el algoritmo del método NRDR.

---

**Algoritmo Newton Raphson Desacoplado Rápido**

---

**Paso 1:**

Lectura de los datos del sistema de prueba.

**Paso 2:**

Creación de matriz Y de barra del sistema en base a las matrices Ybus de cada subsistema

**Paso 3:**

Creación de las matrices de voltajes y ángulos. Asignación de voltajes y ángulos en las barras de generadores.

**Paso 4:**

Cálculo de los términos que constituyen las matrices B' y B''.

**Paso 5:**

Cálculo de los vectores específicos.

$$\begin{bmatrix} P_{ip}^{esp} \\ Pg_j^{esp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ip-gen} - P_{ip-carga} \\ Pg_j-total \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{ip}^{esp} \\ Vreg_j^{esp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{ip-gen} - Q_{ip-carga} \\ Vreg_j-especificado \end{bmatrix}$$

**Paso 6:**

Inicialización de los indicadores de convergencia.

$$kp = kq = 0$$

**Paso 7: PROCESO ITERATIVO.**

Inicia lazo iterativo (kp==0) || (kq==0).

Tolerancia del error = 1E-6.

**Paso 8:**

Cálculo de potencia activa calculada en cada una de las fases de cada barra, excluyendo las barras internas de los generadores.

**Paso 9:**

Cálculo de potencia activa total de generación de cada máquina sincrónica.

**Paso 10:**

Construcción del vector de potencias calculadas.

---

---


$$\begin{bmatrix} P_{ip}^{cal} \\ Pg_j^{cal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ip} \\ Pg_j \end{bmatrix}$$

**Paso 11:**

Cálculo del vector ΔP

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ip} \\ \Delta Pg_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ip}^{esp} \\ Pg_j^{esp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{ip}^{cal} \\ Pg_j^{cal} \end{bmatrix}$$

**Paso 12:**

Comprobar tolerancia de error en ΔP.

Si (ΔP<tol) entonces kp=1.

Si (ΔP>tol) entonces kp=0.

**Paso 13:**

Si kp=0.

Calcular corrección de variables de estado.

$$CorrecP = inv(B') * \Delta P$$

Actualizar valores de ángulos en cada una de las barras.

**Paso 14:**

Cálculo de potencia reactiva calculada en cada una de las fases de cada barra, excluyendo las barras internas de los generadores.

**Paso 15:**

Cálculo de magnitud del regulador de voltaje.

**Paso 16:**

Construcción del vector de potencias calculadas.

$$\begin{bmatrix} Q_{ip}^{cal} \\ Vreg_j^{cal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{ip} \\ Vreg_j \end{bmatrix}$$

**Paso 17:**

Cálculo del vector ΔQ

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{ip} \\ \Delta Vreg_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{ip}^{esp} \\ Vreg_j^{esp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{ip}^{cal} \\ Vreg_j^{cal} \end{bmatrix}$$

**Paso 18:**

Comprobar tolerancia de error en ΔQ.

Si (ΔQ<tol) entonces kq=1.

Si (ΔQ>tol) entonces kq=0.

**Paso 19:**

Si kq=0.

Calcular corrección de variables de estado.

$$CorrecQ = inv(B'') * \Delta Q$$

Actualizar valores de voltaje en cada una de las barras.

**Paso 20: FIN DEL PROCESO ITERATIVO.**

**Paso 21:**

Cálculo de porcentaje de desbalance en cada una de las barras.

**Paso 22:**

Cálculo de todas las variables de las barras.

**Paso 23:**

Cálculo de flujo de potencia por cada uno de los elementos.

**Paso 24:**

Formación de las matrices de resultados.

---

## 4.1 Sistemas de prueba

Con el fin de demostrar el funcionamiento del modelo matemático descrito en los puntos anteriores, se plantean dos sistemas de prueba, con los cuales se obtienen todas las variables eléctricas en cada una de las barras, al igual que las potencias de transferencia en cada uno de los elementos, tanto de envío como de recepción.

Adicional se presentarán las cantidades totales de potencia activa y reactiva, de generación, demanda y pérdidas del sistema.

### 4.1.1 Sistema 1

El diagrama unifilar del sistema de prueba 1 se observa en la Figura 14, el cual fue tomado de [24][25].

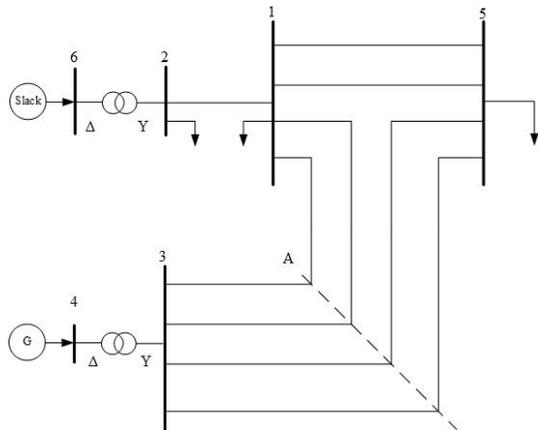


Figura 14. Sistema de Prueba 1.

Este sistema está constituido por 6 barras físicas y 2 barras de simulación que corresponden a las barras internas de los generadores. Tiene dos unidades generadoras, cada una de ellas con sus características de impedancia interna y tienen como objetivo principal, el abastecer de energía a las tres barras que poseen cargas en todo el sistema.

En este sistema existen dos transformadores, los cuales poseen una conexión de Estrella-tierra/Delta, con la conexión estrella sólidamente aterrizada.

Las líneas de transmisión que se encuentran entre las barras 3-1 y 3-5, poseen una seccionalización, la cual se produce por la pérdida del acoplamiento magnético entre el grupo de líneas a cierta distancia, separando a la línea en dos secciones. La primera comprende las líneas mutuamente acopladas que van de la barra 3 a la barra ficticia A y la segunda sección está constituida por las líneas que van de la barra ficticia A hacia las barras 1 y 5.

El sistema de transmisión posee datos propios de impedancia serie y admitancia paralelo, adicional se presentan los datos de los acoplamientos magnéticos que se producen entre las fases de las líneas.

Este sistema posee un desbalance completo en cada una de las líneas de transmisión. Al respecto de las cargas, el desbalance existente se detalla en la Tabla 3. Cargas por fase del sistema de prueba 1.

Tabla 3. Cargas por fase del sistema de prueba 1. P en MW y Q en Mvar

N°	FASE A		FASE B		FASE C	
	P	Q	P	Q	P	Q
1	50	15	45	14	48.3	16.6
2	48	20	47	12	51.3	28.3
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	150	80	157	78	173	72
6	0	0	0	0	0	0

Este sistema es sometido a dos casos de estudio, los cuales comprenden:

- Caso 1: flujo de potencia trifásico balanceado. En este caso se desprecia el acoplamiento magnético en toda la red de transmisión, adicional las líneas poseen su impedancia y admitancia en derivación totalmente balanceada. Las cargas existentes tienen la misma distribución de potencia por fase.
- Caso 2: Este es el caso de un sistema eléctrico de potencia real, en el cual existe un total

desbalance en las cargas y en la red de transmisión. Se consideran todos los acoplamientos existentes en las líneas de transmisión, así como las impedancias internas de los generadores.

#### 4.1.2 Sistema 2

Este sistema es tomado de [13], y su diagrama unifilar es detallado en la Figura 15. Donde se puede apreciar un sistema eléctrico más robusto debido a su configuración mallada, la cual le brinda una disminución en las interrupciones del servicio.

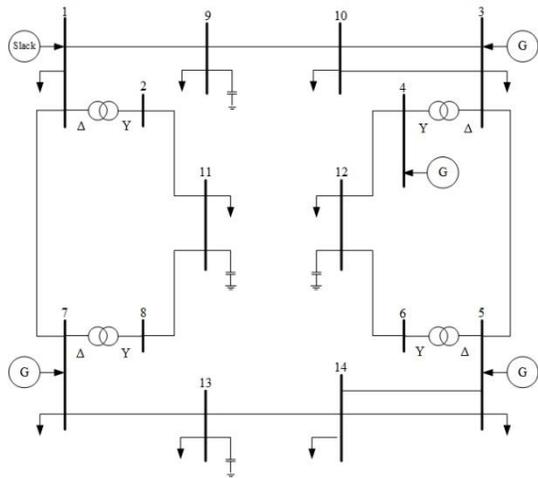


Figura 15. Sistema de Prueba 2.

El sistema es constituido por 5 unidades de generación las cuales poseen valores de impedancia entre las barras internas con las terminales, a excepción de la unidad generadora que se encuentra en la barra 3, debido a que la misma posee valores de potencia activa y reactiva fijos de generación. Existen 4 transformadores, los cuales poseen una conexión de Estrella-tierra/Delta, de los cuales dos de ellos no tienen la conexión estrella sólidamente aterrizada. Como se demuestra el diagrama, existen 4 elementos de compensación de potencia reactiva, los cuales son totalmente equilibrados.

Todos los datos de los elementos que conforman el sistema se encuentran en total equilibrio, debido a que el sistema será sometido a ciertos casos de desbalance para demostrar la versatilidad del modelo matemático:

- Caso 1: Sistema balanceado con conexión de transformadores en Estrella-tierra/Delta.
- Caso 2: Sistema con carga balanceada, conexión de transformadores en Estrella-tierra/Delta y red desbalanceada. Debido a que la red de transmisión de este sistema se encuentra equilibrada, se realiza la desconexión de la fase b en la línea de transmisión que se encuentra entre las barras 13-14, consiguiendo así un desbalance en la red.

Tabla 4. Datos de la línea 13-14.

Línea desbalanceada		
R		
0.047664	0	0.013664
0	0	0
0.013664	0	0.047664
X		
0.166670	0	0.066670
0	0	0
0.066670	0	0.166670
Y		
0.0158	0	-0.0026
0	0	0
-0.0026	0	0.0158

- Caso 3: Sistema con carga desbalanceada, conexión de transformadores en Estrella-tierra/Delta y red balanceada. En este caso se realiza el desbalance de las potencias de carga como se indica en la Tabla 5 y utilizando los datos del caso 1 para los demás elementos a excepción de los generadores que toman su valor real de impedancia.

Tabla 5. Cargas por fase del sistema de prueba 2. P en MW y Q en Mvar

N°	FASE A		FASE B		FASE C	
	P	Q	P	Q	P	Q
1	34	17	33	16.5	33	16.5
2	0	0	0	0	0	0
3	-33.333	-2.067	-33.333	-2.067	-33.333	-2.067
4	0	0	0	0	0	0
5	32	16	33	16.5	35	17.5
6	0	0	0	0	0	0
7	32	16	36	18	32	16
8	0	0	0	0	0	0
9	15	7.5	17	8.5	18	9
10	15	7.5	16	8	19	9.5
11	8	6.4	9	7.2	8	6.4
12	8	6.4	9	7.2	8	6.4
13	16	8	16	8	18	9
14	16	8	16	8	18	9

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados que se tienen al momento de realizar la simulación de los sistemas eléctricos por medio del modelo matemático son las variables eléctricas en cada una de las barras, el flujo de potencia existente entre los elementos y el porcentaje de desbalance que existe en las barras debido a la diferencia de los voltajes.

### 5.1 Sistema 1

Para este sistema se simulan los casos mencionados en el punto 4.1.1, con cada una de las condiciones propuestas.

#### 5.1.1 Caso de prueba 1

Después de simular el sistema por medio del modelo NRDR, las respuestas del flujo se presentan en la Tabla 6. Donde se puede apreciar que las magnitudes del voltaje por fase son exactamente iguales, debido a que el sistema no posee ningún desbalance y los ángulos de las fases presenta un desfase de 120 grados eléctricos entre sí.

Tabla 6. Voltaje en las barras del sistema 1 balanceado.

N°	FASE A		FASE B		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
1	0.988	-6.989	0.988	-126.989	0.988	113.011
2	1.007	-5.237	1.007	-125.237	1.007	114.763
3	1.020	-3.007	1.020	-123.007	1.020	116.993
4	1.045	1.354	1.045	-118.646	1.045	121.354
5	0.984	-7.219	0.984	-127.219	0.984	112.781
6	1.050	-0.132	1.050	-120.132	1.050	119.868
7	1.047	1.616	1.047	-118.384	1.047	121.616
8	1.051	0.000	1.051	-120.000	1.051	120.000

En la Figura 16 se puede de manera gráfica la igualdad de los voltajes en cada fase. Es muy importante tener en cuenta que el porcentaje de desbalance de cada barra, para este sistema en las condiciones planteadas tiene el valor de 0, debido a que no se presenta una diferencia en los valores de voltaje.

Al no existir un desbalance en el sistema las unidades de generación entregan potencia de una forma equilibrada y cumpliendo los valores de potencia activa asignada a cada máquina excluyendo la oscilante, como se indica en la Tabla 7. En la Figura 17 y Figura 18 se puede apreciar la distribución de la potencia por cada una de las fases de los generadores.

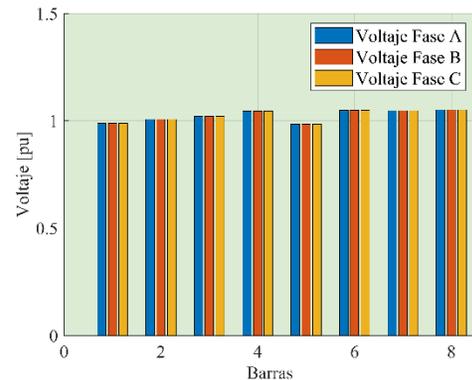


Figura 16. Perfil de voltaje en las barras del sistema 1 en condiciones balanceadas.

Tabla 7. Potencia trifásica del sistema 1 balanceado.

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
7	499.500	161.274
8	253.467	117.254

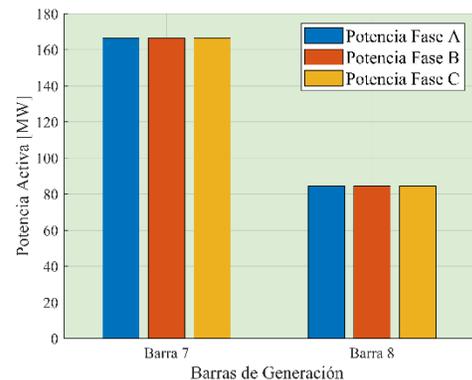


Figura 17. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 en condiciones balanceadas.

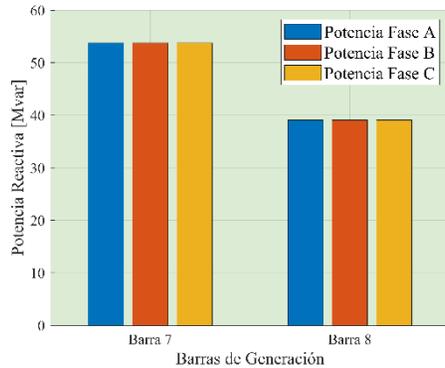


Figura 18. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 en condiciones balanceadas.

A continuación, se presentan las tablas de los flujos de potencia que circulan por cada uno de los elementos del sistema. Todas las tablas expresan que las potencias transmitidas de barra a barra son iguales en cada una de las fases, debido a las condiciones balanceadas del sistema.

Tabla 8. Flujo de potencia de generadores del sistema 1 balanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
7	4	a	166.500	53.758	a	-166.500	-52.919
		b	166.500	53.758	b	-166.500	-52.919
		c	166.500	53.758	c	-166.500	-52.919
8	6	a	84.489	39.085	a	-84.489	-38.849
		b	84.489	39.085	b	-84.489	-38.849
		c	84.489	39.085	c	-84.489	-38.849

Tabla 9. Flujo de potencia de transformadores del sistema 1 balanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
3	4	a	-165.996	-39.153	a	166.500	52.919
		b	-165.996	-39.153	b	166.500	52.919
		c	-165.996	-39.153	c	166.500	52.919
2	6	a	-84.018	-29.899	a	84.489	38.849
		b	-84.018	-29.899	b	84.489	38.849
		c	-84.018	-29.899	c	84.489	38.849

Tabla 10. Flujo de potencia de líneas del sistema 1 balanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
1	2	a	-35.831	-22.080	a	36.018	9.899
		b	-35.831	-22.080	b	36.018	9.899
		c	-35.831	-22.080	c	36.018	9.899
1	5	a	22.316	17.258	a	-22.288	-18.803
		b	22.316	17.258	b	-22.288	-18.803
		c	22.316	17.258	c	-22.288	-18.803
1	5	a	26.126	20.603	a	-26.094	-22.150
		b	26.126	20.603	b	-26.094	-22.150
		c	26.126	20.603	c	-26.094	-22.150

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
3	1	a	31.556	5.944	a	-31.305	-15.390
		b	31.556	5.944	b	-31.305	-15.390
		c	31.556	5.944	c	-31.305	-15.390
3	1	a	31.556	5.944	a	-31.305	-15.390
		b	31.556	5.944	b	-31.305	-15.390
		c	31.556	5.944	c	-31.305	-15.390
3	5	a	51.442	13.633	a	-50.809	-19.523
		b	51.442	13.633	b	-50.809	-19.523
		c	51.442	13.633	c	-50.809	-19.523
3	5	a	51.442	13.633	a	-50.809	-19.523
		b	51.442	13.633	b	-50.809	-19.523
		c	51.442	13.633	c	-50.809	-19.523

Por último, se presentan los valores de las potencias de generación, carga y pérdidas totales del sistema.

Tabla 11. Potencias totales del sistema 1 balanceado.

POTENCIAS	[MW]	[Mvar]
Generación total	752.967	278.529
Carga total	744	345
Pérdidas del sistema	8.967	-66.471

### 5.1.2 Caso de prueba 2

Al poseer cargas de diferente valor en cada una de las fases como se muestra en la Tabla 3, y los datos de las líneas poseen desequilibrio entre fases. Provoca que el sistema comience a variar los datos de voltaje por fase obteniendo un desequilibrio de voltaje como muestra el flujo de potencia de la Tabla 12.

Tabla 12. Voltaje en las barras del sistema 1 desbalanceado.

Nº	FASE A		FASE B		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
1	1.018	21.394	1.052	-98.123	1.034	139.428
2	1.032	23.316	1.073	-96.145	1.045	141.768
3	1.070	25.420	1.082	-95.124	1.064	144.407
4	1.045	-0.711	1.055	-120.550	1.052	118.916
5	1.012	21.215	1.046	-98.419	1.033	139.129
6	1.050	-1.786	1.065	-120.561	1.077	118.129
7	1.067	1.778	1.067	-118.222	1.067	121.778
8	1.074	0.000	1.074	-120.000	1.074	120.000

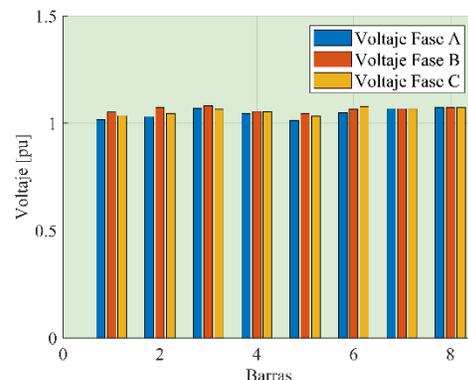


Figura 19. Perfil de voltajes en las barras del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Como se puede apreciar en la Figura 19. Perfil de voltajes en las barras del sistema 1 en condiciones desbalanceadas., las barras de la 1 a la 6 poseen un desequilibrio entre fases debido a la condición desbalanceadas del sistema, pero las barras 7 y 8 se encuentran en perfecto equilibrio debido a que son las barras internas de los generadores, demostrando que son uno de los equipos que trabajan siempre en equilibrio internamente.

La Figura 20 indica cual es el desequilibrio de voltaje en todo el sistema.

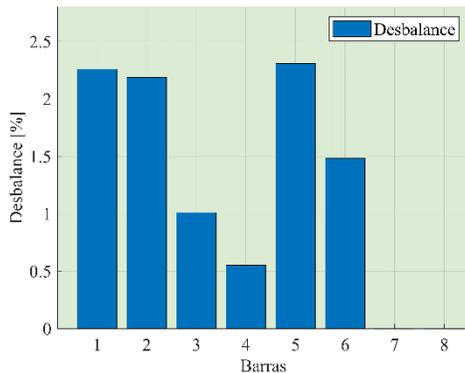


Figura 20. Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Como se puede observar las barras que presentan mayor desequilibrio en el sistema son las barras de carga, debido a que la diferencia de potencia entre fases es representativa, la normativa indica que el máximo valor de desequilibrio es el 2%, razón por la que se debe tomar medidas para corregir ese valor de desequilibrio.

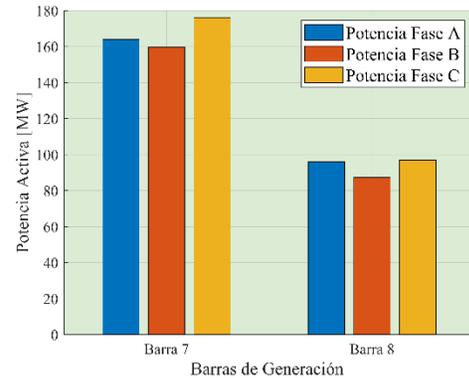


Figura 21. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 desbalanceado.

Las condiciones desbalanceadas no provocan ningún cambio en la potencia trifásica activa de las unidades generadoras debido a que su potencia se encuentra fijada, pero si altera la generación por fase, haciendo que una fase genere más que otra, como se observa en la Figura 21 y Figura 22.

En la potencia reactiva trifásica se produce un incremento debido a que este caso toma en cuenta los acoplamientos existentes en las líneas de transmisión.

Tabla 13. Potencia trifásica del sistema 1 desbalanceado.

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
7	499.500	183.813
8	280.143	108.779

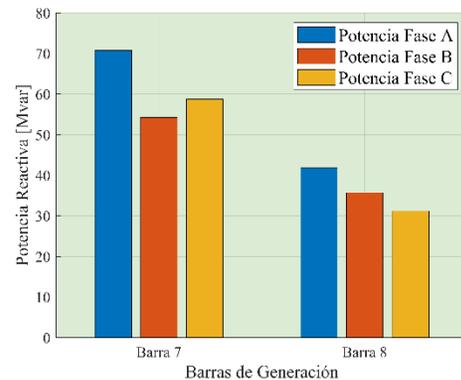


Figura 22. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 1 desbalanceado.

El momento en que el sistema demuestre características desbalanceadas los flujos que circulan por sus elementos

también poseen desbalance como se observa en la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 14. Flujo de potencia de generadores del sistema 1 desbalanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
7	4	a	164.055	70.745	a	-163.550	-62.253
		b	159.768	54.272	b	-159.984	-47.191
		c	176.177	58.796	c	-176.466	-49.251
8	6	a	95.981	41.876	a	-95.074	-37.998
		b	87.217	35.704	b	-86.855	-34.567
		c	96.944	31.200	c	-98.213	-28.104

Tabla 15. Flujo de potencia de transformadores del sistema 1 desbalanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
3	4	a	-157.430	-41.623	a	163.550	62.253
		b	-166.649	-30.728	b	159.984	47.191
		c	-174.418	-45.277	c	176.466	49.251
2	6	a	-92.682	-26.743	a	95.074	37.998
		b	-87.405	-17.395	b	86.855	34.567
		c	-98.479	-25.922	c	98.213	28.104

Tabla 16. Flujo de potencia de líneas del sistema 1 desbalanceado.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
1	2	a	-45.151	-19.038	a	44.682	6.743
		b	-40.028	-19.247	b	40.405	5.395
		c	-46.262	-9.762	c	47.179	-2.378
1	5	a	24.071	20.290	a	-23.972	-21.790
		b	20.394	19.222	b	-20.139	-20.543
		c	24.544	8.469	c	-24.510	-9.868
1	5	a	35.201	26.440	a	-35.090	-27.889
		b	27.766	17.265	b	-27.700	-18.784
		c	44.393	11.653	c	-44.386	-12.996
3	1	a	32.455	12.741	a	-32.671	-22.235
		b	27.841	5.102	b	-27.480	-16.845
		c	36.778	3.343	c	-36.346	-13.162
3	1	a	31.625	11.251	a	-31.450	-20.456
		b	26.493	2.269	b	-25.652	-14.395
		c	34.875	3.822	c	-34.629	-13.799
3	5	a	45.745	9.038	a	-44.609	-15.329
		b	55.178	10.771	b	-53.441	-18.607
		c	50.799	18.605	c	-51.568	-24.067
3	5	a	47.606	8.593	a	-46.328	-14.992
		b	57.137	12.587	b	-55.719	-20.066
		c	51.966	19.507	c	-52.536	-25.070

La Tabla 17 demuestra que las pérdidas aumentan en comparación con la Tabla 11, dado que existen incrementos en los flujos de potencias a través de los elementos.

Tabla 17. Potencias totales del sistema 1 desbalanceado.

POTENCIAS	[MW]	[Mvar]
Generación total	780.143	292.592
Carga total	769.6	335.9
Pérdidas del sistema	10.543	-43.308

## 5.2 Sistema 2

Como en el sistema de prueba 1, el primer caso aplicado es un flujo de potencia con características totalmente balanceadas. Esto permite verificar los cambios que realiza el sistema dependiendo de las condiciones de trabajo.

### 5.2.1 Caso de prueba 1

En la Tabla 18 se puede apreciar los valores de magnitud y ángulo de los voltajes de barra por fases, tomando en cuenta que las magnitudes en las barras son iguales como se aprecia en la Figura 23. Perfil de voltaje en las barras del sistema 2 en condiciones balanceadas..

Tabla 18. Voltaje en las barras del sistema 2 balanceado

N°	FASE A		FASE B		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
1	1.020	6.574	1.020	-113.426	1.020	126.574
2	1.008	5.205	1.008	-114.795	1.008	125.205
3	1.013	9.795	1.013	-110.205	1.013	129.795
4	1.000	8.816	1.000	-111.184	1.000	128.816
5	1.020	8.514	1.020	-111.486	1.020	128.514
6	1.000	7.718	1.000	-112.282	1.000	127.718
7	1.040	-0.001	1.040	-120.001	1.040	119.999
8	1.000	-0.413	1.000	-120.413	1.000	119.587
9	0.975	4.056	0.975	-115.944	0.975	124.056
10	0.973	5.698	0.973	-114.302	0.973	125.698
11	0.930	0.336	0.930	-119.664	0.930	120.336
12	0.927	6.190	0.927	-113.810	0.927	126.190
13	0.988	0.147	0.988	-119.853	0.988	120.147
14	0.982	3.139	0.982	-116.861	0.982	123.139
15	1.000	8.816	1.000	-111.184	1.000	128.816
16	1.020	8.514	1.020	-111.486	1.020	128.514
17	1.040	-0.001	1.040	-120.001	1.040	119.999
18	1.020	6.575	1.020	-113.426	1.020	126.575

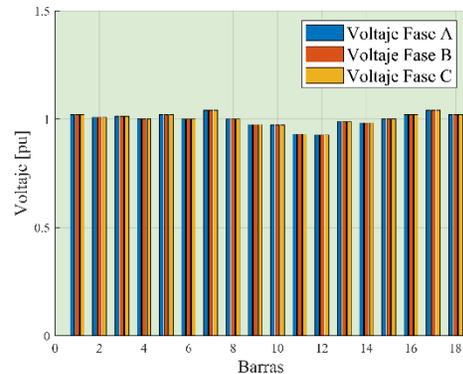


Figura 23. Perfil de voltaje en las barras del sistema 2 en condiciones balanceadas.

Las potencias de generación por fase en cada una de las maquinas sincrónicas del sistema, son iguales a la división de la potencia trifásica para las tres fases, como

se observa en la Figura 24. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado. y Figura 25. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado. debido a que el sistema es balanceado.

Tabla 19. Potencia trifásica del sistema 2 balanceado.

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
15	0.0	2.835
16	200.000	67.749
17	63.000	112.140
18	199.975	38.088

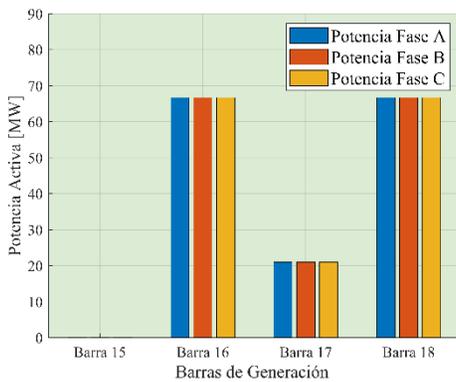


Figura 24. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado.

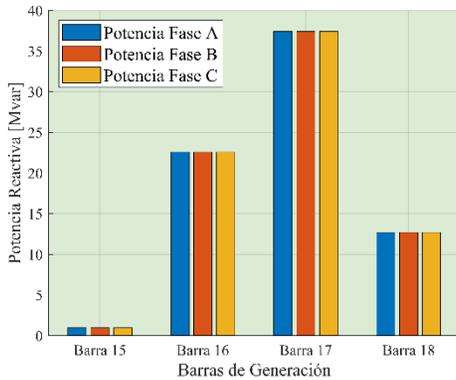


Figura 25. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 balanceado.

Al ser un sistema totalmente balanceado los flujos de potencia por fase de sus elementos son de igual valor como se puede apreciar en la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23

Tabla 20. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 balanceado

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
15	4	a	0.000	0.945	a	0.000	-0.945
		b	0.000	0.945	b	0.000	-0.945
		c	0.000	0.945	c	0.000	-0.945
16	5	a	66.667	22.583	a	-66.667	-22.583
		b	66.667	22.583	b	-66.667	-22.583
		c	66.667	22.583	c	-66.667	-22.583
17	7	a	21.000	37.380	a	-21.000	-37.380
		b	21.000	37.380	b	-21.000	-37.380
		c	21.000	37.380	c	-21.000	-37.380
18	1	a	66.658	12.696	a	-66.658	-12.696
		b	66.658	12.696	b	-66.658	-12.696
		c	66.658	12.696	c	-66.658	-12.696

Tabla 21. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 balanceado

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
2	1	a	-6.889	-0.571	a	6.889	0.737
		b	-6.889	-0.571	b	6.889	0.737
		c	-6.889	-0.571	c	6.889	0.737
4	3	a	-4.860	-0.724	a	4.860	0.809
		b	-4.860	-0.724	b	4.860	0.809
		c	-4.860	-0.724	c	4.860	0.809
6	5	a	-3.983	-2.309	a	3.983	2.384
		b	-3.983	-2.309	b	3.983	2.384
		c	-3.983	-2.309	c	3.983	2.384
8	7	a	-2.133	-3.600	a	2.133	3.660
		b	-2.133	-3.600	b	2.133	3.660
		c	-2.133	-3.600	c	2.133	3.660

Tabla 22. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 balanceado

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
1	7	a	17.527	-8.837	a	-16.806	9.502
		b	17.527	-8.837	b	-16.806	9.502
		c	17.527	-8.837	c	-16.806	9.502
1	9	a	8.909	4.128	a	-8.710	-4.928
		b	8.909	4.128	b	-8.710	-4.928
		c	8.909	4.128	c	-8.710	-4.928
2	11	a	6.889	0.571	a	-6.393	-0.195
		b	6.889	0.571	b	-6.393	-0.195
		c	6.889	0.571	c	-6.393	-0.195
3	5	a	3.109	-2.927	a	-3.081	1.566
		b	3.109	-2.927	b	-3.081	1.566
		c	3.109	-2.927	c	-3.081	1.566
4	12	a	4.860	1.669	a	-4.578	-1.548
		b	4.860	1.669	b	-4.578	-1.548
		c	4.860	1.669	c	-4.578	-1.548
6	12	a	3.983	2.309	a	-3.755	-2.252
		b	3.983	2.309	b	-3.755	-2.252
		c	3.983	2.309	c	-3.755	-2.252
7	13	a	2.340	7.551	a	-2.202	-8.577
		b	2.340	7.551	b	-2.202	-8.577
		c	2.340	7.551	c	-2.202	-8.577
8	11	a	2.133	3.600	a	-1.940	-3.586
		b	2.133	3.600	b	-1.940	-3.586
		c	2.133	3.600	c	-1.940	-3.586
9	10	a	-7.957	2.929	a	8.036	-3.360
		b	-7.957	2.929	b	8.036	-3.360
		c	-7.957	2.929	c	8.036	-3.360
13	14	a	-14.465	6.745	a	14.736	-6.626
		b	-14.465	6.745	b	14.736	-6.626
		c	-14.465	6.745	c	14.736	-6.626
3	10	a	12.682	2.092	a	-12.352	-2.486
		b	12.682	2.092	b	-12.352	-2.486
		c	12.682	2.092	c	-12.352	-2.486
3	10	a	12.682	2.092	a	-12.352	-2.486
		b	12.682	2.092	b	-12.352	-2.486
		c	12.682	2.092	c	-12.352	-2.486
5	14	a	16.215	0.983	a	-15.702	-0.853
		b	16.215	0.983	b	-15.702	-0.853
		c	16.215	0.983	c	-15.702	-0.853

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
5	14	a	16.215	0.983	a	-15.702	-0.853
		b	16.215	0.983	b	-15.702	-0.853
		c	16.215	0.983	c	-15.702	-0.853

Tabla 23. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 balanceado

Barra i		P. barra de envío	
		[MW]	[Mvar]
9	a	0.000	-6.334
	b	0.000	-6.334
	c	0.000	-6.334
11	a	0.000	-2.885
	b	0.000	-2.885
	c	0.000	-2.885
12	a	0.000	-2.867
	b	0.000	-2.867
	c	0.000	-2.867
13	a	0.000	-6.501
	b	0.000	-6.501
	c	0.000	-6.501

La Tabla 24 permite apreciar cual es el valor total de la potencia de las unidades generadoras, así como la carga total y las pérdidas que existentes en el sistema.

Tabla 24. Potencias totales del sistema 2 balanceado.

POTENCIAS	[MW]	[Mvar]
Generación total	462.975	220.812
Carga total	450.0	283.8
Pérdidas del sistema	12.975	-62.988

### 5.2.2 Caso de prueba 2

El caso de prueba dos simula un acontecimiento brusco para el sistema, como es la pérdida de una de las fases de una línea de transmisión, la cual provoca que se presente un desbalance en la red de transmisión.

En la Tabla 25 se pueden apreciar los valores de magnitud y ángulos de los voltajes en las barras del sistema. Tanto en la Tabla 25 como en la Figura 26 se puede apreciar que la pérdida de la fase b en la línea 13-14 provoca afectaciones al voltaje en las barras terminales de la misma. Siendo las únicas que poseen afectación por estar en relación estricta con la línea fallada.

Tabla 25. Voltaje en las barras del sistema 2 con red desbalanceada.

Nº	FASE A		FASE B		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
1	1.020	6.574	1.020	-113.426	1.020	126.574
2	1.008	35.119	1.008	-84.881	1.008	155.119
3	1.012	12.138	1.012	-107.862	1.012	132.138
4	1.000	41.230	1.000	-78.770	1.000	161.230
5	1.020	11.862	1.020	-108.138	1.020	131.862

Nº	FASE A		FASE B		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
6	1.000	40.996	1.000	-79.004	1.000	160.996
7	1.040	-1.100	1.040	-121.100	1.040	118.900
8	0.999	28.559	0.999	-91.441	0.999	148.559
9	0.974	5.201	0.974	-114.799	0.974	125.201
10	0.972	7.451	0.972	-112.549	0.972	127.451
11	0.930	29.782	0.930	-90.218	0.930	149.782
12	0.928	39.037	0.928	-80.963	0.928	159.037
13	0.993	1.327	0.996	-128.461	0.980	120.741
14	0.988	5.256	0.981	-108.922	0.971	124.986
15	1.000	41.230	1.000	-78.770	1.000	161.230
16	1.020	11.862	1.020	-108.138	1.020	131.862
17	1.040	-1.100	1.040	-121.100	1.040	118.900
18	1.020	6.575	1.020	-113.426	1.020	126.575

Si se realiza el estudio de desequilibrio de voltaje en el momento que la línea 13-14 pierde la fase b y antes que la línea de transmisión salga de funcionamiento por completo, se puede apreciar que el desbalance en las barras es elevado, incluso supera por completo el límite máximo que tienen las normas como valor permitido.

Este acontecimiento se produce en el tiempo en que la línea 13-14 se encuentre en funcionamiento después de presentar la pérdida de la fase. Si llegase a permanecer demasiado tiempo podría producirse fallas en los elementos del sistema. En la Figura 27 se puede apreciar lo descrito anteriormente.

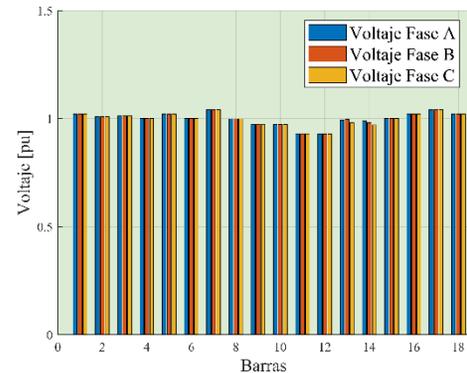


Figura 26. Perfil de voltajes en las barras del sistema 2 con red desbalanceada.

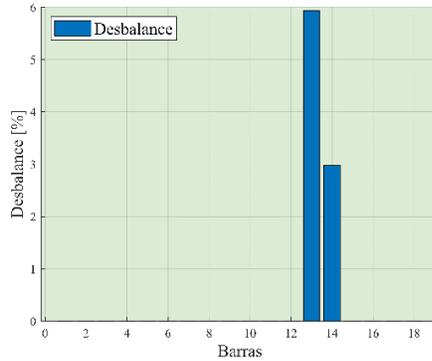


Figura 27. Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 2 con red desbalanceada.

En la Tabla 26 se puede apreciar que las potencias reactivas trifásicas de cada unidad de generación sufrieron un cambio debido a la pérdida de la fase b en la línea 13-14, pero los generadores que sufrieron un cambio brusco en su distribución por fase son los generadores de la barra 5 y 7 (barra interna 16 y 17 respectivamente), esto se debe a que la carga en la barra 13 es suministrada por aquellos generadores y al momento de perder la fase b, el generador de la barra 5 debe reducir significativamente su generación en la fase b para solo suministrar energía por esa fase a la carga conectada en la barra 14. Mientras que el generador 7 debe aumentar su generación en la fase b para poder satisfacer la potencia en esa fase de la carga conectada en la barra 13 debido a que el generador 5 ya no puede suministrarla por la pérdida de la fase.

Los generadores 5 y 7 deben reacomodar su potencia en las fases a y c para satisfacer los valores de potencia fija seteados al igual que satisfacer las cargas del sistema. Esta descripción se la puede apreciar en la Figura 28 y Figura 29, donde se puede observar por medio de graficas de barra la nueva distribución que realizan los generadores en sus fases.

Tabla 26. Potencia trifásica del sistema 2 con red desbalanceada.

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
15	0.0	4.148

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
16	200.000	69.984
17	63.000	114.477
18	201.865	38.834

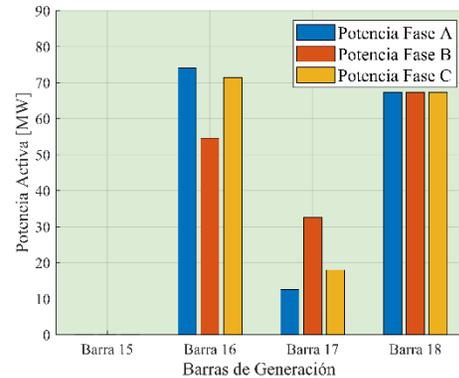


Figura 28. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada.

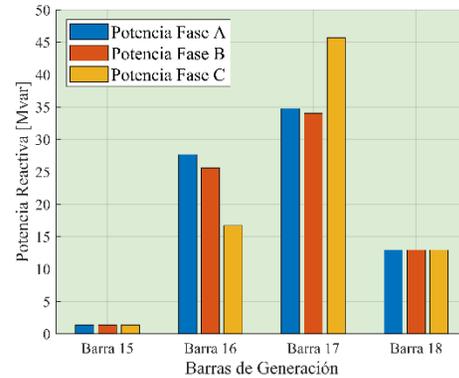


Figura 29. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada.

En la Tabla 27. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 con red desbalanceada. se puede apreciar el flujo desbalanceado que entregan las unidades generadoras que están dentro de la afectación de la pérdida de la fase. En la Tabla 29 se pueden apreciar que el flujo de potencia que circula por la fase b de la línea 13-14 es cero debido a la pérdida. En la Tabla 30 se observa que compensador que se encuentra conectado en la barra 13, entrega valores de potencia reactiva de

diferente valor por fase debido a la pérdida de la fase.

Tabla 27. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 con red desbalanceada.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
15	4	a	0.000	1.383	a	0.000	-1.383
		b	0.000	1.383	b	0.000	-1.383
		c	0.000	1.383	c	0.000	-1.383
16	5	a	74.029	27.680	a	-74.029	-27.680
		b	54.575	25.585	b	-54.575	-25.585
		c	71.396	16.719	c	-71.396	-16.719
17	7	a	12.507	34.764	a	-12.507	-34.764
		b	32.499	34.042	b	-32.499	-34.042
		c	17.994	45.670	c	-17.994	-45.670
18	1	a	67.288	12.945	a	-67.288	-12.945
		b	67.288	12.945	b	-67.288	-12.945
		c	67.288	12.945	c	-67.288	-12.945

Tabla 28. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 con red desbalanceada.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
2	1	a	-7.327	-0.372	a	7.327	0.558
		b	-7.327	-0.372	b	7.327	0.558
		c	-7.327	-0.372	c	7.327	0.558
4	3	a	-4.500	-0.520	a	4.500	0.592
		b	-4.500	-0.520	b	4.500	0.592
		c	-4.500	-0.520	c	4.500	0.592
6	5	a	-4.335	-2.063	a	4.335	2.144
		b	-4.335	-2.063	b	4.335	2.144
		c	-4.335	-2.063	c	4.335	2.144
8	7	a	-1.764	-3.888	a	1.764	3.951
		b	-1.764	-3.888	b	1.764	3.951
		c	-1.764	-3.888	c	1.764	3.951

Tabla 29. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 con red desbalanceada.

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
1	7	a	20.678	-9.472	a	-19.704	10.894
		b	20.678	-9.472	b	-19.704	10.894
		c	20.678	-9.472	c	-19.704	10.894
1	9	a	5.950	5.191	a	-5.814	-6.177
		b	5.950	5.191	b	-5.814	-6.177
		c	5.950	5.191	c	-5.814	-6.177
2	11	a	7.327	0.372	a	-6.770	0.078
		b	7.327	0.372	b	-6.770	0.078
		c	7.327	0.372	c	-6.770	0.078
3	5	a	0.342	-2.165	a	-0.338	0.733
		b	0.342	-2.165	b	-0.338	0.733
		c	0.342	-2.165	c	-0.338	0.733
4	12	a	4.500	1.903	a	-4.245	-1.813
		b	4.500	1.903	b	-4.245	-1.813
		c	4.500	1.903	c	-4.245	-1.813
6	12	a	4.335	2.063	a	-4.088	-1.984
		b	4.335	2.063	b	-4.088	-1.984
		c	4.335	2.063	c	-4.088	-1.984
7	13	a	-2.886	3.253	a	2.922	-4.409
		b	17.106	2.531	b	-16.667	-1.718
		c	2.601	14.159	c	-1.992	-14.787
8	11	a	1.764	3.888	a	-1.563	-3.863
		b	1.764	3.888	b	-1.563	-3.863
		c	1.764	3.888	c	-1.563	-3.863
9	10	a	-10.853	4.164	a	11.002	-4.390
		b	-10.853	4.164	b	11.002	-4.390
		c	-10.853	4.164	c	11.002	-4.390
13	14	a	-19.589	2.646	a	19.720	-1.844
		b	0.000	0.000	b	0.000	0.000
		c	-14.675	12.856	c	15.398	-12.174
3	10	a	14.245	1.820	a	-13.834	-1.972
		b	14.245	1.820	b	-13.834	-1.972
		c	14.245	1.820	c	-13.834	-1.972

Barra i	Barra j	P. barra de envío		P. barra de recepción			
		[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]		
3	10	a	14.245	1.820	a	-13.834	-1.972
		b	14.245	1.820	b	-13.834	-1.972
		c	14.245	1.820	c	-13.834	-1.972
5	14	a	18.390	3.995	a	-18.225	-3.169
		b	8.538	3.022	b	-8.253	-4.168
		c	17.076	-1.340	c	-16.081	1.857
5	14	a	18.308	4.141	a	-18.162	-3.319
		b	8.706	3.020	b	-8.414	-4.165
		c	16.990	-1.485	c	-15.984	1.984

Tabla 30. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 con red desbalanceada.

Barra i	P. barra de envío		
	[MW]	[Mvar]	
9	a	0	-6.320
	b	0	-6.320
	c	0	-6.320
11	a	0	-2.881
	b	0	-2.881
	c	0	-2.881
12	a	0	-2.870
	b	0	-2.870
	c	0	-2.870
13	a	0	-6.570
	b	0	-6.615
	c	0	-6.402

La Tabla 31 da a conocer un incremento en el valor de pérdidas en comparación con la Tabla 24, debido a que se producen incrementos en los flujos de algunos elementos, produciendo así mayores pérdidas en el sistema.

Tabla 31. Potencias totales del sistema 2 con red desbalanceada.

POTENCIAS	[MW]	[Mvar]
Generación total	464.865	227.443
Carga total	450.0	283.8
Pérdidas del sistema	14.865	-56.357

Cabe mencionar que todo este análisis se lo realiza antes de que la línea 13-14 salga por completo de servicio, debido a que al momento de salir de servicio los flujos de potencia se redireccionaran ocasionando que el sistema vuelva a estar en balance dado que todos los demás elementos tienen características balanceadas.

### 5.2.3 Caso de prueba 3

En este caso de estudio se toma en cuenta el desbalance de la carga como se indica en la Tabla 5 y la impedancia interna de cada generador logrando que todo el sistema entre en desequilibrio.

En la Tabla 32 se puede apreciar los voltajes de las barras del sistema y se puede observar que existe una diferencia entre las magnitudes y los ángulos de las barras terminales e internas de los generadores, esto es provocado al momento de tomar en cuenta la impedancia de los generadores. Esta diferencia se puede apreciar al comparar la Tabla 18 con la Tabla 32.

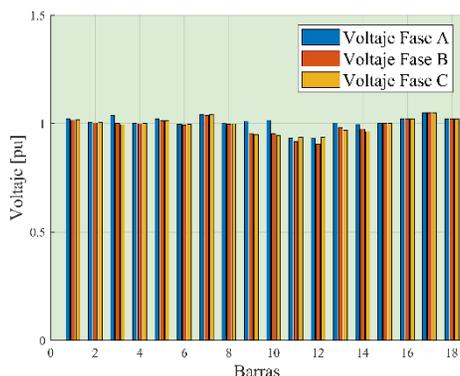


Figura 30. Perfil de voltajes en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada.

En la Figura 30 se puede apreciar gráficamente los desbalances entre las magnitudes de los voltajes.

Tabla 32. Voltaje en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada.

N°	FASE A		FASE C		FASE C	
	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]	V [p.u.]	Ang [°]
1	1.020	5.529	1.016	-114.443	1.016	125.322
2	1.006	34.154	1.003	-86.015	1.006	154.143
3	1.037	8.873	1.000	-110.240	0.995	127.411
4	1.000	37.717	0.999	-82.349	1.000	157.700
5	1.020	7.568	1.012	-112.323	1.012	127.166
6	0.996	36.834	0.992	-83.513	0.996	156.712
7	1.040	-1.053	1.037	-121.255	1.040	118.742
8	1.000	28.403	0.997	-91.693	0.999	148.477
9	1.011	3.833	0.954	-115.987	0.950	120.873
10	1.015	5.335	0.953	-113.952	0.945	122.269
11	0.932	29.441	0.916	-91.192	0.937	149.283
12	0.931	35.668	0.906	-85.266	0.936	154.899
13	1.003	-0.774	0.981	-120.200	0.969	117.946
14	0.996	2.200	0.975	-117.169	0.963	121.040
15	1.000	37.689	1.000	-82.311	1.000	157.689
16	1.021	8.576	1.021	-111.424	1.021	128.576
17	1.050	-0.858	1.050	-120.858	1.050	119.142
18	1.021	6.575	1.021	-113.426	1.021	126.575

De todas las barras de este sistema las únicas que no poseen desequilibrio de voltaje, son las barras internas de los generadores, debido a que es una característica propia de las máquinas. En la Figura 31 se puede apreciar que todas

las barras están dentro del límite permisible del desequilibrio de voltaje, considerando que las barras 9 y 10 poseen el límite mayor entre todas.

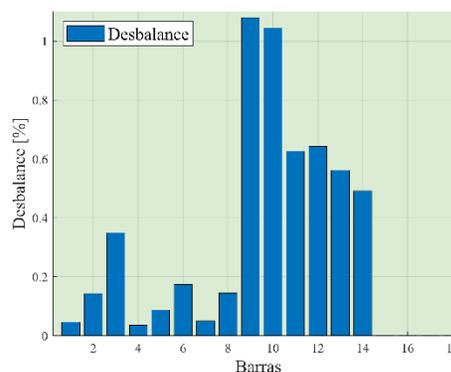


Figura 31. Desequilibrio de voltaje en las barras del sistema 2 con carga desbalanceada.

La Tabla 33 muestra el valor de potencia trifásica de cada una de las maquinas generadoras. Tomando en cuenta que el sistema tiene características desbalanceadas, la distribución de potencia por fase no es idéntica y se realiza como se muestra en la Figura 32 y Figura 33.

Tabla 33. Potencia trifásica del sistema 2 con carga desbalanceada.

BARRA	P. GENERACION	
	[MW]	[Mvar]
15	0.0	5.227
16	200.000	69.555
17	63.000	116.397
18	200.322	41.262

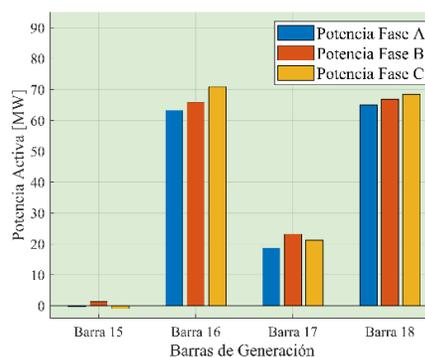


Figura 32. Potencia activa por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con carga desbalanceada.

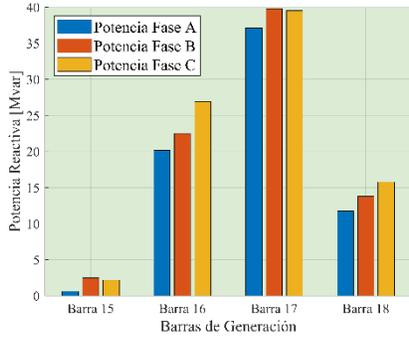


Figura 33. Potencia reactiva por fase entregada por cada unidad generadora del sistema 2 con red desbalanceada.

Como se puede observar en la Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36 y Tabla 37 los flujos de potencia que circulan por cada uno de los elementos, poseen valores diferentes por fase debido a que la potencia de las cargas esta desequilibrada.

Tabla 34. Flujo de potencia de generadores del sistema 2 con carga desbalanceada.

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
15	4	a	-0.335	0.594	a	0.336	-0.594
		b	1.281	2.469	b	-1.282	-2.466
		c	-0.946	2.163	c	0.946	-2.162
16	5	a	63.242	20.153	a	-63.499	-19.011
		b	65.870	22.477	b	-65.619	-21.247
		c	70.888	26.925	c	-70.882	-24.945
17	7	a	18.662	37.098	a	-18.605	-36.674
		b	23.177	39.797	b	-23.160	-39.141
		c	21.161	39.503	c	-21.234	-38.983
18	1	a	64.968	11.745	a	-65.098	-10.546
		b	66.890	13.761	b	-66.771	-12.505
		c	68.464	15.756	c	-68.453	-14.185

Tabla 35. Flujo de potencia de transformadores del sistema 2 con carga desbalanceada.

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
2	1	a	-6.618	-0.321	a	6.725	0.473
		b	-7.292	-1.052	b	7.165	0.674
		c	-6.744	-0.224	c	6.764	0.953
4	3	a	-5.026	-0.976	a	5.902	0.523
		b	-4.132	0.190	b	4.178	0.795
		c	-5.623	0.536	c	4.702	-0.802
6	5	a	-3.786	-1.986	a	3.762	2.033
		b	-4.287	-2.599	b	4.210	2.237
		c	-3.708	-1.979	c	3.808	2.513
8	7	a	-2.058	-3.494	a	1.938	3.542
		b	-2.512	-3.944	b	2.420	3.643
		c	-1.875	-3.569	c	2.087	4.008

Tabla 36. Flujo de potencia de líneas del sistema 2 con carga desbalanceada.

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
1	7	a	17.620	-9.091	a	-16.869	9.774
		b	17.753	-9.069	b	-16.987	9.858
		c	17.444	-9.258	c	-16.742	9.970
1	9	a	6.753	2.164	a	-6.777	-3.374
		b	8.852	4.400	b	-8.434	-5.229
		c	11.244	5.991	c	-10.977	-6.077

Barra i	Barra j		P. barra de envío		P. barra de recepción		
			[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	
2	11	a	6.618	0.321	a	-6.143	-0.003
		b	7.292	1.052	b	-6.726	-0.561
		c	6.744	0.224	c	-6.290	0.113
3	5	a	3.826	-1.377	a	-3.749	-0.020
		b	3.538	-2.755	b	-3.496	1.488
		c	1.781	-3.135	c	-1.809	1.773
4	12	a	4.691	1.570	a	-4.421	-1.515
		b	5.414	2.276	b	-5.011	-2.012
		c	4.677	1.627	c	-4.455	-1.518
6	12	a	3.786	1.986	a	-3.579	-1.994
		b	4.287	2.599	b	-3.989	-2.454
		c	3.708	1.979	c	-3.545	-1.959
7	13	a	1.536	7.359	a	-1.443	-8.531
		b	1.727	7.639	b	-1.483	-8.641
		c	3.889	9.004	c	-3.752	-9.697
8	11	a	2.058	3.494	a	-1.857	-3.501
		b	2.512	3.944	b	-2.274	-3.845
		c	1.875	3.569	c	-1.710	-3.585
9	10	a	-8.223	2.694	a	8.328	-3.195
		b	-8.566	2.797	b	8.669	-3.130
		c	-7.023	3.093	c	7.055	-3.534
13	14	a	-14.557	7.233	a	14.826	-7.114
		b	-14.517	7.053	b	14.796	-6.904
		c	-14.248	6.952	c	14.533	-6.791
3	10	a	11.803	1.461	a	-11.664	-2.152
		b	12.809	2.014	b	-12.334	-2.435
		c	13.425	3.002	c	-13.027	-2.983
3	10	a	11.803	1.461	a	-11.664	-2.152
		b	12.809	2.014	b	-12.334	-2.435
		c	13.425	3.002	c	-13.027	-2.983
5	14	a	15.751	0.472	a	-15.418	-0.416
		b	15.925	0.518	b	-15.373	-0.557
		c	16.961	1.600	c	-16.287	-1.122
5	14	a	15.735	0.526	a	-15.408	-0.470
		b	15.980	0.504	b	-15.424	-0.540
		c	16.922	1.560	c	-16.246	-1.088

Tabla 37. Flujo de potencia de compensadores del sistema 2 con carga desbalanceada.

Barra i		P. barra de envío	
		[MW]	[Mvar]
9	a	0	-6.820
	b	0	-6.068
	c	0	-6.016
11	a	0	-2.895
	b	0	-2.794
	c	0	-2.928
12	a	0	-2.891
	b	0	-2.734
	c	0	-2.923
13	a	0	-6.702
	b	0	-6.412
	c	0	-6.255

Como se muestra en la Tabla 38 las pérdidas han aumentado en comparación con la Tabla 24, dado que al poseer cargas desbalanceadas los flujos son diferentes y producen unas mayores pérdidas.

Tabla 38. Potencias totales del sistema 2 con carga desbalanceada.

POTENCIAS	[MW]	[Mvar]
Generación total	463.322	232.440
Carga total	450.001	283.799
Pérdidas del sistema	13.321	-51.359

## 6 CONCLUSIONES

El presente modelo permite la simulación de sistemas de potencia desbalanceados con elementos como unidades generadoras con sus reguladores de voltaje, transformadores con diferentes; para así observar cual es la participación de cada uno de ellos en el sistema de potencia y como lo van afectando al producirse un cambio en sus características.

Cuando se tiene sistemas desbalanceados, es muy importante la verificación del desequilibrio existente en los voltajes, verificando que no superen el límite establecido por la normativa que se emplea en el sistema, debido a que la violación de este provocara sanciones económicas por parte del ente regulador.

El método iterativo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, demuestra facilidad en el momento de la convergencia, debido a que la diferencia entre el número de iteraciones necesarias para resolver un sistema totalmente desbalanceado es baja, en comparación con la resolución de un sistema balanceado.

En el caso de sistemas desbalanceados cuando se realizan flujos de potencia balanceados por medio de la secuencia positiva, la conexión D-Y en el transformador es simulada como una conexión Y-Y, despreciando el desfase que existe en ángulos de los voltajes nodales. Pero al poseer un sistema desbalanceado no se puede hacer la misma apreciación debido a que la conexión D-Y en los transformadores permite el intercambio de potencia entre las fases del sistema.

### 6.1 TRABAJOS FUTUROS

Como se observa en el análisis de resultados el modelo puede ser sometido a diferentes tipos de desbalance,

obteniendo una respuesta y una rápida convergencia, es así como este modelo puede ser base de algunas investigaciones relacionadas con:

- Ubicación óptima de elementos de compensación reactiva con el fin de mejorar la calidad del voltaje en todos los puntos del sistema
- Análisis de fallas en sistema de potencia desbalanceados, debido a su versatilidad al momento de analizar cambios bruscos que afectarían al sistema.
- Simulación del cambio automático de taps en los transformadores, al momento de presentarse desbalances en los sistemas.
- Estudios del impacto que producen en los sistemas eléctricos desbalanceados al esquema de protecciones.

## 7 REFERENCIAS

- [1] R. Patiño Bedolla, "Análisis y control de flujos de potencia en estado estable," Universidad Autónoma de León, 1995.
- [2] INECEL, "Ley básica de Electrificación, 1973," 2003.
- [3] A. D. M. Antonio, "El sistema de transmisión en un mercado desregulado," Escuela Politécnica Nacional, 1998.
- [4] INECEL, "Visión general del servicio de energía eléctrica en el Ecuador," 1978.
- [5] INECEL, "Organización del sector eléctrico ecuatoriano," 1977.
- [6] ARCONEL, "Regulación No.ARCONEL-000/19," 2008.
- [7] G. A. Mosquera Avila and R. Sempértegui Alvarez, "Optimización de proyectos de mantenimiento de redes de distribución eléctrica basado en el

- riesgo de la ocurrencia de fallas de sus equipos.,” Universidad De Cuenca Facultad De Ingeniería, 2015.
- [8] CONELEC, “Regulación No. CONELEC-003/08,” 2009.
- [9] N. Muñoz, F. Villada, and D. R. Cadavid, “Análisis de los Flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos y su Interpretación Física,” *Inf. tecnológica*, vol. 23, no. 5, pp. 57–68, 2012.
- [10] J. M. Garcia Martinez, “Análisis de sistemas desbalanceados para el diseño y operación de redes eléctricas,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 1989.
- [11] L. A. Gallego, J. M. Lopez Lezama, and D. A. Mejia Giraldo, “Flujo de potencia trifásico desbalanceados en sistemas de distribución con generación distribuida,” no. 43, pp. 43–48, 2009.
- [12] R. Berg, E. S. Hawkins, and W. W. Pleines, “Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits,” no. 4, pp. 415–421, 1967.
- [13] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE, 2009.
- [14] J. O. Arreaga Chalen and L. C. Vargas Salvador, “Análisis de cargas balanceadas y/o desbalanceadas usando el banco de pruebas para circuitos eléctricos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil,” Universidad Politecnica Salesiana, 2018.
- [15] A. Martines Mares, “Análisis y Estudio de Líneas de Transmisión en C.A. desbalanceadas,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2002.
- [16] J. R. Lopez Beltran and E. N. Ventura Gamez, “Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial,” Universidad de el Salvador, 2019.
- [17] ARCONEL, “Regulacion No. ARCONEL-005-2018.pdf,” *Arconel*. pp. 1–38, 2019.
- [18] AEN/CTN and CENELEC, “IEC 61000-4-30:2003.” p. 48, 2003.
- [19] IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2019. 2019.
- [20] D. H. Correa Masache, “Modelación y simulación del grupo 1 de la central hidroeléctrica Illuchi 1 de Elepco S.A,” Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [21] M. M. Heredia Borja and R. H. Intriago Bernita, “Análisis de sistemas trifásicos de transformadores conexión D - Y.,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [22] J. E. Loor Mina and Y. K. Barrios Romero, “Aplicación de un software para el calculo, diseño y construcción de transformadores de potencia,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2011.
- [23] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, Third. 2008.
- [24] F. Gonzalez-longatt, “Impedancia Serie de Sistemas de Transmisión,” pp. 1–29, 2016.
- [25] D. A. Chaparro Ortiz, “Modelo escalable y dependiente de frecuencia para la representación de líneas de transmisión acopladas en tecnología de PCB,” Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2019.
- [26] L. Gyugyi, “Dynamic

- compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 2, pp. 904–911, 1994.
- [27] CREG, “Gestión del flujo de potencia reactiva,” pp. 150–191, 2005.
- [28] J. Jativa, G. Constante, and G. Cabrera, “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” *Rev. EPN*, vol. 33, no. 3, p. 7, 2014.
- [29] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, Second. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [30] J. Arrillaga and C. P. Arnold, *Computer Analysis Power Systems*. 1970.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 39. Matriz de estado del arte

FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DESBALANCEADOS BASADO EN UNA DESCOMPOSICIÓN POR FASES																				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE SOLUCIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Sistemas Desequilibrados	Elementos en Componentes de Fase	Flujos de Potencia	Método Newton-Raphson Desacoplado Rápido	Flujos de Potencia en sistemas desbalanceados	Modelación del sistema trifásico	Modelado de unidades generadoras	Implementación del modelo matemático	Condiciones de desbalance de carga	Desbalance en líneas de transmisión	Variables de entrada para el desarrollo de la programación	Usos de matrices de admitancias e impedancia	Newton Raphson	Algoritmo de flujos de potencia	Modelación del sistema de potencia	Simulación de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson	Flujos de potencia activa y reactiva en los elementos
1	1995	Análisis y control de flujos de potencia en estado estable	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2003	Ley básica de Electrificación, 1973	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	1998	El sistema de transmisión en un mercado desregulado	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2015	Optimización de proyectos de mantenimiento de redes de distribución eléctrica basado en el riesgo de la ocurrencia de fallas de sus equipos	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	2012	Análisis de los Flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos y su Interpretación Física	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	1989	Análisis de sistemas desbalanceados para el diseño y operación de redes eléctricas	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2009	Flujo de potencia trifásico desbalanceados en sistemas de distribución con generación distribuida	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	1967	Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits	104	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	2009	Analysis of Faulted Power Systems	1038	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10	2018	Análisis de cargas balanceadas y/o desbalanceadas usando el banco de pruebas para circuitos eléctricos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>								
11	2002	Análisis y Estudio de líneas de Transmisión en C.A. desbalanceadas	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2019	Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	2003	IEC 61000-4-30:2003	14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	2007	Modelación y simulación del grupo 1 de la central hidroeléctrica Illuchi 1 de Elepco S. A	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2015	Análisis de sistemas trifásicos de transformadores conexión D - Y	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	2011	Aplicación de un software para el cálculo, diseño y construcción de transformadores de potencia	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2008	Modern Power System Analysis	997	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	2016	Impedancia Serie de Sistemas de Transmisión	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>								
19	2019	Modelo escalable y dependiente de frecuencia para la representación de líneas de transmisión acopladas en tecnología de PCB	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	1994	Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources	702	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>								
21	2005	Gestión del flujo de potencia reactiva	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>													
22	2014	Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2001	Computer Modelling of Electrical Power Systems	808	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	1970	Computer Analysis Power Systems	422	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:				9	10	9	3	5	6	8	7	6	9	10	7	7	5	7	6	6	8	4

## 7.2 Resumen de Indicadores

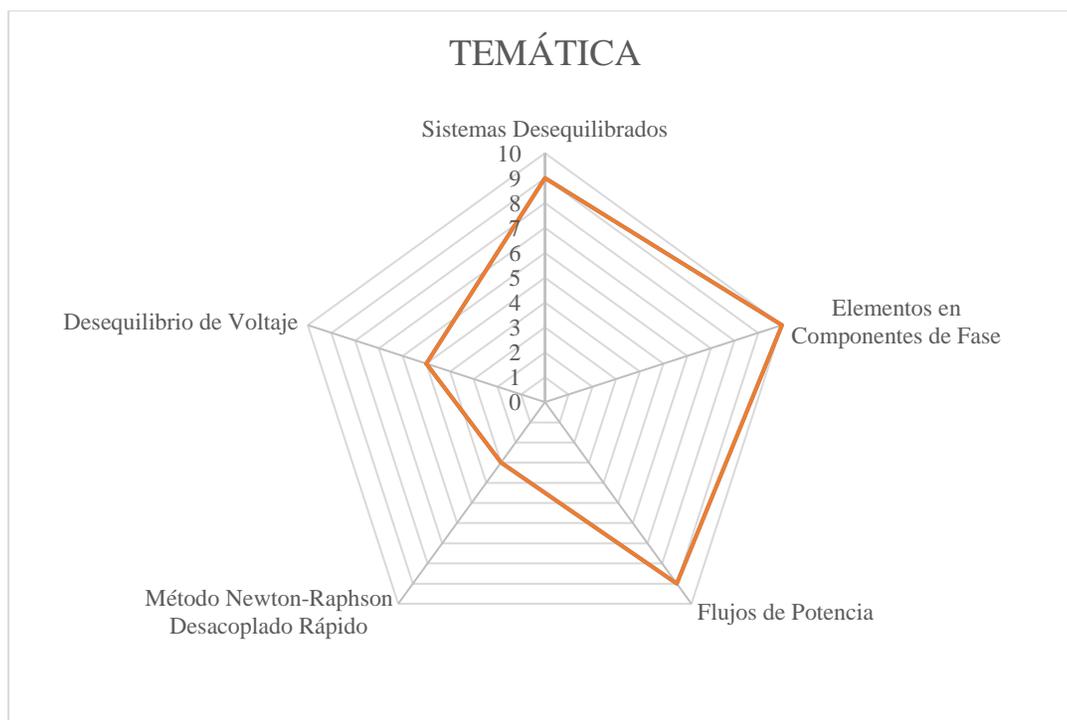


Figura 34. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

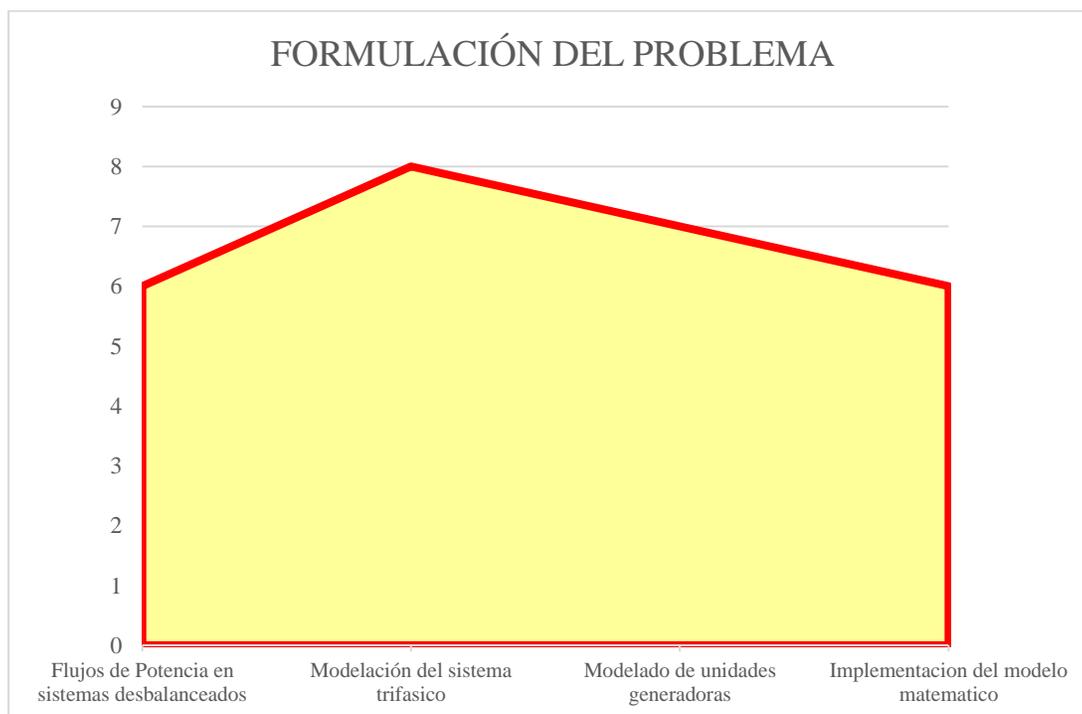
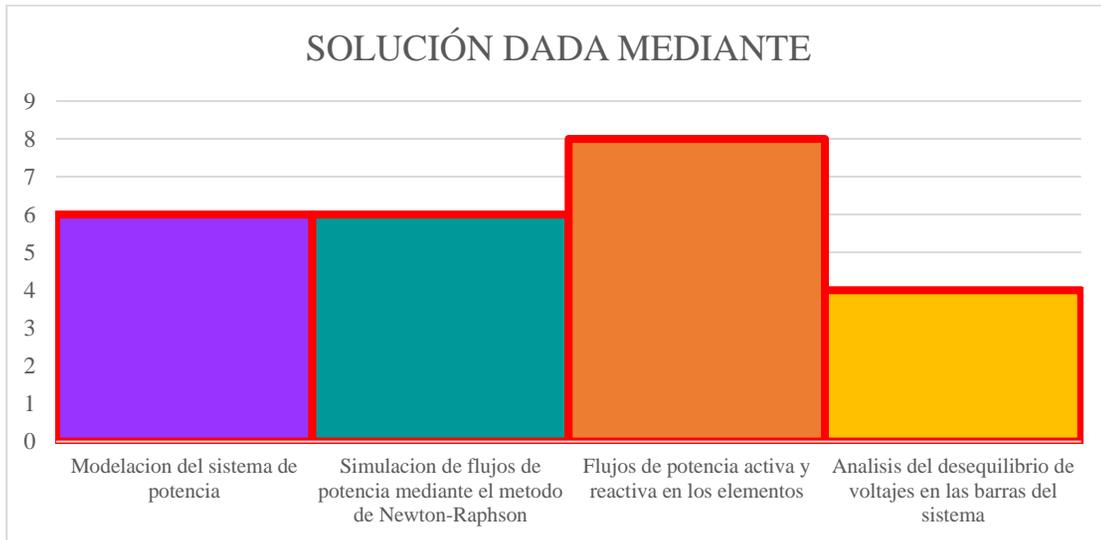


Figura 35. Indicador de formulación del problema - Estado del arte



**Figura 36.** Indicador de solución - Estado del arte

## 8 ANEXOS

### 8.1 Datos de los elementos del sistema de prueba 1

#### 8.1.1 Sistema balanceado

Tabla 40. Datos generales del sistema 1 en condiciones balanceadas.

Datos del Sistema de Potencia	
Potencia base (MVA)	33.3
Número de barras	6
Número máximo de líneas acopladas	1
Número de transformadores	2
Número de generadores	2
Número de compensadores	0

Tabla 41. Datos de cargas por fase del sistema 1 en condiciones balanceadas.

BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	50	15	50	15	50	15
2	48	20	48	20	48	20
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	150	80	150	80	150	80
6	0	0	0	0	0	0

Tabla 42. Datos de los generadores del sistema 1 en condiciones balanceadas.

INTERNA	TERMINAL	CERO		POSITIVA		NEGATIVA		P. TRIFÁSICA	REG. VOL.
		R	X	R	X	R	X	P.U.	FASE A
7	4	0	0.001	0	0.001	0	0.001	15	1.045
8	6	0	0.001	0	0.001	0	0.001	slack	1.05

Tabla 43. Datos de los transformadores del sistema 1 en condiciones balanceadas.

Tipo de conexión						
1- Conexión Yn-Yn						
2- Conexión Yn-Y						
3- Conexión Yn-D						
4- Conexión Y-Y						
5- Conexión Y-D						
6- Conexión D-D						
Barra i	Barra j	R pu	X pu	Tap prim	Tap sec	Conexión
3	4	0.0006	0.0164	1	1	1
2	6	0.002	0.038	1	1	1

Tabla 44. Datos de las líneas simples del sistema 1 en condiciones balanceadas.

Barra_i	Barra_j	R			X			Y		
1	2	0.006	0.002	0.002	0.045	0.015	0.015	0.35	-0.06	-0.06
		0.002	0.006	0.002	0.015	0.045	0.015	-0.06	0.35	-0.06
		0.002	0.002	0.006	0.015	0.015	0.045	-0.06	-0.06	0.35
1	5	0.0023	0.0012	0.0012	0.0147	0.008	0.008	0.045	-0.008	-0.008
		0.0012	0.0023	0.0012	0.008	0.0147	0.008	-0.008	0.045	-0.008
		0.0012	0.0012	0.0023	0.008	0.008	0.0147	-0.008	-0.008	0.045
1	5	0.0023	0.0014	0.0014	0.0147	0.009	0.009	0.044	-0.01	-0.01
		0.0014	0.0023	0.0014	0.009	0.0147	0.009	-0.01	0.044	-0.01
		0.0014	0.0014	0.0023	0.009	0.009	0.0147	-0.01	-0.01	0.044
3	1	0.0156	0.008	0.008	0.1088	0.032	0.032	0.2967	-0.06	-0.06
		0.008	0.0156	0.008	0.032	0.1088	0.032	-0.06	0.2967	-0.06
		0.008	0.008	0.0156	0.032	0.032	0.1088	-0.06	-0.06	0.2967
3	1	0.0156	0.008	0.008	0.1088	0.032	0.032	0.2967	-0.06	-0.06
		0.008	0.0156	0.008	0.032	0.1088	0.032	-0.06	0.2967	-0.06
		0.008	0.008	0.0156	0.032	0.032	0.1088	-0.06	-0.06	0.2967
3	5	0.0133	0.006	0.006	0.0904	0.04	0.04	0.2569	-0.05	-0.05
		0.006	0.0133	0.006	0.04	0.0904	0.04	-0.05	0.2569	-0.05
		0.006	0.006	0.0133	0.04	0.04	0.0904	-0.05	-0.05	0.2569
3	5	0.0133	0.006	0.006	0.0904	0.04	0.04	0.2569	-0.05	-0.05
		0.006	0.0133	0.006	0.04	0.0904	0.04	-0.05	0.2569	-0.05
		0.006	0.006	0.0133	0.04	0.04	0.0904	-0.05	-0.05	0.2569

### 8.1.2 Sistema Desbalanceado

Tabla 45. Datos generales del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Datos del Sistema de Potencia	
Potencia base (MVA)	33.3
Número de barras	6
Número máximo de líneas acopladas	4
Número de transformadores	2
Número de generadores	2
Número de compensadores	0

Tabla 46. Datos de carga por fase del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	50	15	45	14	48.3	16.6
2	48	20	47	12	51.3	28.3
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	150	80	157	78	173	72
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

Tabla 47. Datos de los generadores del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

INTERNA	TERMINAL	CERO		POSITIVA		NEGATIVA		P TRIFASICA P.U.	REG VOL FASE A
		R	X	R	X	R	X		
7	4	0	0.08	0	0.01	0	0.021	15.015	1.045
8	6	0	0.15	0	0.01	0	0.091	slack	1.05

Tabla 48. Datos de los transformadores del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Tipo de conexión						
1- Conexión Yn-Yn						
2- Conexión Yn-Y						
3- Conexión Yn-D						
4- Conexión Y-Y						
5- Conexión Y-D						
6- Conexión D-D						
Barra i	Barra j	R pu.	X pu.	Tap prim.	Tap sec.	Conexión
3	4	0.0006	0.0164	1.045	1.732	3
2	6	0.002	0.0388	1.022	1.732	3

Tabla 49. Datos de las líneas simples del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Barra_i	Barra_j	R			X			Y		
1	2	0.006	0.002	0.001	0.045	0.015	0.017	0.35	-0.06	-0.04
		0.002	0.006	0.002	0.015	0.05	0.017	-0.06	0.352	-0.06
		0.001	0.002	0.007	0.017	0.017	0.047	-0.04	-0.06	0.34

Tabla 50. Datos de las líneas paralelas y dobles sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Barra_i	Barra_j	R					
1	5	0.0023	0.0015	0.0014	0.0009	0.0008	0.0008
1	5	0.0015	0.0022	0.0015	0.0008	0.0007	0.0007
		0.0014	0.0015	0.0022	0.0008	0.0007	0.0006
		0.0009	0.0008	0.0008	0.0023	0.0014	0.0012
		0.0008	0.0007	0.0007	0.0014	0.0026	0.001
		0.0008	0.0007	0.0006	0.0012	0.001	0.0021
		X					
		0.0147	0.007	0.0073	0.0062	0.0061	0.0058
		0.007	0.0147	0.0069	0.0061	0.0059	0.0056
		0.0073	0.0069	0.0147	0.0058	0.0056	0.0054
		0.0062	0.0061	0.0058	0.0147	0.009	0.009
		0.0061	0.0059	0.0056	0.009	0.015	0.009
		0.0058	0.0056	0.0054	0.009	0.009	0.013

Y					
0.045	-0.008	-0.009	-0.007	-0.003	-0.003
-0.008	0.04	-0.0011	-0.003	-0.005	-0.002
-0.009	-0.011	0.035	-0.002	-0.002	-0.004
-0.007	-0.003	-0.003	0.044	-0.01	-0.01
-0.003	-0.005	-0.002	-0.01	0.04	-0.011
-0.002	-0.002	-0.004	-0.01	-0.011	0.036

Tabla 51. Datos de las líneas en grupos de cuatro del sistema 1 en condiciones desbalanceadas.

Barra_i	Barra_j	R											
3	A	0.0117	0.006	0.0053	0.0023	0.0019	0.0015	0.0011	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006
3	A	0.006	0.0113	0.006	0.003	0.0032	0.003	0.0009	0.0011	0.0009	0.0006	0.0005	0.0005
3	A	0.0053	0.006	0.012	0.0015	0.003	0.0032	0.0008	0.0009	0.0011	0.0006	0.0005	0.0005
3	A	0.0023	0.003	0.0015	0.0117	0.006	0.0053	0.0008	0.0006	0.0007	0.0006	0.0005	0.0004
		0.0019	0.0032	0.003	0.006	0.0113	0.006	0.0006	0.0008	0.0006	0.0005	0.0006	0.0005
		0.0015	0.003	0.0032	0.0053	0.006	0.012	0.0007	0.0006	0.0008	0.0004	0.0005	0.0006
		0.0011	0.0009	0.0008	0.0008	0.0006	0.0007	0.01	0.0045	0.0038	0.0023	0.0015	0.0015
		0.0009	0.0011	0.0009	0.0006	0.0008	0.0006	0.0045	0.0105	0.0045	0.0015	0.0023	0.0015
		0.0008	0.0009	0.0011	0.0007	0.0006	0.0008	0.0038	0.0045	0.0098	0.0015	0.0015	0.0023
		0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004	0.0023	0.0015	0.0015	0.01	0.0045	0.0038
		0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005	0.0015	0.0023	0.0015	0.0045	0.0105	0.0045
		0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0005	0.0006	0.0015	0.0015	0.0023	0.0038	0.0045	0.0098
		X											
		0.0816	0.024	0.0165	0.0188	0.0165	0.0188	0.009	0.0075	0.0083	0.0068	0.0075	0.0068
		0.024	0.081	0.024	0.0188	0.021	0.021	0.0075	0.009	0.0075	0.0075	0.006	0.006
		0.0165	0.024	0.0821	0.0188	0.021	0.021	0.0083	0.0075	0.009	0.0068	0.006	0.006
		0.0188	0.0188	0.0188	0.0816	0.024	0.0165	0.0075	0.0053	0.0053	0.0045	0.003	0.0023
		0.0165	0.021	0.021	0.024	0.081	0.024	0.0053	0.0075	0.0053	0.003	0.0045	0.003
		0.0188	0.021	0.021	0.0165	0.024	0.0821	0.0053	0.0053	0.0075	0.0023	0.003	0.0045
		0.009	0.0075	0.0083	0.0075	0.0053	0.0053	0.0678	0.03	0.0225	0.0188	0.015	0.0075
		0.0075	0.009	0.0075	0.0053	0.0075	0.0053	0.03	0.06	0.03	0.015	0.0188	0.015
		0.0083	0.0075	0.009	0.0053	0.0053	0.0075	0.0225	0.03	0.0638	0.0075	0.015	0.0188
		0.0068	0.0075	0.0068	0.0045	0.003	0.0023	0.0188	0.015	0.0075	0.0678	0.03	0.0225

		0.0075	0.006	0.006	0.003	0.0045	0.003	0.015	0.0188	0.015	0.03	0.06	0.03
		0.0068	0.006	0.006	0.0023	0.003	0.0045	0.0075	0.015	0.0188	0.0225	0.03	0.0638
Y													
		0.2225	-0.045	-0.0375	-0.03	-0.0338	-0.03	-0.015	-0.0165	-0.0135	-0.0113	-0.0068	-0.0068
		-0.045	0.2243	-0.045	-0.0225	-0.0263	-0.024	-0.0165	-0.0135	-0.0113	-0.0068	-0.006	-0.006
		-0.0375	-0.045	0.225	-0.0263	-0.024	-0.021	-0.0135	-0.0113	-0.0135	-0.0068	-0.0068	-0.006
		-0.03	-0.0225	-0.0263	0.2225	-0.045	-0.0375	-0.0135	-0.009	-0.0068	-0.0075	-0.0068	-0.006
		-0.0338	-0.0263	-0.024	-0.045	0.2243	-0.045	-0.009	-0.009	-0.0075	-0.0068	-0.006	-0.0053
		-0.03	-0.024	-0.021	-0.0375	-0.045	0.225	-0.0068	-0.0075	-0.0105	-0.006	-0.0053	-0.0045
		-0.015	-0.0165	-0.0135	-0.0135	-0.009	-0.0068	0.1927	-0.0375	-0.0338	-0.0323	-0.024	-0.021
		-0.0165	-0.0135	-0.0113	-0.009	-0.009	-0.0075	-0.0375	0.195	-0.0315	-0.03	-0.0285	-0.024
		-0.0135	-0.0113	-0.0135	-0.0068	-0.0075	-0.0105	-0.0338	-0.0315	0.1883	-0.024	-0.021	-0.0188
		-0.0113	-0.0068	-0.0068	-0.0075	-0.0068	-0.006	-0.0323	-0.03	-0.024	0.1927	-0.0375	-0.0338
		-0.0068	-0.006	-0.0068	-0.0068	-0.006	-0.0053	-0.024	-0.0285	-0.021	-0.0375	0.195	-0.0315
		-0.0068	-0.006	-0.006	-0.006	-0.0053	-0.0045	-0.021	-0.024	-0.0188	-0.0338	-0.0315	0.1883
Barra_i	Barra_j	R											
A	1	0.0039	0.002	0.0018	0.0008	0.0006	0.0005	0	0	0	0	0	0
A	1	0.002	0.0038	0.002	0.001	0.0011	0.001	0	0	0	0	0	0
A	5	0.0018	0.002	0.004	0.0005	0.001	0.0011	0	0	0	0	0	0
A	5	0.0008	0.001	0.0005	0.0039	0.002	0.0018	0	0	0	0	0	0
		0.0006	0.0011	0.001	0.002	0.0038	0.002	0	0	0	0	0	0
		0.0005	0.001	0.0011	0.0018	0.002	0.004	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0.0033	0.0015	0.0013	0.0008	0.0005	0.0005
		0	0	0	0	0	0	0.0015	0.0035	0.0015	0.0005	0.0008	0.0005
		0	0	0	0	0	0	0.0013	0.0015	0.0033	0.0005	0.0005	0.0008
		0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0005	0.0005	0.0033	0.0015	0.0013
		0	0	0	0	0	0	0.0005	0.0008	0.0005	0.0015	0.0035	0.0015
		0	0	0	0	0	0	0.0005	0.0005	0.0008	0.0013	0.0015	0.0033
X													
		0.0272	0.008	0.008	0.0063	0.0055	0.0063	0	0	0	0	0	0
		0.008	0.027	0.008	0.0063	0.007	0.007	0	0	0	0	0	0
		0.008	0.008	0.0274	0.0063	0.007	0.007	0	0	0	0	0	0
		0.0063	0.0063	0.0063	0.0272	0.008	0.008	0	0	0	0	0	0
		0.0055	0.007	0.007	0.008	0.027	0.008	0	0	0	0	0	0

0.0063	0.007	0.007	0.008	0.008	0.0274	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.0226	0.01	0.0075	0.0063	0.005	0.0025
0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0.005	0.0063	0.005
0	0	0	0	0	0	0.0075	0.01	0.0213	0.0025	0.005	0.0063
0	0	0	0	0	0	0.0063	0.005	0.0025	0.0226	0.01	0.0075
0	0	0	0	0	0	0.005	0.0063	0.005	0.01	0.02	0.01
0	0	0	0	0	0	0.0025	0.005	0.0063	0.0075	0.01	0.0213
Y											
0.0742	-0.015	-0.0125	-0.01	-0.0113	-0.01	0	0	0	0	0	0
-0.015	0.0748	-0.015	-0.0075	-0.0088	-0.008	0	0	0	0	0	0
-0.0125	-0.015	0.075	-0.0088	-0.008	-0.007	0	0	0	0	0	0
-0.01	-0.0075	-0.0088	0.0742	-0.015	-0.0125	0	0	0	0	0	0
-0.0113	-0.0088	-0.008	-0.015	0.0748	-0.015	0	0	0	0	0	0
-0.01	-0.008	-0.007	-0.0125	-0.015	0.075	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.0642	-0.0125	-0.0113	-0.0108	-0.008	-0.007
0	0	0	0	0	0	-0.0125	0.065	-0.0105	-0.01	-0.0095	-0.008
0	0	0	0	0	0	-0.0113	-0.0105	0.0628	-0.008	-0.007	-0.0063
0	0	0	0	0	0	-0.0108	-0.01	-0.008	0.0642	-0.0125	-0.0113
0	0	0	0	0	0	-0.008	-0.0095	-0.007	-0.0125	0.065	-0.0105
0	0	0	0	0	0	-0.007	-0.008	-0.0063	-0.0113	-0.0105	0.0628

## 8.2 Datos del sistema de prueba 2

Tabla 52. Datos generales del sistema 2 en condiciones balanceadas.

Datos del Sistema de Potencia	
Potencia base (MVA)	33.33
Número de barras	14
Número máximo de líneas acopladas	2
Número de transformadores	4
Número de generadores	4
Número de compensadores	4

Tabla 53. Datos de cargas por fase del sistema 2 en condiciones balanceadas.

BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	33.333	16.667	33.333	16.667	33.333	16.667
2	0	0	0	0	0	0
3	-33.333	-2.067	-33.333	-2.067	-33.333	-2.067
4	0	0	0	0	0	0
5	33.333	16.667	33.333	16.667	33.333	16.667
6	0	0	0	0	0	0
7	33.333	16.667	33.333	16.667	33.333	16.667
8	0	0	0	0	0	0
9	16.667	8.333	16.667	8.333	16.667	8.333
10	16.667	8.333	16.667	8.333	16.667	8.333
11	8.333	6.667	8.333	6.667	8.333	6.667
12	8.333	6.667	8.333	6.667	8.333	6.667
13	16.667	8.333	16.667	8.333	16.667	8.333
14	16.667	8.333	16.667	8.333	16.667	8.333

Tabla 54. Datos de los generadores del sistema 2 en condiciones balanceadas.

INTERNA	TERMINAL	CERO		POSITIVA		NEGATIVA		P TRIFASICA	REG VOL	ANGULO
		R	X	R	X	R	X	P.U.	FASE A	FASE A
15	4	0	0.06	0	0.01	0	0.01	0	1	0
16	5	0	0.06	0	0.01	0	0.01	6.0006	1.02	0
17	7	0	0.06	0	0.01	0	0.01	1.890189	1.04	0
18	1	0	0.06	0	0.01	0	0.01	slack	1.02	6.5745

Tabla 55. Datos de los transformadores del sistema 2 en condiciones balanceadas.

Tipo de conexión								
1- Conexión Yn-Yn								
2- Conexión Yn-Y								
3- Conexión Yn-D								
4- Conexión Y-Y								
5- Conexión Y-D								
6- Conexión D-D								
Barra i	Barra j	R pu	X pu	Tap prim	Tap sec	Rg	Xg	Conexión
2	1	0	0.12	0.99	1	0	0	3
4	3	0	0.12	0.99	1	0.00333389	0.06000097	3
6	5	0	0.12	0.988	1	0.0049991	0.07666699	3
8	7	0	0.12	0.973	1	0	0	3

Tabla 56. Datos de los compensadores del sistema 2 en condiciones balanceadas.

Barra	Y		
9	0.2	0	0
	0	0.2	0
	0	0	0.2
11	0.1	0	0
	0	0.1	0
	0	0	0.1
12	0.1	0	0
	0	0.1	0
	0	0	0.1
13	0.2	0	0
	0	0.2	0
	0	0	0.2

Tabla 57. Datos de las líneas simples del sistema 2 en condiciones balanceadas.

Barra_i	Barra_j	R			X			Y		
1	7	0.089667	0.022667	0.022667	0.350006	0.150007	0.150007	0.036800	-0.005200	-0.005200
		0.022667	0.089667	0.022667	0.150007	0.350006	0.150007	-0.005200	0.036800	-0.005200
		0.022667	0.022667	0.089667	0.150007	0.150007	0.350006	-0.005200	-0.005200	0.036800
1	9	0.089334	0.022334	0.022334	0.333317	0.133317	0.133317	0.036800	-0.005200	-0.005200
		0.022334	0.089334	0.022334	0.133317	0.333317	0.133317	-0.005200	0.036800	-0.005200
		0.022334	0.022334	0.089334	0.133317	0.133317	0.333317	-0.005200	-0.005200	0.036800
2	11	0.277970	-0.072018	-0.072018	0.479985	0.059999	0.059999	0.006200	-0.000800	-0.000800
		-0.072018	0.277970	-0.072018	0.059999	0.479985	0.059999	-0.000800	0.006200	-0.000800
		-0.072018	-0.072018	0.277970	0.059999	0.059999	0.479985	-0.000800	-0.000800	0.006200
3	5	0.101324	0.034324	0.034324	0.333325	0.133326	0.133326	0.036800	-0.005200	-0.005200
		0.034324	0.101324	0.034324	0.133326	0.333325	0.133326	-0.005200	0.036800	-0.005200
		0.034324	0.034324	0.101324	0.133326	0.133326	0.333325	-0.005200	-0.005200	0.036800
4	12	0.466615	0.116627	0.116627	0.679888	0.259902	0.259902	0.006200	-0.000800	-0.000800
		0.116627	0.466615	0.116627	0.259902	0.679888	0.259902	-0.000800	0.006200	-0.000800
		0.116627	0.116627	0.466615	0.259902	0.259902	0.679888	-0.000800	-0.000800	0.006200
6	12	0.483227	0.133239	0.133239	0.679966	0.259980	0.259980	0.006200	-0.000800	-0.000800
		0.133239	0.483227	0.133239	0.259980	0.679966	0.259980	-0.000800	0.006200	-0.000800
		0.133239	0.133239	0.483227	0.259980	0.259980	0.679966	-0.000800	-0.000800	0.006200
7	13	0.094661	0.027661	0.027661	0.351692	0.151693	0.151693	0.036800	-0.005200	-0.005200
		0.027661	0.094661	0.027661	0.151693	0.351692	0.151693	-0.005200	0.036800	-0.005200
		0.027661	0.027661	0.094661	0.151693	0.151693	0.351692	-0.005200	-0.005200	0.036800
8	11	0.466614	0.116626	0.116626	0.696748	0.276762	0.276762	0.006200	-0.000800	-0.000800
		0.116626	0.466614	0.116626	0.276762	0.696748	0.276762	-0.000800	0.006200	-0.000800
		0.116626	0.116626	0.466614	0.276762	0.276762	0.696748	-0.000800	-0.000800	0.006200
9	10	0.050999	0.016999	0.016999	0.183334	0.083335	0.083335	0.018400	-0.002600	-0.002600
		0.016999	0.050999	0.016999	0.083335	0.183334	0.083335	-0.002600	0.018400	-0.002600
		0.016999	0.016999	0.050999	0.083335	0.083335	0.183334	-0.002600	-0.002600	0.018400
13	14	0.047664	0.013664	0.013664	0.166670	0.066670	0.066670	0.018400	-0.002600	-0.002600
		0.013664	0.047664	0.013664	0.066670	0.166670	0.066670	-0.002600	0.018400	-0.002600
		0.013664	0.013664	0.047664	0.066670	0.066670	0.166670	-0.002600	-0.002600	0.018400

Tabla 58. Datos de las líneas paralelas y dobles sistema 2 en condiciones balanceadas.

Barra_i	Barra_j	R					
3	10	0.094673	0.027673	0.027673	-0.000038	-0.000038	-0.000038
3	10	0.027673	0.094673	0.027673	-0.000038	-0.000038	-0.000038
		0.027673	0.027673	0.094673	-0.000038	-0.000038	-0.000038
		-0.000038	-0.000038	-0.000038	0.094673	0.027673	0.027673
		-0.000038	-0.000038	-0.000038	0.027673	0.094673	0.027673
		-0.000038	-0.000038	-0.000038	0.027673	0.027673	0.094673
X							
		0.366703	0.166704	0.166704	0.066693	0.066693	0.066693
		0.166704	0.366703	0.166704	0.066693	0.066693	0.066693
		0.166704	0.166704	0.366703	0.066693	0.066693	0.066693
		0.066693	0.066693	0.066693	0.366703	0.166704	0.166704
		0.066693	0.066693	0.066693	0.166704	0.366703	0.166704
		0.066693	0.066693	0.066693	0.166704	0.166704	0.366703
Y							
		0.0368	-0.0052	-0.0052	0	0	0
		-0.0052	0.0368	-0.0052	0	0	0
		-0.0052	-0.0052	0.0368	0	0	0
		0	0	0	0.0368	-0.0052	-0.0052
		0	0	0	-0.0052	0.0368	-0.0052
		0	0	0	-0.0052	-0.0052	0.0368
Barra_i	Barra_j	R					
5	14	0.094685	0.027685	0.027685	-0.000014	-0.000014	-0.000014
5	14	0.027685	0.094685	0.027685	-0.000014	-0.000014	-0.000014
		0.027685	0.027685	0.094685	-0.000014	-0.000014	-0.000014
		-0.000014	-0.000014	-0.000014	0.102972	0.035972	0.035972
		-0.000014	-0.000014	-0.000014	0.035972	0.102972	0.035972
		-0.000014	-0.000014	-0.000014	0.035972	0.035972	0.102972
X							
		0.350002	0.150003	0.150003	0.073313	0.073313	0.073313
		0.150003	0.350002	0.150003	0.073313	0.073313	0.073313
		0.150003	0.150003	0.350002	0.073313	0.073313	0.073313

0.073313	0.073313	0.073313	0.366702	0.166703	0.166703
0.073313	0.073313	0.073313	0.166703	0.366702	0.166703
0.073313	0.073313	0.073313	0.166703	0.166703	0.366702
Y					
0.0368	-0.0052	-0.0052	0	0	0
-0.0052	0.0368	-0.0052	0	0	0
-0.0052	-0.0052	0.0368	0	0	0
0	0	0	0.0368	-0.0052	-0.0052
0	0	0	-0.0052	0.0368	-0.0052
0	0	0	-0.0052	-0.0052	0.0368