

# **MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS DE RED A PARTIR DE LA INSTALACIÓN DE MEDIDORES INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN**

**Jorge Eliécer Garrido García**

**Nelson Enrique Ardila Sánchez**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,  
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2016**

**MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS DE RED  
A PARTIR DE LA INSTALACIÓN DE MEDIDORES  
INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
DISTRIBUCIÓN**

**Jorge Eliécer Garrido García**

**Nelson Enrique Ardila Sánchez**

**Trabajo de grado para optar por el título de:  
Ingeniero Electricista**

**Director:**

**MIE. Jairo Blanco Solano**

**Co- director:**

**Dr. Gabriel Ordoñez Plata**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,  
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios primeramente por tantas bendiciones.

Debo expresar todos mis agradecimientos a mi director de proyecto MIE. Jairo Blanco Solano, por ser un eminente maestro, tener una actitud de optimismo y su disposición positiva frente a cualquier tarea.

A mis familiares mi más profundo agradecimiento por su amor, ánimo, apoyo y comprensión, mi madre, la cual siempre me ha inculcado los valores del esfuerzo y el tener una actitud positiva ante la vida, a mi padre el cual se ha encargado de guiarme por el camino de la honorabilidad, a mi hermano el cual siempre ha estado allí, pasando por diferentes etapas en mi vida universitaria, a mi nona Mary la cual es mi gran promotora, mi sonrisa, y mi ayuda en todo, a mis abuelos que me han cuidado desde temprana edad y con sus enseñanzas he aprendido a ser una persona esforzada y valiente, a mis tíos, primos y demás.

A mis amigos que desde el inicio de mi carrera siempre han estado a mi lado, en especial a mi compañero de Trabajo de Grado Nelson Ardila, con el cual hemos logrado avanzar en esta meta.

Por último, a mis pastores Efraín Gómez y Mary de Gómez los cuales con sus oraciones siempre me han animado a luchar por lo que se quiere y no dejar de perseverar en la búsqueda de la satisfacción profesional.

***"Vive como si fueras a morir mañana. Aprende como si fueras a vivir siempre"***  
***— Mahatma Gandhi***

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	18
<b>1. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL PROYECTO</b> .....	19
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	20
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	22
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
<b>4. MARCO REFERENCIAL</b> .....	23
<b>4.1 MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIA</b> .....	23
4.1.1 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIAS .....	25
4.1.2 IMPEDANCIA DINÁMICA DE CARGA .....	25
4.1.3 DISTANCIA A LA FALLA .....	27
<b>4.2 IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO MEDIDORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA</b> .....	27
4.2.1 ESQUEMA DE MONITORIZACIÓN CABECERA DEL CIRCUITO .....	30
4.2.2 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO MEDIDORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	31
4.2.3 INSTALACIÓN DE MEDIDORES ELECTRÓNICOS .....	31
4.2.4 DETECCIÓN DE EVENTOS DE TENSIÓN .....	32
4.2.5 SISTEMA DE COMUNICACIÓN .....	33
<b>4.3 LOCALIZACIÓN DE FALLAS PARA REDES INTELIGENTES</b> .....	34
4.3.1 LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....	34

4.3.2 LOCALIZACIÓN DE FALLA EN LA ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	35
4.3.3 PROCESO Y MUESTREO DE DATOS.....	36
<b>4.4 LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN MEDIDORES INTELIGENTES.....</b>	<b>37</b>
4.4.1 MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS UTILIZANDO MEDIDORES INTELIGENTES DE TENSIÓN.....	37
4.4.2 MAPEO DE CORTE AUTOMATIZADO.....	40
4.4.3 MÉTODO DIRECTRICES .....	40
<b>5. MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS PROPUESTO POR LOS AUTORES .....</b>	<b>42</b>
<b>6. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS PROPUESTO .....</b>	<b>58</b>
6.1 Simulación de falla trifásica en la zona 1.....	60
6.2 Simulación de falla monofásica en la zona 2.....	65
6.3 Simulación de falla línea – línea en la zona 3 .....	69
6.4 Simulación de falla trifásica en la zona 4.....	72
6.5 Falla trifásica entre líneas.....	76
<b>7. IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN UN SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS.....</b>	<b>81</b>
7.1 Simulación de falla trifásica en la zona 1.....	84
7.2 Simulación de falla trifásica en la zona 2.....	85
7.3 Simulación de falla trifásica en la zona 3.....	86
7.4 Simulación de falla línea – línea en la zona 4 .....	87
7.5 Simulación de falla monofásica en la zona 5.....	89
7.6 Simulación de falla monofásica en la zona 6.....	90
7.7 Simulación de falla línea – línea a tierra en la zona 7 .....	92
7.8 Simulación de falla línea – línea en la zona 8 .....	93
7.9 Simulación de falla línea – línea a tierra en la zona 9 .....	95
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>

<b>9. OBSERVACIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Circuito simplificado de un sistema de distribución antes de la falla, [2].....	26
<b>Figura 2.</b> Falla en el punto m en un sistema de distribución .....	26
<b>Figura 3.</b> Algoritmo para identificar el tipo de falla, [2] .....	27
<b>Figura 4.</b> Diagrama del Sistema de Distribución [3]. .....	30
<b>Figura 5.</b> Armario de medidores, [3].....	32
<b>Figura 6.</b> Diagrama funcional para el flujo de datos de la subestación, [4] .....	35
<b>Figura 7.</b> Lugares de diferentes equipos en una red de distribución [4]. .....	36
<b>Figura 8.</b> Proceso para el muestro de la señal, [4].....	37
<b>Figura 9.</b> Identificación del índice delta-k, [5] .....	39
<b>Figura 10.</b> Comparación de métodos de distancia para la localización de fallas, [19].....	42
<b>Figura 11.</b> Ejemplo gráfica de tensión suministrada por el medidor inteligente de tensión con ayuda del software ATP .....	44
<b>Figura 12.</b> Ejemplo de aplicación del método referente en sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo .....	45
<b>Figura 13.</b> Tensión en el nodo eléctrico 1 cuando la falla es trifásica en 10. ....	46
<b>Figura 14.</b> Tensión en el nodo eléctrico 4 cuando la falla es trifásica en 10. ....	46
<b>Figura 15.</b> Tensión en el nodo eléctrico 6 cuando la falla es trifásica en 10. ....	47
<b>Figura 16.</b> Tensión en el nodo eléctrico 9 cuando la falla es trifásica en 10. ....	47
<b>Figura 17.</b> Tensión en el nodo eléctrico 10 cuando la falla es trifásica en 10. ....	48
<b>Figura 18.</b> Corriente de falla trifásica en el nodo eléctrico 10. ....	50
<b>Figura 19.</b> Proceso de localización relativa de hundimientos de tensión, método referente [12].....	51
<b>Figura 20.</b> Proceso de caracterización de hundimientos de tensión, método referente [13].....	52
<b>Figura 21.</b> Ejemplo de aplicación del método referente .....	53
<b>Figura 22.</b> Proceso para la identificación de fallas con el método propuesto.....	56
<b>Figura 23.</b> Identificación de zonas para el sistema eléctrico de prueba seleccionado .....	57
<b>Figura 24.</b> Sistema eléctrico usado como prueba del método propuesto.....	58
<b>Figura 25.</b> Características de la fuente de alimentación del sistema de 10 nodos eléctricos.....	59
<b>Figura 26.</b> Zbus general del sistema de distribución de 10 nodos eléctricos .....	59
<b>Figura 27.</b> Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo 1 .....	61
<b>Figura 28.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es en el nodo 1 .....	61
<b>Figura 29.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 1 .....	62
<b>Figura 30.</b> Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1 .....	62

<b>Figura 31.</b> Sistema de 10 nodos eléctricos con falla monofásica en el nodo 5 .....	66
<b>Figura 32.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es en el nodo 5. ....	66
<b>Figura 33.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 5. ....	67
<b>Figura 34.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es en el nodo 5. ....	67
<b>Figura 35.</b> Corriente de falla monofásica en el nodo 5.....	68
<b>Figura 36.</b> Sistema de 10 nodos eléctricos con falla bifásica en el nodo 8 .....	69
<b>Figura 37.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 8. ....	70
<b>Figura 38.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es en el nodo 8 .....	70
<b>Figura 39.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es en el nodo 8 .....	71
<b>Figura 40.</b> Corriente de falla bifásica en el nodo 8 .....	71
<b>Figura 41.</b> Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica el nodo 9 .....	73
<b>Figura 42.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es en el nodo 9. ....	73
<b>Figura 43.</b> Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es en el nodo 9. ....	74
<b>Figura 44.</b> Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es en el nodo 9. ....	74
<b>Figura 45.</b> Corriente de falla trifásica en el nodo 9.....	75
<b>Figura 46.</b> Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7 .....	76
<b>Figura 47.</b> Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7.....	77
<b>Figura 48.</b> Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7.....	77
<b>Figura 49.</b> Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7.....	78
<b>Figura 50.</b> Corriente de falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7 .....	78
<b>Figura 51.</b> Sistema real de 32 nodos eléctricos escogido para la aplicación del método.....	81
<b>Figura 52.</b> Características de la fuente de alimentación del sistema de 32 nodos eléctricos.....	82
<b>Figura 53.</b> Zbus general del sistema de 32 nodos eléctricos .....	82
<b>Figura 54.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo1 .....	84
<b>Figura 55.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla entre las fases A y B del nodo 6.....	88
<b>Figura 56.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla en la fase B del nodo 25 .....	89
<b>Figura 57.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla en la fase B del nodo 10 .....	91
<b>Figura 58.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica a tierra en el nodo 12 .....	92

<b>Figura 59.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla entre las fases A y B del nodo 17 .....	94
<b>Figura 60.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica a tierra en el nodo 29 .....	95
<b>Figura 61.</b> Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica entre los nodos eléctricos 5 y 6 .....	97

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resultados generales de rendimiento del método referente .....	50
<b>Tabla 2.</b> Resultados falla trifásica en el nodo 1 .....	65
<b>Tabla 3.</b> Resultados falla monofásica en el nodo 5 .....	68
<b>Tabla 4.</b> Resultados falla bifásica en el nodo 8 .....	72
<b>Tabla 5.</b> Resultados falla trifásica en el nodo 9 .....	75
<b>Tabla 6.</b> Resultados falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7.....	79
<b>Tabla 7.</b> Resultados generales de rendimiento del método para el sistema de 10 nodos eléctricos escogido.....	80
<b>Tabla 8.</b> Resultados falla trifásica en el nodo1 con el medidor en 5.....	85
<b>Tabla 9.</b> Resultados falla trifásica en el nodo 1 con el medidor en 21.....	86
<b>Tabla 10.</b> Resultados falla trifásica en el nodo 1 con el medidor en 24.....	87
<b>Tabla 11.</b> Resultados falla bifásica en el nodo 6. ....	88
<b>Tabla 12.</b> Resultados falla monofásica en el nodo 25. ....	90
<b>Tabla 13.</b> Resultados falla monofásica en el nodo 10. ....	91
<b>Tabla 14.</b> Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 12. ....	93
<b>Tabla 15.</b> Resultados falla bifásica en el nodo 17. ....	94
<b>Tabla 16.</b> Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 29. ....	96
<b>Tabla 17.</b> Resultados generales de rendimiento del método para el sistema de 32 nodos eléctricos escogido.....	98

## TABLA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> RESULTADOS DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL SISTEMA DE 10 NODOS ELÉCTRICOS .....	104
<b>ANEXO B.</b> MATRIZ DE IMPEDANCIAS SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS .....	220
<b>ANEXO C.</b> RESULTADOS DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS .....	225

## RESUMEN

**TÍTULO: MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS DE RED A PARTIR DE LA INSTALACIÓN DE MEDIDORES INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN. \***

**AUTORES:** GARRIDO GARCÍA, Jorge Eliécer, ARDILA SÁNCHEZ, Nelson Enrique. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** localización de fallas, sistemas de distribución, medidores inteligentes.

**DESCRIPCIÓN:** Debido a la constante demanda de energía eléctrica en el territorio colombiano, es de vital importancia mantener la supervisión del flujo de energía eléctrica y es por esta razón que es necesario el estudio de los diferentes tipos de fallas de red y sus impactos en los sistemas de distribución.

Los flujos de potencia en los sistemas de distribución se deben manejar a una capacidad adecuada para evitar la sobrecarga de los elementos. Mediante el monitoreo de un sistema eléctrico es posible analizar sus flujos y ajustar los mismos previendo las posibles fallas. Además, la detección y localización de fallas de red resulta importante para garantizar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica, tarea en la cual los novedosos sistemas de monitorización han empezado a tomar un auge importante.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo la implementación de un método para la localización de fallas en los sistemas de distribución mediante la inclusión de medidores inteligentes en la red eléctrica. Un aspecto importante por resaltar es que, en el desarrollo del método propuesto, solo son utilizados monitores de tensión.

Para el desarrollo del proyecto se realiza una primera etapa de revisión bibliográfica en la literatura técnica, identificando métodos para la localización de fallas que incorporen la estructura de una medición inteligente y distribuida, posterior a ello se procede a la realización de pruebas para verificar el funcionamiento del método propuesto y generar las respectivas conclusiones, de acuerdo a su efectividad a la hora de la localización relativa de las fallas de red.

El método propuesto en este documento permite inducir resultados más exactos, por consecuente, se logra la identificación del segmento de línea ubicado entre dos nodos, donde se presenta la falla, mediante la estimación relativa de corrientes de falla.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MIE. Jairo Blanco Solano Codirector: Dr. Gabriel Ordoñez Plata

## ABSTRACT

**TITLE: NETWORK FAULT LOCATION METHOD BASED ON SMART FEEDER METER INSTALLATION IN ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEMS. \***

**AUTHORS:** GARRIDO GARCÍA, Jorge Eliécer, ARDILA SÁNCHEZ, Nelson Enrique. \*\*

**KEYWORDS:** fault location, power distribution, smart feeder meter, voltage measurement

### **DESCRIPTION:**

Due to constant in Colombia energy demand it is of vital importance to maintain the flow of electrical energy monitoring, is for this reason that the study of different types of failure in systems of distribution and its estimated location is necessary.

Power flows in distribution systems should be handled adequate capacity to prevent overloading of the elements. By monitoring an electrical system can analyze flows and accommodate them anticipating possible failures. Addition the detection and network fault location it is important to ensure the reliability of electricity supply, a task in which the novel monitoring systems have begun to take a major boom

This research project aims to implement a method for locating faults in distribution systems by including smart meters in the grid. An important aspect to highlight is that in the development of the proposed method are used only monitors voltage.

For developing the project, a first stage of literature review is carried out in the technical literature, identifying methods for fault locating incorporating the structure of an intelligent, distributed, subsequent measurement to it we proceed to testing to verify operation proposed and to generate the respective conclusions method according to its effectiveness when fault identification

The method proposed in this paper can induce more precise results; by consistent, identification of the bar where the failure occurs through the relative estimation of fault currents is achieved.

---

\* Research Work.

\*\* Faculty of Physical – Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Directed: MIE. Jairo Blanco Solano Co-directed: Dr. Gabriel Ordoñez Plata

## INTRODUCCIÓN

Motivado por los recientes avances en los sistemas de comunicación y medición, incluyendo la comunicación bidireccional medida, sistema de manejo de datos, y acceso real a la información, las empresas de generación de energía eléctrica han estado buscando soluciones eficientes para mejorar la operación de los sistemas de distribución, su monitorización y automatización de los procesos [1].

Con el fin de superar algunos de los inconvenientes consultados, tales como la múltiple estimación y la precisión en la medida en los métodos previos de localización de fallas [2-5], este trabajo propone una técnica sólida de localización relativa de fallas en el sistema eléctrico que explora la capacidad de medición de los hundimientos de tensión de estos dispositivos y fundamentos de la teoría de cortocircuito. Estos medidores inteligentes, a los cuales se hará referencia como 'medidores para ser conectados a los alimentadores', pueden ser consultados cada vez que una falla es detectada para proporcionar la información solicitada por el método referente; cabe aclarar que los medidores que se consideran como parte del estudio proporcionan datos de tensión en los nodos eléctricos coincidentes con la instalación.

De acuerdo a la revisión bibliográfica el método referente [1] enfatiza su desempeño en la identificación y localización relativa de fallas en sistemas de distribución. El sistema planteado para estudio se encuentra en la base de datos de la IEEE.

## 1. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL PROYECTO

### FORMULACIÓN Y DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

Mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica beneficia a la sociedad actual, ya que este servicio es indispensable en la mayoría de las actividades del ser humano, tanto en labores cotidianas domésticas como industriales. Con el avance de las tecnologías, la mayoría de equipos eléctricos y electrónicos de uso doméstico e industrial son más vulnerables a variaciones de los parámetros de alimentación. Por ende, la calidad de la energía y la continuidad en el servicio de suministro, deben regirse bajo principios de confiabilidad. Es por esta razón que la implementación de elementos de medición inteligente es de vital importancia para mejorar la estabilidad del sistema. Algunas de las ventajas de los medidores inteligentes es permitir a los usuarios de estos, tomar decisiones inteligentes referentes al ahorro y buen uso de la energía eléctrica. Esto puede ser ventajoso en el problema de la localización de fallas al evaluar en el sistema su desempeño como tal.

En consecuencia, es necesario adoptar metodologías que faciliten la rápida y confiable identificación y localización de fallas en los sistemas de distribución, de esta manera, establecer medidas que mitiguen el impacto económico y social, asociado a los factores característicos de la energía eléctrica. Las inversiones que hacen los operadores de red y los comercializadores para mejorar dicha calidad del servicio, se deben evidenciar de manera adecuada en interrupciones menos frecuentes y prolongadas, plasmadas en datos de indicadores veraces y definitivos.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El diagnóstico de fallas en las redes de distribución es de gran importancia para obtener un suministro continuo del servicio de energía; del mismo modo, la identificación y localización de tales eventos es un importante factor para la calidad del suministro de energía eléctrica. Para el diagnóstico de fallas se emplean métodos que consisten principalmente en el cómputo de la impedancia de la línea de falla, basados en la tensión y la corriente registrados directamente en el alimentador primario [4].

Por consiguiente, la motivación en realizar este proyecto se basa en complementar los diferentes proyectos analizados dando una perspectiva fundamentada en las normas CREG 065 de 2012 y Ley 1715 2014, donde se da a conocer la evolución del usuario como agente activo del sistema, el cual aumenta la complejidad en la operación de un sistema de distribución de energía eléctrica.

De acuerdo a los avances tecnológicos y su funcionamiento, como el avance en las mediciones eléctricas, se vuelve una necesidad estudiar cada elemento innovador tal como los medidores inteligentes, dado que todo sistema de energía eléctrica tiende a converger en una red de medidores inteligentes. Por ejemplo, la empresa CODENSA ubicada en Bogotá DC, la cual implementa la reconfiguración de la red mediante re conectadores y medidores inteligentes; de esta forma, los operadores de red y sus ingenieros deben estar preparados para la implementación de estos métodos innovadores que buscan la gestión eficiente de los sistemas de distribución actuales.

Respecto a la revisión bibliográfica, se enfoca cada proceso de ejecución del método propuesto, los cuales tienen un límite específico brindado en la normativa Standard IEEE 519-1992 y el IEC 868. En cada etapa del proyecto se puede

deducir, que el alcance de la revisión bibliográfica hace énfasis directamente en todos los artículos que posean medición inteligente para diferentes sistemas de distribución, de la mano con esto el software ATP es utilizado para la simulación de los sistemas de distribución, así como Matlab para la implementación del método propuesto y por último el funcionamiento del mismo será evaluado mediante casos reales e identificados en la IEEE.

Por otra parte, el desarrollo del método a implementar en Matlab tendrá como base un método referente [1], mediante el cual se estiman corrientes de falla y son procesadas con el fin de identificar los nodos eléctricos de falla y del cual se podrán realizar variaciones, en función de sus diferentes estudios.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un método para la localización de fallas de red a partir de monitores inteligentes en sistemas eléctricos de distribución.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar una revisión bibliográfica para la identificación de los métodos de localización de fallas en el suministro del servicio de energía eléctrica con mejores desempeños en los sistemas de distribución.
2. Modelar un método de localización de fallas que incorpore la monitorización inteligente en sistemas de distribución.
3. Evaluar el desempeño del método planteado bajo escenarios de simulación a partir de sistemas eléctricos reales reportados en la base de datos de la IEEE

## **4. MARCO REFERENCIAL**

Algunas generalidades de los principales trabajos en la detección y localización de fallas son:

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Los estudios realizados para la detección de fallas en sistemas de distribución mediante medidores inteligentes presentan diferentes enfoques en base a la proyección de medida y precisión de cada método.

Existen diferentes tipos de métodos los cuales abordaremos en un estudio particular generando una capacidad de enfoque en otra metodología a implementar para la detección de este proceso.

#### **4.1 MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIA**

La forma de onda, la continuidad del servicio y la atención al cliente son ítems muy importantes en cuanto se refiere a la calidad de energía eléctrica. La localización de fallas, es un tema que está inevitablemente relacionado con la continuidad de un buen servicio de energía.

Una falla en los sistemas de distribución puede causar una interrupción del servicio a los usuarios, y consecuentemente pérdidas económicas por parada de procesos, pérdidas de información, daños y detrimentos en maquinarias e insumos, entre otros [15]. Dado los estudios realizados a nivel mundial, se estableció que cerca del 80% de todas las interrupciones se originan en base a fallas en los sistemas de distribución [16].

A pesar de la confiabilidad que pueda brindar un sistema de distribución de energía, es inevitable que haya interrupciones en la prestación del servicio debido a las fallas en las líneas. Las redes experimentan fallas causadas, por tormentas, relámpagos, fallas en los aislamientos y cortocircuitos causados por plantas, animales entre otros agentes externos. Entonces, la confiabilidad del sistema de distribución ante cualquier falla que haya ocurrido depende de su rápido aislamiento, reparación y restauración del servicio. El restablecimiento del servicio se puede acelerar considerablemente si se determina con exactitud razonable la ubicación de la falla. La manera convencional de encontrar una falla es mediante inspección visual, lo cual toma mucho tiempo además de requerir un considerable número de personal [15].

Existen fallas permanentes y transitorias, y un localizador de fallas proporciona información para ambos tipos de falla. Generalmente, las fallas transitorias causan un menor daño y no se pueden localizar con una simple inspección. Ante estas fallas, los localizadores permiten detectar puntos débiles del sistema de potencia y tomar acciones correctivas para evitar mayores daños debido a reincidencias de la falla. Cuando ocurre una falla permanente, existe un sistema de protección con relés que típicamente hace una correcta y rápida desconexión de la falla basada en medidas tomadas en tiempo real.

En este artículo se presenta un método novedoso que utiliza el análisis de las reactancias de falla, para determinar la localización de la misma y brindar una solución a este problema. Como contenido, en la sección dos se presentan las principales características del sistema de distribución. En el numeral tres se presenta el desarrollo del método de localización, mientras que en el numeral cuatro se presentan las pruebas y el análisis de los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación.

#### **4.1.1 Metodología para la localización de fallas en sistemas de distribución basado en gráficas de reactancias**

El método que se propone en esta sección se desarrolla teniendo en cuenta las características propias de los sistemas de distribución descritas en la sección dos. Para la implementación del método únicamente se necesita conocer las componentes fundamentales de tensión y corriente en el momento de pre falla y falla, además de la impedancia serie de la línea de cada tramo de calibre distinto.

La metodología propone determinar gráficamente la reactancia de falla en función de una distancia variable a partir de las medidas de tensión y corriente de pre falla y falla. Se asume que el punto de falla es correcto cuando la reactancia de la fase fallada alcanza un valor mínimo.

#### **4.1.2 Impedancia dinámica de carga**

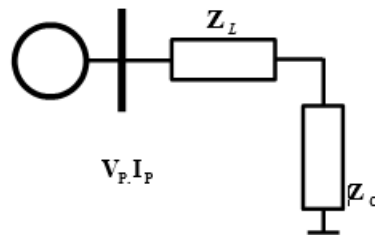
Tomando únicamente medidas en la subestación no se puede conocer exactamente en cada momento la distribución de la carga, pero sí se puede conocer la carga total alimentada por la subestación inmediatamente antes de haber ocurrido la falla.

Si se hace un método considerando la carga detallada en cada barra, se está agregando error debido a que no se tiene en cuenta la variación de la misma. Para considerar el efecto de la variación de la carga, ésta se concentra al final del circuito como se muestra en la figura 1. Es posible hacer esta aproximación, si la impedancia de carga es mucho mayor que la impedancia de línea. En la práctica  $Z_C \gg Z_L$  por aspectos asociados a la regulación de tensión y pérdidas en las líneas. Varios métodos utilizan concentraciones de carga similares [17-18].

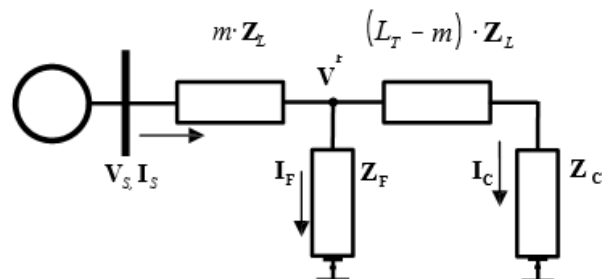
En la figura 1,  $V_{ip}$  es el vector que contiene los fasores de tensión por fase en pre falla  $[3 \times 1]$ ;  $I_p$  es el vector que contiene los fasores de corriente por fase en pre falla  $[3 \times 1]$ ;  $Z_L$  es la matriz de la impedancia serie de la línea  $[3 \times 3]$ , como se presenta en la ecuación (1).

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

**Figura 1.** Circuito simplificado de un sistema de distribución antes de la falla, [2]



**Figura 2.** Falla en el punto m en un sistema de distribución



La impedancia de carga se estima a partir de las condiciones de pre falla. De la Figura 1 se obtiene (3).

$$(\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_C) \times \mathbf{I}_P = \mathbf{V}_p \quad (3)$$

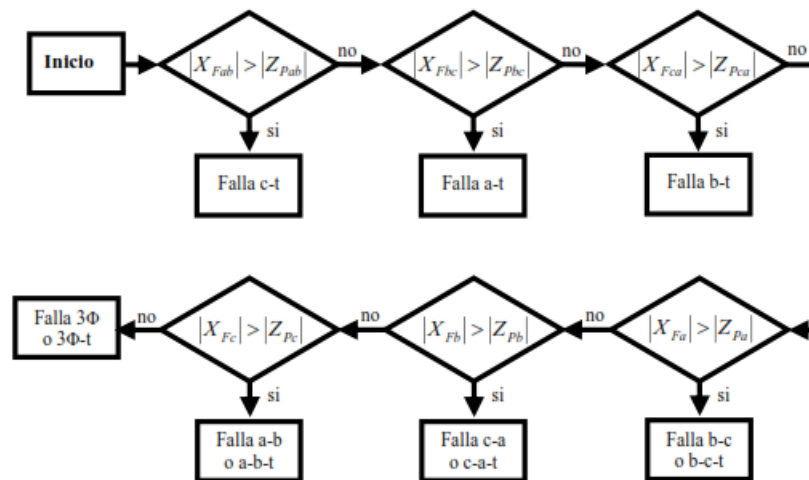
En esta técnica de localización de fallas, la posición asumida de falla m es variada sistemáticamente hasta encontrar un punto de la línea en el cual la reactancia de la carga se acumula en el nodo final debido a la incertidumbre de su valor, pero el

método permite acumular la carga de distintas formas, si se tuviera seguridad sobre su característica de distribución.

### 4.1.3 Distancia a la falla

Cuando ocurre una falla, suponiendo red homogénea, se obtiene el circuito de la figura 2. Las anteriores ecuaciones se utilizan como límites para comparar todos los puntos de cada curva de la reactancia y así obtener el tipo de falla a partir de las señales que sobrepasen este límite. En la figura 3 se muestra el algoritmo utilizado para identificar el tipo de falla. El algoritmo propuesto de localización de fallas no requiere ningún conocimiento previo de las fases en falla.

**Figura 3.** Algoritmo para identificar el tipo de falla, [2]



La técnica propuesta puede proporcionar múltiple estimación si las líneas tienen laterales. El problema de la múltiple estimación es una falencia de todos los métodos de distancia, pero se han planteado metodologías para atacar este problema con ayuda de inteligencia artificial [9-11].

## 4.2 IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO MEDIDORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A partir de la expansión de los sistemas de distribución de energía eléctrica en el mundo, el problema de la discontinuidad en el servicio se ha convertido en un tema de gran interés para los agentes del sector eléctrico (en las áreas de planeación, operación, distribución) y especialmente para los usuarios residenciales e industriales. Tanto las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica como los usuarios, interactúan con respecto a la valoración de los costos debidos a las interrupciones del suministro de energía eléctrica [12].

Con los procesos de globalización, las empresas prestadoras del servicio de electricidad del mundo realizan estudios para valorar los costos debidos a una inadecuada continuidad en el suministro. De esta forma, pueden obtener un punto equidistante entre el costo de inversión para mejorar la confiabilidad de un sistema y los costos que las interrupciones representan a los usuarios del servicio.

Vale la pena recordar que la localización de fallas no es un problema nuevo. Sin embargo, las investigaciones que se han realizado en esta área recaen sobre los sistemas de transmisión, donde las características homogéneas de la línea, la medición en ambos terminales y la disponibilidad de más equipos, permiten localizar el sitio de falla con alta precisión. La localización en sistemas de distribución es más problemática, por la complejidad que produce la presencia de conductores no homogéneos, cargas intermedias, laterales y desbalance del sistema y de la carga.

Lo anterior, evidencia que un sistema de distribución local es más vulnerable a los diferentes factores que afecten la continuidad del servicio prestado, por la singularidad de las topologías de sus redes eléctricas.

A partir de la investigación desarrollada, se busca presentar el método de implementación de medidores electrónicos, los cuales permiten tener un mejor esquema de regulación y registro de los sistemas de potencia, para mitigar la incidencia de factores como la discontinuidad en el servicio eléctrico.

## Actual identificación y localización de fallas en sistemas de distribución

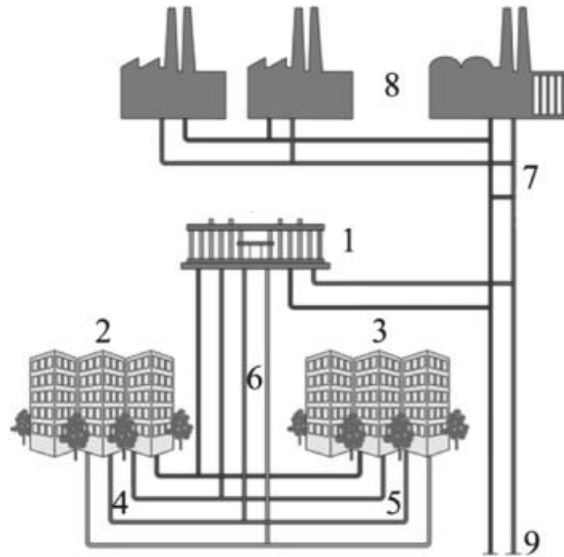
El diagnóstico de fallas en las redes de distribución es de gran importancia, incluso en las redes de media tensión. Del mismo modo, la identificación y localización de tales eventos es un importante factor para la calidad del servicio.

Para el diagnóstico de fallas se emplean algoritmos que consisten principalmente en el cómputo de la impedancia de la línea de falla, basados en el voltaje y la corriente registrados directamente en el alimentador primario. Por lo tanto, se establece una relación entre la impedancia y la distancia de la falla, teniendo presente los parámetros de la línea

Este método es eficiente para los sistemas de transmisión porque permite detectar, en un punto preciso, la ocurrencia de la interrupción; sin embargo, tal algoritmo no es aplicable a redes de distribución, debido a que éstas presentan topologías mucho más complejas, así, por ejemplo, la distancia asociada con la impedancia estimada puede coincidir con diferentes puntos de un sistema ramificado.

#### 4.2.1 Esquema de monitorización cabecera del circuito

**Figura 4.** Diagrama del Sistema de Distribución [3].



En la Figura 4 se logra observar un diagrama del sistema de distribución, en el cual la subestación principal o alimentador primario (1) está encargada de suplir energía eléctrica a usuarios residenciales (2 y 3) e industriales (8), a través de líneas de distribución (4, 5 y 6) y de un nodo de interconexión (7). Los operadores de red miden la continuidad del servicio de energía directamente sobre la subestación (1). Entonces, si ocurre una falla en los puntos (4, 5, 6 ó 7), esta interrupción no será oportunamente registrada por los medidores de la subestación, debido a que estos solo se tienen en cuenta los interruptores que se encuentran alojados en la misma. En consecuencia, los usuarios residenciales e industriales serán los principales afectados por la discontinuidad del servicio, que repercutirá en altas pérdidas en productividad, daño en equipos, productos y procesos. Todo lo anterior, es causado por el retraso en la identificación y localización de la falla eléctrica para el posterior restablecimiento del servicio.

#### **4.2.2 Metodología para la localización de fallas en sistemas de distribución utilizando medidores de calidad del servicio de energía eléctrica**

Frente a la problemática planteada en relación a la identificación y localización de fallas en sistemas de distribución, el grupo de investigación de “Arquitecturas modernas para sistemas de alimentación-ARMOS”, en conjunto con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, desarrollaron un primer prototipo electrónico con el nombre de Medidor de indicadores de calidad en el servicio de energía eléctrica (DES y FES) para usuario residencial, concebido inicialmente como un registrador enfocado a la regulación de los sistemas desde los usuarios suscriptores del servicio energético [7].

La funcionalidad del medidor se ha ampliado de forma progresiva, mediante la incorporación de nuevos esquemas de medición, algoritmos de control y sistemas de comunicación. Para orientar, de manera más general, a la solución de problemas de electrotecnia, enfocados hacia la calidad de la potencia eléctrica y del servicio.

#### **4.2.3 Instalación de medidores electrónicos**

La gran mayoría de los sistemas de distribución poseen topologías de tipo radial. Por tanto, es necesario disponer de medidores electrónicos en diferentes puntos del sistema de conexión. Los nodos de análisis pueden ser: transformadores de media y baja tensión, interruptores de potencia, barrajes, entre otros. Entre más puntos se tomen del sistema eléctrico para la identificación y localización de fallas, mayor será la precisión en el diagnóstico de discontinuidad del servicio energético.

Igualmente, los medidores electrónicos pueden ser implementados directamente en usuarios residenciales e industriales. De ser este el caso, los medidores deben ser instalados directamente en el armario que contiene los registradores de

energía activa, específicamente en el barraje de alimentación de los diferentes circuitos. En la fig. 6 se observa la instalación.

**Figura 5.** Armario de medidores, [3]



El acondicionamiento del sensor de voltaje que se encuentra alojado en el medidor electrónico, depende del nivel de tensión del nodo de interconexión de la red de distribución local donde será instalado el prototipo; por lo que se pueden encontrar diferentes niveles de tensión.

La instalación de los medidores debe realizarse por personal calificado, cumpliendo las normas nacionales e internacionales. Para el caso colombiano, la instalación se debe regir bajo los principios establecidos en la Norma Técnica Colombiana 2050 (NTC 2050) y el Reglamento técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

#### **4.2.4 Detección de eventos de tensión**

Se debe censar la componente fundamental de la señal de voltaje al momento de pre falla y falla, debido a que pueden existir interrupciones permanentes o transitorias.

En este orden de ideas, una falla presente en el sistema de distribución local, ocasiona cuantiosas pérdidas económicas a los pequeños y grandes

consumidores. Por tal razón, el medidor electrónico sensa la ausencia de tensión e informa a los especialistas para que se genere un rápido aislamiento, reparación y restauración del servicio energético. Con lo anterior, se mitigarían los altos índices de la duración de las interrupciones presentes en un circuito (DES).

Por otro lado, las interrupciones transitorias no se pueden identificar por simple inspección. Por tal razón, el medidor electrónico permite detectar los puntos débiles de los sistemas de potencia en donde reincide la falla. De esta manera, se logra tener un esquema de regulación para atenuar los altos índices del indicador de frecuencia equivalente en las interrupciones de un circuito (FES).

#### **4.2.5 Sistema de comunicación**

A partir de la necesidad de obtener los registros de los medidores en los diferentes puntos de la red de distribución, se debe implementar un sistema de transmisión inalámbrico, adecuado para dar soporte a las necesidades de telemetría. Tal comunicación es establecida mediante estándares ZigBee, por su bajo coste, soporte para múltiples topologías de red, rango de alcance y bajo consumo de energía.

Este sistema de comunicación permite obtener un estudio en tiempo real de la información adquirida por el medidor electrónico, frente a un suceso característico en las líneas de distribución. Por tanto, el medidor emite un diagnóstico que informa a los especialistas (principalmente a los operadores de las subestaciones) de los eventos de ocurrencia en las redes de distribución local.

Una vez emitido un diagnóstico por el medidor, el receptor de la información ubicado en la subestación principal migrará los datos recibidos hacia el ordenador de la subestación. Seguidamente, este programa generará un reporte de la ocurrencia de los eventos con fecha y hora, para luego emitir la identificación de la línea que ha salido de servicio. Con base en este informe, el operador o el especialista de turno, podrá emitir un protocolo a seguir para proceder con la

recuperación del sistema de distribución local. Es decir, restablecer el servicio de energía para los usuarios.

Dentro de la regulación colombiana, está establecido que los operadores de red y los comercializadores de la energía eléctrica deben generar reportes de los indicadores DES y FES de manera trimestral, para ser presentados a organismos de control y regulación. En relación a lo anterior, el software cuenta con la posibilidad de observar el historial de ocurrencia de eventos con información referente a la duración, fecha y localización de la falla en el sistema de los últimos 12 meses. Por tanto, el programa permite tener una mejor inspección de las características de las interrupciones en los circuitos.

### **4.3 LOCALIZACIÓN DE FALLAS PARA REDES INTELIGENTES**

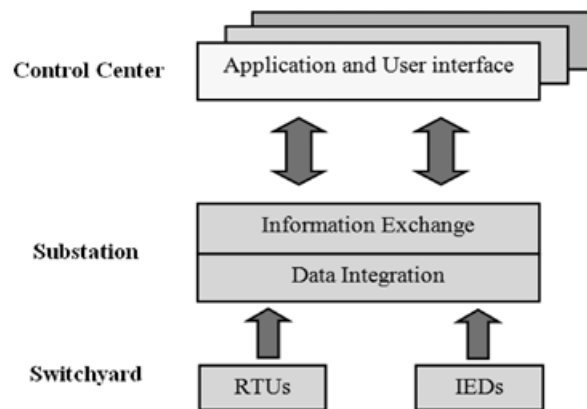
Según Estados Unidos la Iniciativa de una red moderna del Departamento de energía integra una red inteligente de tecnologías de detección avanzadas, métodos de control y comunicaciones integradas en la red eléctrica [6].

### **INTEGRACIÓN DE DATOS PARA LOCALIZACIÓN INTELIGENTE DE FALLAS**

#### **4.3.1 Línea de transmisión**

Una subestación integradora inteligente está equipada normalmente con varios tipos de IED que pueden utilizarse para monitoreo, control y protección. Las señales analógicas de la subestación medidas en nivel de alta energía son transformadas a nivel de instrumentación (usando transformadores de corriente y tensión) filtradas y digitalizadas para ser procesadas utilizando artefactos explosivos improvisados. La idea básica de integración de datos es recopilar todos los datos IED en una base de datos de la subestación y utilizarla para extraer información automáticamente y luego utilizar la información extraída para varias aplicaciones de sistemas de potencia. El diagrama funcional de flujo de datos de la subestación se muestra en la figura 6.

**Figura 6.** Diagrama funcional para el flujo de datos de la subestación, [4]



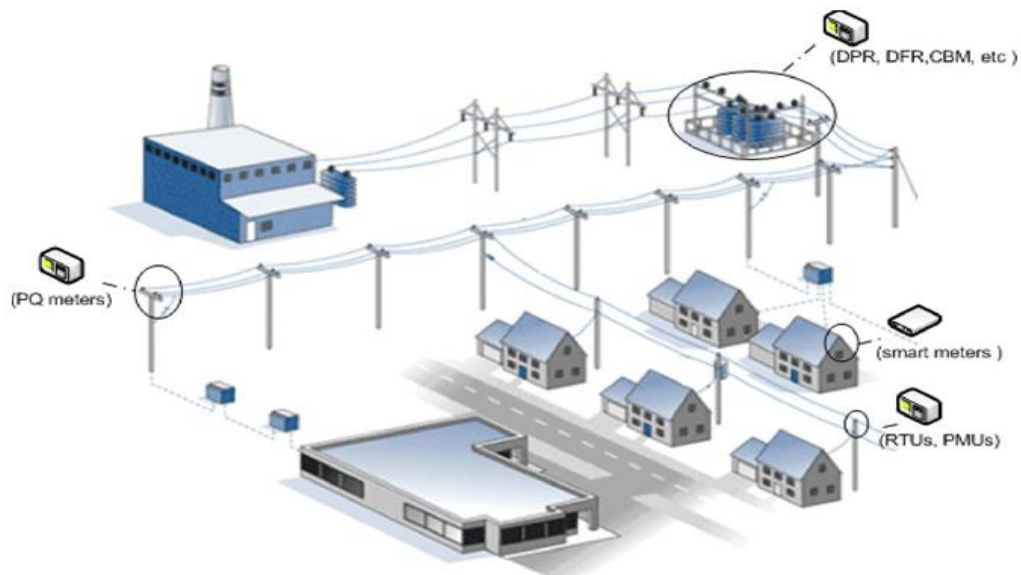
#### **4.3.2 Localización de falla en la alimentación del sistema de distribución**

Como parte de proyectos de implementación de redes inteligentes, surgieron sistemas improvisados para monitoreo, protección y otros fines, incluyendo los sistemas de medición inteligentes, control de calidad de energía y automatización del sistema de distribución en sistemas de distribución. Estos sensores inteligentes están instalados en el sistema, desde la subestación hasta el lugar del cliente. Algunos proporcionan muestras (relés de protección digitales, registradores de falla digital), algunos proporcionan muestras de sincronización de fasores (relés de protección digital) y algunas energías medidas e indicadores de calidad (contadores inteligentes y medidores de calidad de potencia). El desarrollo en las comunicaciones de red inteligente hace que los datos capturados por estos nuevos dispositivos estén disponibles para los múltiples suscriptores y sirven para varias infraestructuras IED.

Por lo tanto, la utilización de los datos obtenidos de varios artefactos explosivos improvisados instalados a lo largo de los alimentadores es bastante factible. Ejemplos de estos dispositivos de medición incluyen: subestación y relé de alimentación, así como controladores inteligentes para interruptores de banco de

condensador o reclosers, sistemas de lectura (AMR) medidores automáticos instalados en los sitios de cliente, medidores de calidad de potencia con una instalación en lugares estratégicos en el sistema y sensores de voltaje que pueden ubicarse en polos seleccionados como parte de la banda ancha sobre la línea eléctrica (BPL). En la figura 7 se muestra un ejemplo de una gran variedad de aplicaciones de la IED en la red de distribución.

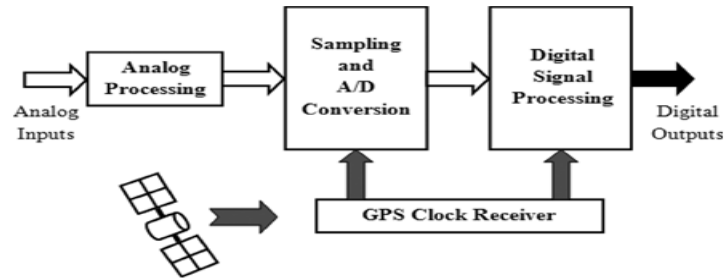
**Figura 7.** Lugares de diferentes equipos en una red de distribución [4].



### 4.3.3 Proceso y muestreo de datos

Las formas de onda de la señal de entrada se toman por la muestra y el circuito (S/H) en el momento definido por el reloj de muestreo para poder realizar la conversión de analógico-digital (ADC). Existen varios métodos de muestreo, ejemplo de un proceso de muestreo es señalado en la figura 8.

**Figura 8.** Proceso para el muestro de la señal, [4]



#### **4.4 LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN MEDIDORES INTELIGENTES**

El diagnóstico de fallas en las redes de distribución es de gran importancia principalmente en las redes de media tensión. Del mismo modo, la identificación y localización de tales eventos es un importante factor para la calidad del suministro de energía eléctrica. Para la identificación de las fallas se emplean algoritmos que consisten principalmente en el cómputo de la impedancia de la línea de falla, basados en el voltaje y la corriente registrados directamente en el alimentador primario. Por lo tanto, se establece una relación entre la impedancia y la distancia de la falla, teniendo presente los parámetros de la línea. Este método es eficiente para los sistemas de transmisión porque permite detectar en un punto preciso la ocurrencia de la interrupción. Sin embargo, éste no se aplica a redes de distribución, debido a que éstas, presentan topologías mucho más complejas, en donde, la distancia asociada con la impedancia estimada, puede coincidir con diferentes puntos de un sistema ramificado [1-2].

##### **4.4.1 Método de localización de fallas utilizando medidores inteligentes de tensión**

El método de localización de fallas referente, el cual va a ser implementado inicialmente, está basado en la capacidad de monitoreo de los medidores de alimentación y sobre teoría de cortocircuito; varios modelos de medidores

inteligentes son capaces de reportar cortes y medir tensión con una clase de precisión con rangos típicamente desde 0.1 al 0.15%. La idea principal del método en mención para localización de fallas es para explotar esa capacidad, así la información de los hundimientos de tensión [8] puede ser procesada para calcular el índice de localización de fallas, el cual indica el barraje más cercano al punto de falla. Cada vez que una falla es detectada, los medidores son consultados para proporcionar el valor de la tensión rms justo antes y durante la ocurrencia de la falla [1]. Adicionalmente, en los resultados presentados aquí, el valor de la tensión rms fue calculado usando un tipo de muestreo de 64 muestras/ciclo. La base teórica del método se presenta a continuación:

Usando la magnitud de la tensión medida por el medidor de alimentación es posible obtener la desviación de tensión  $\Delta V$  como se muestra en (1).

$$\Delta V_i^{(abc)} = V_i^{(abc)p} - V_i^{(abc)f} \quad (1)$$

Donde el subíndice  $i$  está relacionado al medidor de alimentación instalado en el barraje  $i$ ;  $V_i^{(abc)p}$  y  $V_i^{(abc)f}$  Son las magnitudes de tensión medidas durante y antes de la falla (pre falla), respectivamente; y el superíndice  $abc$  representa cada fase, así se obtiene la desviación de tensión sobre la fase  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Si el barraje  $k$  está bajo la falla, se puede estimar la corriente de falla de cada fase usando la desviación de tensión determinada por la medida  $i$  basado en la siguiente expresión:

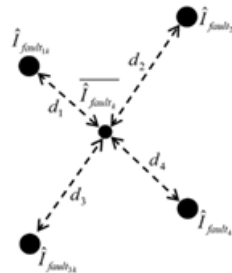
$$\hat{I}_{fault_{ik}}^{(abc)} = (Z_{ik}^{(abc)})^{-1} \cdot \Delta V_i^{(abc)} \quad (\text{para } i \neq k) \quad (2)$$

Donde  $Z_{ik}^{(abc)}$  es la submatriz  $ik$  de  $3 \times 3$  de la matriz de impedancia  $Z_{bus}^{(abc)}$  del sistema trifásico,  $\hat{I}_{fault_{ik}}^{(abc)}$  es la corriente de falla calculada usando la medición de tensión desde la medida  $i$  y considerando una falla en el barraje  $k$ . Note que las cargas, representadas por modelos constantes de impedancias, deben ser incluidos dentro de la matriz del bus de impedancias para mejorar la precisión del

método. En orden a incluir las cargas en la matriz del bus de impedancias, todo de las cargas es representado por modelo de impedancias constantes. Entonces las derivaciones de las impedancias equivalentes asociado con el bus son incluidas en los elementos de la matriz. La estimación de carga puede hacerse usando curvas típicas de carga o basado en la información suministrada por los medidores inteligentes del consumidor. La influencia de las cargas en el rendimiento del método es analizada en la sección IV-A y en el apéndice A.

Por lo tanto, si uno tiene  $N_{fm}$  medidas, hay  $N_{fm}$  fallas de corriente estimadas basado en la suposición que el bus bajo la falla es el bus  $k$ . Si la falla realmente ocurre en el bus  $k$ , todas las corrientes estimadas deben tener prácticamente el mismo valor, el cual está cercano al valor real. Por otra parte, si la falla ocurre en cualquier otro bus, habrá un error en la corriente de falla estimada basado en las mediciones de cada medida  $i$ . Adicionalmente, el error obtenido basado en las diferentes medidas será distinto para cualquier otro.

**Figura 9.** Identificación del índice delta-k, [5]



Basado en la explicación citada, un índice de localización de fallas  $\delta_k$  puede ser usado para identificar el bus actual bajo la falla. Este índice es dado por la suma de las diferencias entre el  $N_{fm}$  estimado de los valores de corrientes de fallas tomados dentro de la consideración del bus  $k$  está bajo la falla y su valor promedio (cada diferencia es referida como  $\delta_{ik}$ ), como se muestra en la figura 9.

$$\delta_k = \sum_{ph}^{a,b,c} \sum_{i=1}^{N_{fm}} \left( \left| \hat{I}_{fault_{ik}}^{ph} - \overline{\hat{I}_{fault_k}^{ph}} \right| \right) = \sum_{ph}^{a,b,c} \sum_{i=1}^{N_{fm}} d_{ik}^{ph} \quad (3)$$

Donde  $\hat{I}_{fault_{ik}}^{ph}$  es la corriente de falla calculada por fase ph con mediciones en el medidor alimentador en el bus i usando (2) y  $\overline{\hat{I}_{fault_k}^{ph}}$  es el promedio de todos los valores de corriente de falla calculadas usando la tensión medida en cada medidor alimentador para el bus k. Como se mencionó antes, si el bus bajo el análisis es el bus fallado, todo de las corrientes estimadas será prácticamente el mismo. Así, el bus asociado con el mínimo  $\delta_k$  es seleccionado como el bus fallado.

Para ciertas situaciones, numéricamente, el mínimo  $\delta$  debe ser asociado con más que un bus k indicando estimación múltiple. Con el fin de ocuparse con tales casos y mejorar el rendimiento del método, mapeo de cortes automático puede ser usado, como se describe en la siguiente sección.

#### 4.4.2 Mapeo de corte automatizado

La comunicación entre el medidor alimentador y el consumidor y el centro de control permite la monitorización con los medidores des energizados, consecuentemente, determinando la parte de la red que es des energizada. Mediante la incorporación de datos desde el sistema de información geográfica (GIS), el corte de mapeo puede acelerar y automatizar el proceso típico manual de localización de falla, el cual depende de las llamadas del consumidor.

Ayudados de medidores inteligentes se puede construir el mapeo de corte mediante la monitorización de los transpondedores no conectados a la red. Como resultado, los cambios que indican un barraje malo como el barraje de falla y múltiples ocurrencias de estimación pueden ser minimizados o incluso eliminados.

#### 4.4.3 Método directrices

Los pasos abajo mostrados resumen la aplicación del método después que una falla de red ha sido detectada:

Paso 1) Construir la matriz del barraje de impedancias ( $Z_{bus}$ ) (este paso se puede hacer fuera de línea).

Paso 2) Leer la medición de la desviación de tensión desde los medidores inteligentes.

Paso 3) Estimar la corriente de falla  $\hat{I}_{fault_{ik}}^{ph}$  de cada barraje en el sistema usando la medición de los medidores alimentadores, la matriz  $Z_{bus}$  y (2).

Paso 4) Calcular el promedio de la corriente de falla  $\overline{\hat{I}_{fault_k}^{ph}}$

Paso 5) Calcular el índice de la corriente de falla  $\delta_k$  para cada barraje k en el sistema usando (3).

Paso 6) Indicar el barraje asociado con el valor más bajo del  $\delta_k$  como el barraje fallado

Paso 7) Si más de un barraje (región) es ubicado como barraje fallado, el mapeo de corte automatizado puede ser utilizado para resolver el problema de múltiple estimación [1], [11].

En la Figura 10 se da a conocer la comparación entre los métodos más comunes utilizados para localización de fallas en sistemas de distribución. La fila sombreada indica los requerimientos mínimos que debe tener un método para Inicio poder aplicarlo a los sistemas de distribución. Los métodos que cumplen con las características fundamentales son el método propuesto y el método de Aggarwal [15].

COMPARACIÓN CUALITATIVA DEL MÉTODO PROPUESTO, CON LOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN MÁS CONOCIDOS



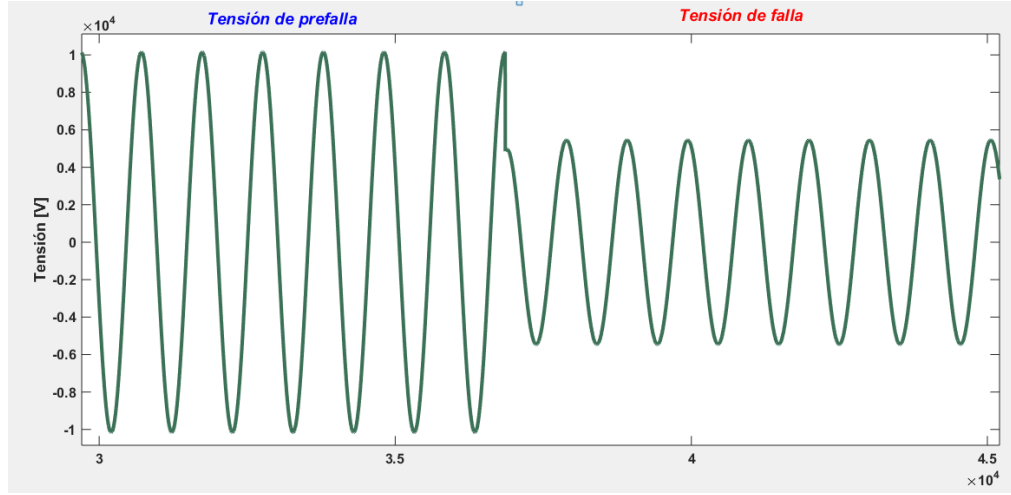
alcanzada, de acuerdo a estas apreciaciones se selecciona una parte del método presentado en [1] que permite estimar las corrientes de falla vistas por los medidores inteligentes con respecto a los otros nodos eléctricos.

El método de localización de fallas referente [1] consiste en estimar valores de corriente de falla en cada una de los nodos eléctricos del sistema respecto a los medidores ubicados en el mismo, teniendo en cuenta tensiones tanto de pre falla, como tensiones en cada barra después de ocurrida la falla, siendo estas tensiones son las suministradas por cada uno de los medidores inteligentes.

Para la obtención de estas corrientes de falla se recurre a la expresión que relaciona el diferencial entre la magnitud de tensión medida por el medidor antes y después del desarrollo de la falla y la impedancia que relaciona el nodo donde se presenta la falla y el nodo donde está ubicado el medidor que suministra la tensión.

Se toma en cuenta la magnitud de la tensión de pre falla y pos falla obtenida del programa de simulación ATP (Figura 11) y se realiza una diferencia entre estos valores con un número de 2048 muestras (valor de muestras seleccionado para una aproximación más cercana a la estimación de las corrientes de falla con su valor real), de acuerdo a la ecuación (6).

**Figura 11.** Ejemplo gráfica de tensión suministrada por el medidor inteligente de tensión con ayuda del software ATP



$$\Delta V_i^{(abc)} = V_i^{(abc)p} - V_i^{(abc)f} \quad (6)$$

Donde el subíndice  $i$  corresponde a el nodo donde está ubicado el medidor inteligente; los términos  $V_i^{(abc)p}$  y  $V_i^{(abc)f}$  son los valores RMS de las 2048 muestras de las magnitudes de tensión de pre falla y pos falla suministradas por los medidores inteligentes respectivamente; y el superíndice  $(abc)$  representa las cada una de las fases del sistema trifásico. Para la estimación de la corriente de falla se utiliza la expresión (7).

$$I_{falla_{ik}}^{(abc)} = \left( Z_{ik}^{(abc)} \right)^{-1} \cdot \Delta V_i^{(abc)} \quad (\text{para } i \neq k) \quad (7)$$

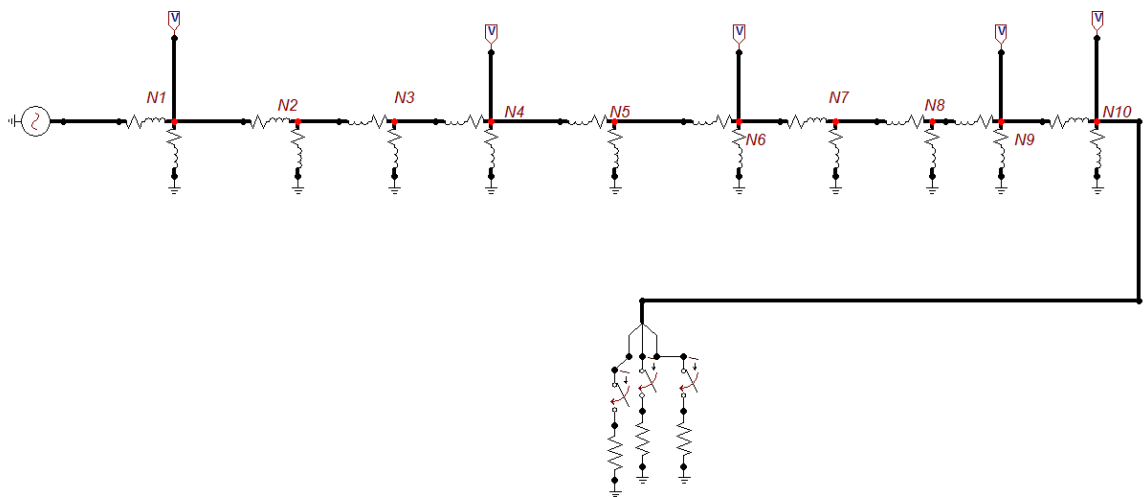
Siendo  $I_{falla_{ik}}^{(abc)}$  la corriente de falla hallada en el nodo  $k$  con el medidor ubicado en el nodo  $i$ , para esto es necesario determinar una matriz de impedancias  $Z_{ik}^{(abc)}$ , la cual es una submatriz de 3 X 3 obtenida a partir de la zbus general del sistema (8) como sigue:

$$Z_{ik}^{(abc)} = \begin{bmatrix} Z_{ik} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ik} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ik} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para obtener una mayor precisión en la determinación de estas corrientes es necesaria la inclusión de las cargas en la zbus del sistema general.

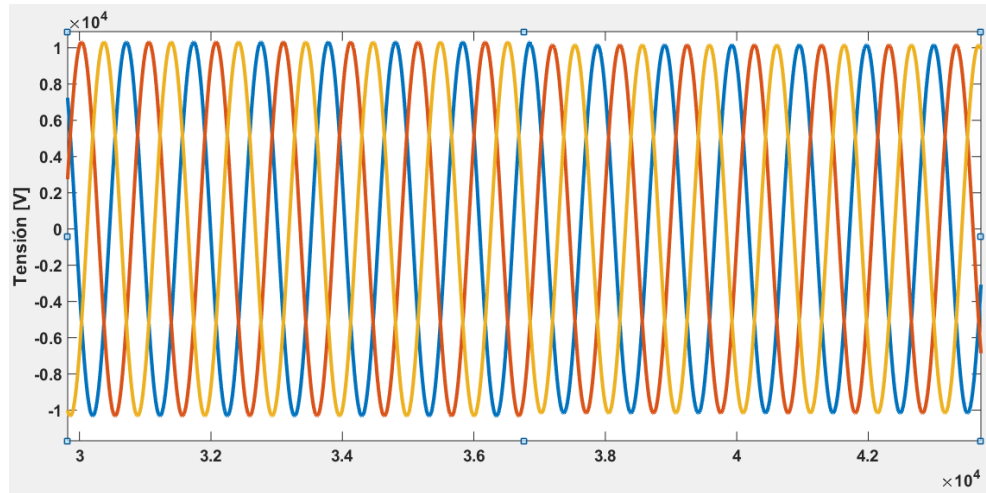
Se realizan pruebas en el sistema de 10 nodos eléctricos mostrado en la Figura 12, para comprobar la eficiencia del método referente [1], al momento de la localización de falla, estas pruebas realizadas son hechas para cada tipo de falla en cada una de los nodos eléctricos del sistema.

**Figura 12.** Ejemplo de aplicación del método referente en sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo

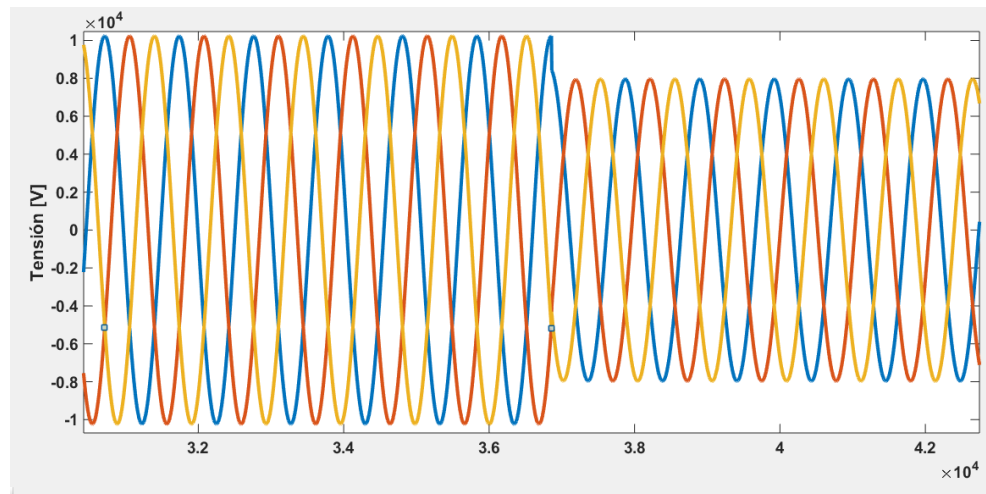


El método referente [1] propone, a partir de las tensiones suministradas por los medidores inteligentes, hallar corrientes de falla vistas desde el medidor hacia el nodo donde se encuentra la falla, después de esto se hace la diferencia entre estas corrientes calculadas y las corrientes promedio por barra vistas con los medidores ubicados en los otros nodos eléctricos. A continuación, se expone la forma de calcular estas corrientes y la forma de localización de falla utilizada para el ejemplo de la Figura12.

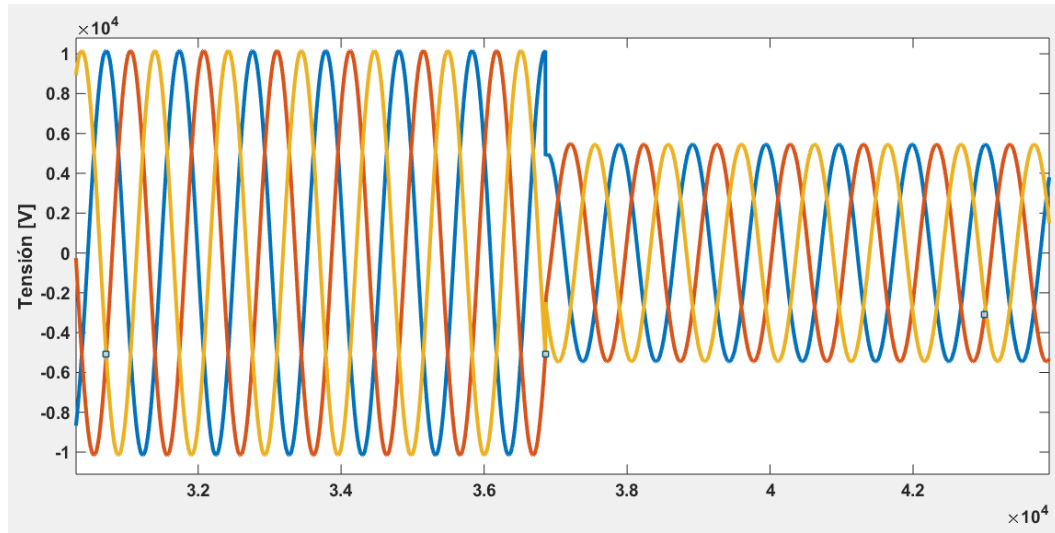
**Figura 13.** Tensión en el nodo eléctrico 1 cuando la falla es trifásica en 10.



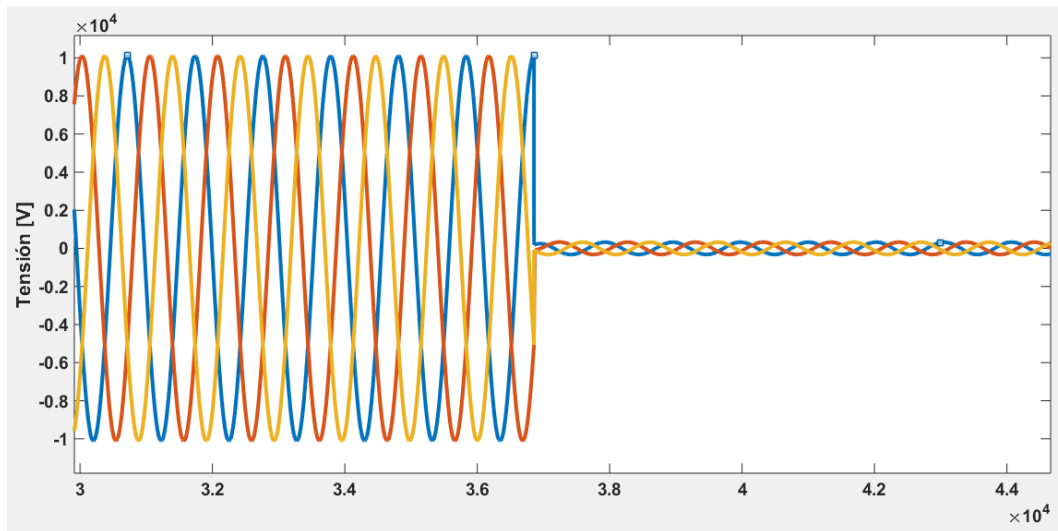
**Figura 14.** Tensión en el nodo eléctrico 4 cuando la falla es trifásica en 10.



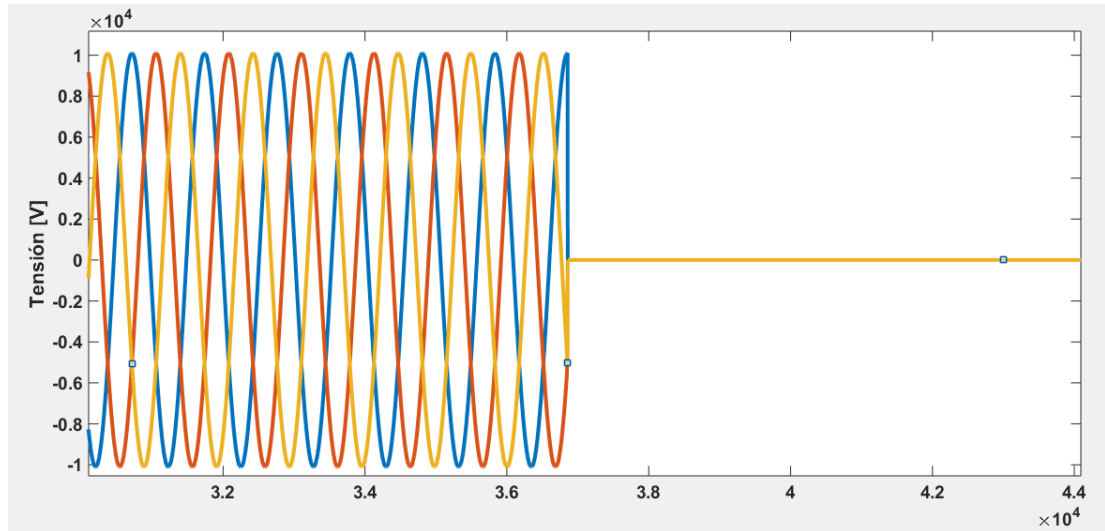
**Figura 15.** Tensión en el nodo eléctrico 6 cuando la falla es trifásica en 10.



**Figura 16.** Tensión en el nodo eléctrico 9 cuando la falla es trifásica en 10.



**Figura 17.** Tensión en el nodo eléctrico 10 cuando la falla es trifásica en 10.



De acuerdo a estas gráficas de tensión y a los datos suministrados por los medidores se aplica (6) para hallar cada  $\Delta V_i$ , es decir,  $\Delta V_1, \Delta V_4, \Delta V_6, \Delta V_9, \Delta V_{10}$

$$\Delta V_1 = \Delta V_1^p - \Delta V_1^f$$

Después de obtener cada una de estas diferencias de tensión por fase en cada una de los nodos eléctricos donde está instalado un medidor se procede a hacer el cálculo de las corrientes de falla con (7)

Con el medidor en 1 se calcula:

$$I_{12}, I_{13}, I_{14}, I_{15}, I_{16}, I_{17}, I_{18}, I_{19}, I_{110} \quad \text{Para cada una de las fases}$$

Con el medidor en 4 se calcula:

$$I_{41}, I_{42}, I_{43}, I_{45}, I_{46}, I_{47}, I_{48}, I_{49}, I_{410} \quad \text{Para cada una de las fases}$$

Con el medidor en 6 se calcula:

$$I_{61}, I_{62}, I_{63}, I_{65}, I_{64}, I_{67}, I_{68}, I_{69}, I_{610} \quad \text{Para cada una de las fases}$$

Con el medidor en 9 se calcula:

$I_{91}, I_{92}, I_{93}, I_{95}, I_{96}, I_{97}, I_{98}, I_{94}, I_{910}$  Para cada una de las fases

Con el medidor en 10 se calcula:

$I_{101}, I_{102}, I_{103}, I_{105}, I_{106}, I_{107}, I_{108}, I_{109}, I_{104}$  Para cada una de las fases

Por ejemplo:

$$[I_{12}] = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{12} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{12} \end{bmatrix}^{-1} [\Delta V_1^{(abc)}]$$

Una vez calculadas las corrientes de falla se hace el promedio de cada una de ellas por barra:

Ejemplo para los nodos eléctricos 1 y 2

$$I_1 = \frac{I_{41} + I_{61} + I_{91} + I_{101}}{4}; I_2 = \frac{I_{12} + I_{42} + I_{62} + I_{92} + I_{102}}{5}$$

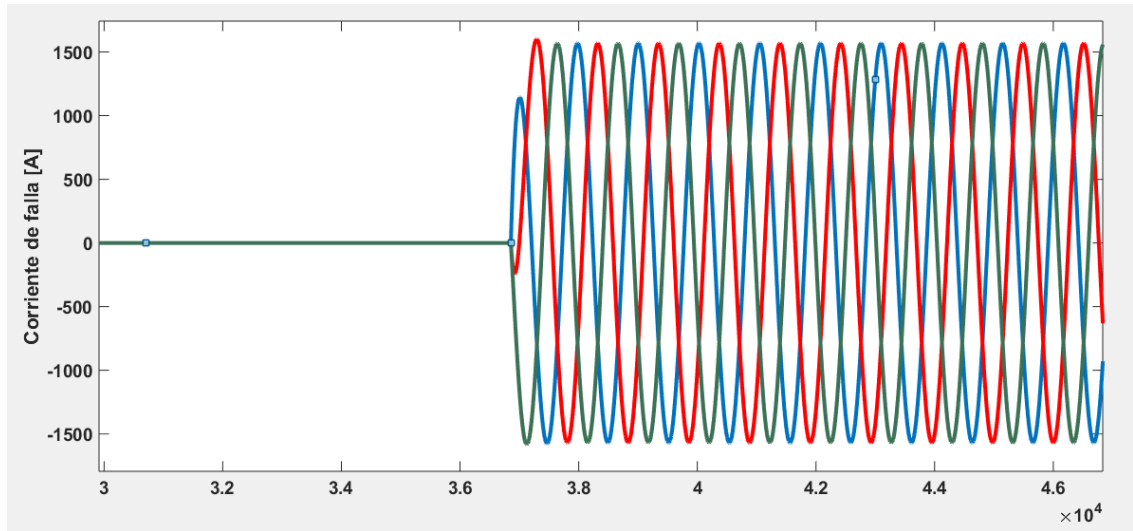
Por último, se procede a hallar los deltas, que son los que determinan la localización de la falla.

$$\delta_1 = |I_{41} - I_1| + |I_{61} - I_1| + |I_{91} - I_1| + |I_{101} - I_1|$$

Se realiza el mismo proceso para cada una de los nodos eléctricos, y el mínimo valor hallado de estos deltas indica el nodo en falla.

En la Figura 18 se muestra la corriente de falla suministrada por el software ATP, cuando ésta es trifásica en el nodo 10

**Figura 18.** Corriente de falla trifásica en el nodo eléctrico 10.



De acuerdo a los análisis realizados para cada uno de los tipos de falla y aplicando el método referenciado, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 1, de los cuales se puede concluir que el método no genera una confianza muy alta de acuerdo a su eficiencia a la hora de la identificación de la falla.

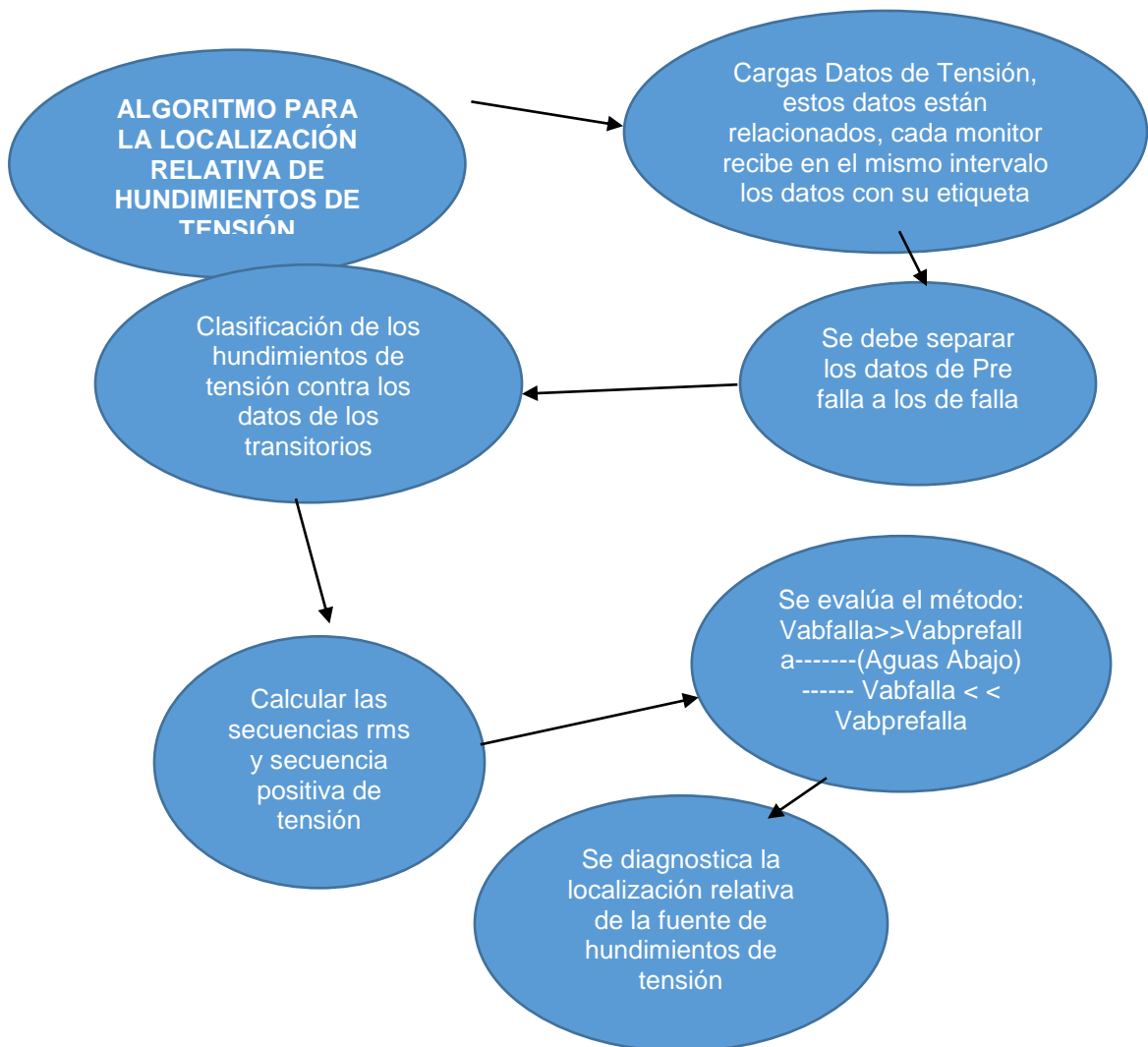
**Tabla 1.** Resultados generales de rendimiento del método referente

TIPO DE FALLA	BARRA										EFECTIVIDAD %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Trifásica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	70
Monofásica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	60
Línea - Línea	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	40
Línea - Línea a tierra	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	60
GENERAL											57,5

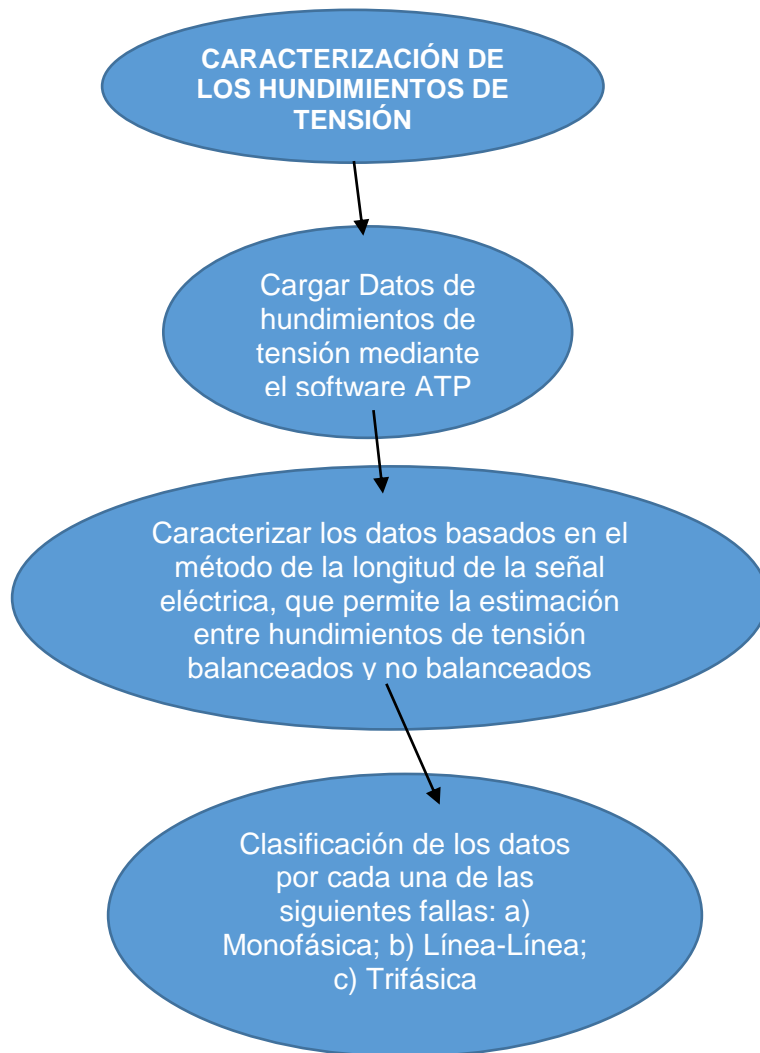
Para la implementación del método propuesto por los autores es necesaria la consulta de artículos que ayudan a facilitar la eficiencia del mismo; este es el caso de dos artículos desarrollados por la UIS y disponibles en la base de datos del IEEE, los cuales han sido presentados en diferentes conferencias internacionales. El primer artículo relacionado con la identificación de zonas (localización relativa) donde ocurre la falla 'Algorithm for Relative Location of Voltage Sags and

Capacitor Switching Transients Based on Voltage Measurements Only', publicado en Junio de 2014 por los autores J. Blanco, J.F. Petit, G. Ordoñez [12], el cual permite reducir el área de influencia para la localización de la falla, en el que se restringe la ubicación de la falla a zonas delimitadas por medidores inteligentes; otro método de referencia que conduce a una reducción en posibles errores a la hora de la determinación de corrientes de falla, es aquel que permite determinar el tipo de falla y las fases en las cuales ésta ocurre 'A Novel Algorithm for Characterizing Measured Three-Phase Voltage Sags' publicado en Junio de 2013 por los autores J. Blanco, J.F.Petit, G.Ordoñez, J.L.Jagua, V. Barrera [13].

**Figura 19.** Proceso de localización relativa de hundimientos de tensión, método referente [12]

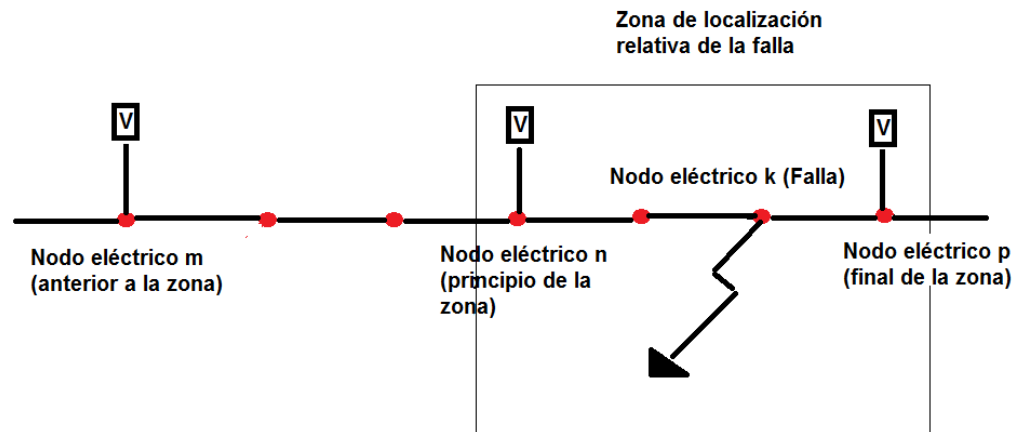


**Figura 20.** Proceso de caracterización de hundimientos de tensión, método referente [13]



La Figura 21 muestra la sección de un sistema de 10 nodos eléctricos, en el cual han sido instalados 5 medidores inteligentes de tensión, los cuales van a ser los encargados de delimitar las zonas, donde el método propuesto en este documento se va a basar.

**Figura 21.** Ejemplo de aplicación del método referente



Basados en estos métodos referentes y con el fin de localizar las fallas de red, teniendo en cuenta estos datos suministrados por los medidores inteligentes, de acuerdo al modelado en el software ATP, en este trabajo de grado se propone un método que involucra los valores de corriente hallados con ayuda del software Matlab y valores de corriente referentes, determinadas en el momento de la falla.

Para hallar estas corrientes de referencia se tienen en cuenta las tensiones durante la falla que son suministradas por cada medidor instalado, se obtiene a partir de la diferencia entre las tensiones de los medidores en las barra adyacentes a el nodo en falla (nodo k), es decir, el valor absoluto de la diferencia entre las tensiones entre los nodos eléctricos anterior (nodo n) y posterior (nodo p) donde exista medidor sobre la impedancia total sumada en serie entre los dos nodos eléctricos, se debe tener en cuenta que para la utilización del método se restringe zonas donde puede estar ubicada la falla, y de acuerdo a estas zonas se deciden las tensiones para hallar las corrientes de referencia.

La corriente  $I_n$  mostrada en la ecuación (9) es la primera corriente de referencia que tiene que ver con la tensión en la primera barra de la zona relativa de localización de la falla, es decir, con la tensión eficaz suministrada por el medidor

ubicado en el nodo inmediatamente anterior a el nodo en falla  $V_n^{(abc)}$  y el anterior a éste  $V_m^{(abc)}$ , si la primera barra de la zona coincide con la primera barra del sistema, la tensión  $V_m^{(abc)}$  corresponde a la tensión por fase de la alimentación.

$$I_n = \left| \frac{|V_n^{(abc)}| - |V_m^{(abc)}|}{Z_{mn}} \right| \quad (9)$$

La siguiente corriente de referencia  $I_p$ , es aquella en la cual se tiene en cuenta la tensión eficaz obtenida del medidor ubicado al final de la zona  $V_p^{(abc)}$  y la tensión eficaz del nodo en el principio de la zona, relacionadas con la impedancia serie entre los dos nodos eléctricos donde están los medidores, de acuerdo a la ecuación (10).

$$I_p = \left| \frac{|V_p^{(abc)}| - |V_n^{(abc)}|}{Z_{np}} \right| \quad (10)$$

Una vez obtenidas estas corrientes de referencia se procede a la identificación de la falla para lo cual se hace una diferencia por fase entre la corriente hallada  $I_p$  en el software Matlab y la corriente  $I_n$  sobre el valor máximo de estas dos, para las corrientes en el nodo k, para los otros nodos eléctricos se hace la diferencia entre las corrientes halladas por los dos medidores sobre el valor máximos de estas, de la siguiente manera:

$$\delta_x = \sum_{a,b,c} \left( \frac{|I_{pk}^{fase} - I_{nk}^{fase}|}{\max(I_{pk}^{fase}, I_{nk}^{fase})} * 100 \right) \quad (11)$$

Donde  $\delta_x$  relaciona las corrientes obtenidas con Matlab de cada uno de los nodos eléctricos donde hay medidor en la zona (n, p), es decir, la corriente de falla vista desde el nodo donde está el medidor, siendo:

$I_{pk}^{fase}$ : Corriente calculada en el nodo k vista por el medidor ubicado en el nodo p (barra ubicada en la final de la zona).

$I_{nk}^{fase}$ : Corriente calculada en el nodo k vista por el medidor ubicado en el nodo n (barra ubicada en el inicio de la zona).

$$\delta_n = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{pn}^{fase} - I_n^{fase}|}{\max(I_{pn}^{fase}, I_n^{fase})} * 100 \right) \quad (12)$$

Donde  $\delta_n$  relaciona las corrientes obtenidas con Matlab del nodo en el inicio de la zona con la corriente de referencia, siendo:

$I_{pn}^{fase}$ : Corriente calculada en el nodo inicial de la zona (n) vista por el medidor ubicado en el final de la misma (p).

$I_n^{fase}$ : Corriente de referencia calculada con tensiones de falla obtenidas de los medidores inteligentes en el nodo de inicio de la zona (n).

$$\delta_p = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{np}^{fase} - I_p^{fase}|}{\max(I_{np}^{fase}, I_p^{fase})} * 100 \right) \quad (13)$$

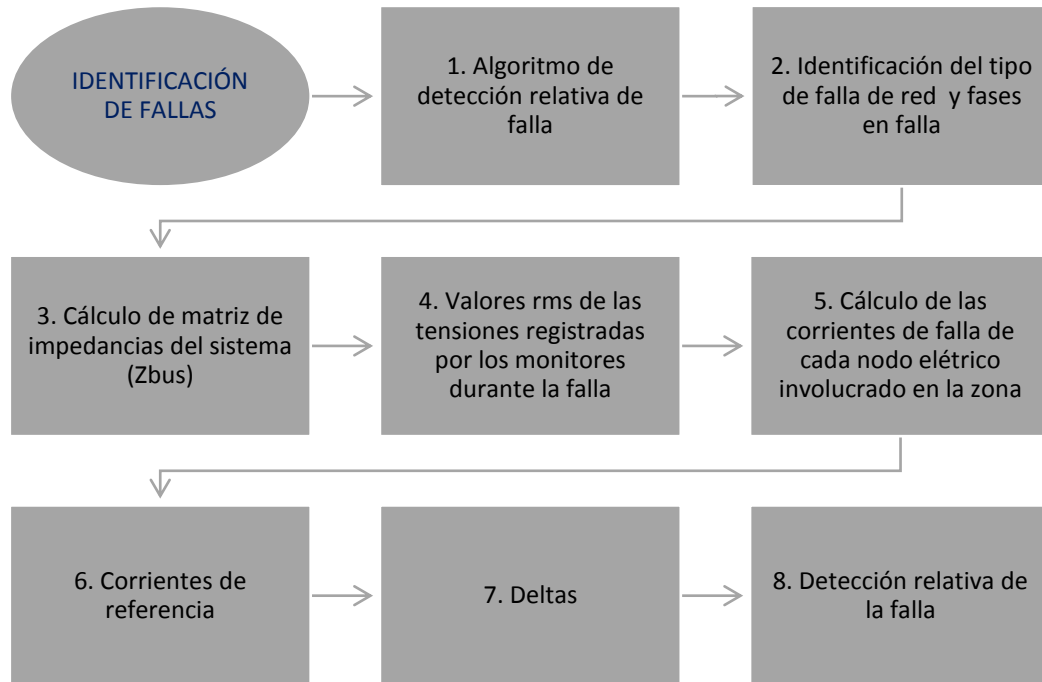
Donde  $\delta_p$  relaciona las corrientes obtenidas con Matlab del nodo en el final de la zona con la corriente de referencia, siendo:

$I_{np}^{fase}$ : Corriente calculada en el nodo final de la zona (n) vista por el medidor ubicado en el inicio de la misma (n).

$I_n^{fase}$ : Corriente de referencia calculada con tensiones de falla obtenidas de los medidores inteligentes en el nodo de fin de la zona (p).

La ubicación de la falla es tomada entonces donde el valor de estos  $\delta_x, \delta_n$  y  $\delta_p$  sea el más pequeño.

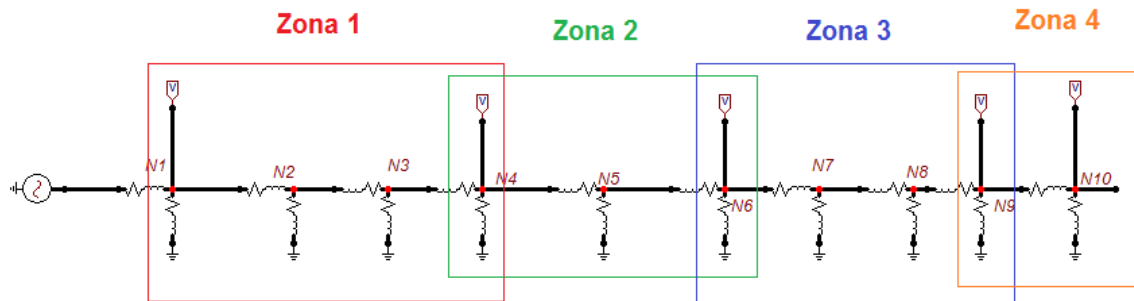
**Figura 22.** Proceso para la identificación de fallas con el método propuesto



En la Figura 22 es mostrado en resumen el proceso utilizado en el método propuesto para la identificación de falla en sistemas de distribución, donde:

Los pasos 1 y 2 son tomados como referencias de artículos consultados, y de los cuales se obtuvo la reducción del proceso a la hora de identificar la falla, los cuales permiten reducir el sistema de 10 nodos eléctricos a 4 zonas como se muestra en la Figura 23 y fases donde se hace el análisis y es posible la implementación del método para la identificación de la falla.

**Figura 23.** Identificación de zonas para el sistema eléctrico de prueba seleccionado

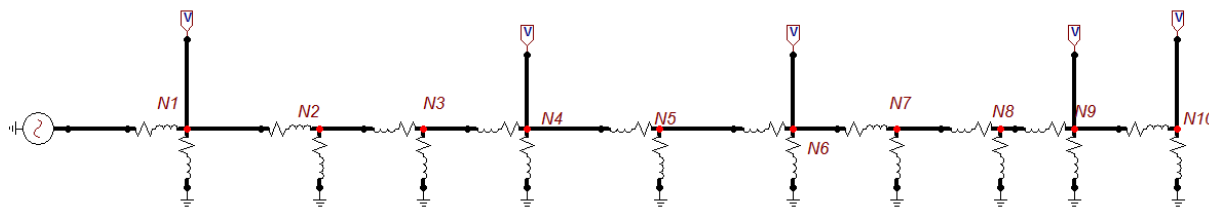


Una vez identificadas las zonas y las fases en las cuales está ocurriendo la falla, se procede a la implementación del método, que inicia con la obtención de la matriz de impedancias del sistema de 10 nodos eléctricos escogido (paso 3), al tiempo que pueden ser obtenidos los valores rms de la tensión tanto de tensión de pre falla y falla de los medidores ubicados en la zona identificada (paso 4) para posteriormente calcular los valores de corriente de falla con ayuda del software Matlab (paso 5) y las corrientes de referencias (paso 6), para proceder a hacer la diferencia entre éstas, es decir, los deltas que permitan identificar las barra en la cual ocurre la falla.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS PROPUESTO

Como ejemplo de aplicación del método propuesto en este trabajo de grado, se tomó un sistema real de 10 nodos eléctricos mostrado en la Figura 12, el cual es simulado en el software ATP y donde se permite ubicar tipos de medidores inteligentes que pueden ayudar a la realización de las pruebas para todo tipo de falla; las características de la fuente de alimentación son ilustradas en la Figura 13, y para el sistema de prueba se ubicaron medidores de tensión en los nodos eléctricos 1, 4, 6, 9 y 10, a partir de los cuales es posible calcular las corrientes de falla de acuerdo a las tensiones que estos suministran.

**Figura 24.** Sistema eléctrico usado como prueba del método propuesto.



La fuente de alimentación y la impedancia en serie con ella, pueden ser interpretadas como un subsistema o un equivalente de Thevenin de sistema conectado en serie con el sistema de distribución de 10 nodos eléctricos.

**Figura 25.** Características de la fuente de alimentación del sistema de 10 nodos eléctricos

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	12660	AC	ABC	>X0002
Frequency	Hz	60			
PhaseAngleA	degrees	0			
StartA	sec	-1			
StopA	sec	100			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source:  Current  Voltage  
 Num phases:  Single  3-phase  3\*1-phase  
 Angle units:  Degrees  Seconds  
 Amplitude:  Peak L-G  RMS L-G  RMS L-L  
 Grounding:  Grounded  Ungrounded  Hide

Del sistema mostrado en la Figura 24 se obtiene una matriz de impedancias que caracterizan el mismo, donde se incluyen las cargas para el análisis de las corrientes de falla, la cual es mostrada en la Figura 26.

**Figura 26.** Zbus general del sistema de distribución de 10 nodos eléctricos

```
Zbus=
[0.0921 + 0.0470i 0.0918 + 0.0468i 0.0915 + 0.0466i 0.0913 + 0.0465i 0.0909 + 0.0462i
0.0908 + 0.0459i 0.0906 + 0.0458i 0.0905 + 0.0457i 0.0904 + 0.0456i 0.0904 + 0.0456i;
0.0918 + 0.0468i 0.5825 + 0.2967i 0.5810 + 0.2959i 0.5797 + 0.2952i 0.5771 + 0.2928i
0.5766 + 0.2910i 0.5752 + 0.2905i 0.5744 + 0.2898i 0.5738 + 0.2893i 0.5738 + 0.2893i;
0.0915 + 0.0466i 0.5810 + 0.2959i 0.9445 + 0.4810i 0.9424 + 0.4798i 0.9382 + 0.4760i
0.9374 + 0.4730i 0.9352 + 0.4722i 0.9338 + 0.4710i 0.9329 + 0.4704i 0.9328 + 0.4703i;
0.0913 + 0.0465i 0.5797 + 0.2952i 0.9424 + 0.4798i 1.3205 + 0.6723i 1.3146 + 0.6669i
1.3134 + 0.6627i 1.3104 + 0.6615i 1.3084 + 0.6600i 1.3071 + 0.6590i 1.3070 + 0.6590i;
0.0909 + 0.0462i 0.5771 + 0.2928i 0.9382 + 0.4760i 1.3146 + 0.6669i 2.1245 + 1.3636i
2.1232 + 1.3563i 2.1182 + 1.3538i 2.1152 + 1.3508i 2.1132 + 1.3489i 2.1130 + 1.3488i;
0.0908 + 0.0459i 0.5766 + 0.2910i 0.9374 + 0.4730i 1.3134 + 0.6627i 2.1232 + 1.3563i
2.3101 + 1.9661i 2.3045 + 1.9624i 2.3015 + 1.9583i 2.2993 + 1.9557i 2.2991 + 1.9556i;
0.0906 + 0.0458i 0.5752 + 0.2905i 0.9352 + 0.4722i 1.3104 + 0.6615i 2.1182 + 1.3538i
2.3045 + 1.9624i 3.0087 + 2.1934i 3.0046 + 2.1887i 3.0017 + 2.1857i 3.0014 + 2.1856i;
0.0905 + 0.0457i 0.5744 + 0.2898i 0.9338 + 0.4710i 1.3084 + 0.6600i 2.1152 + 1.3508i
2.3015 + 1.9583i 3.0046 + 2.1887i 4.0290 + 2.9223i 4.0251 + 2.9183i 4.0247 + 2.9182i;
0.0904 + 0.0456i 0.5738 + 0.2893i 0.9329 + 0.4704i 1.3071 + 0.6590i 2.1132 + 1.3489i
2.2993 + 1.9557i 3.0017 + 2.1857i 4.0251 + 2.9183i 5.0643 + 3.6534i 5.0638 + 3.6532i;
0.0904 + 0.0456i 0.5738 + 0.2893i 0.9328 + 0.4703i 1.3070 + 0.6590i 2.1130 + 1.3488i
2.2991 + 1.9556i 3.0014 + 2.1856i 4.0247 + 2.9182i 5.0638 + 3.6532i 5.2599 + 3.7180i];
```

Para el análisis de las tensiones suministradas por los medidores inteligentes, el sistema general se subdivide en zonas de acuerdo a los resultados obtenidos del

algoritmo de localización relativa de fallas de red, zonas que son delimitadas por los nodos eléctricos donde se instalan los medidores de la siguiente manera:

Zona 1: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 4 (nodos eléctricos 1, 2 y 3).

Zona 2: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 4 y el medidor del nodo 6 (nodos eléctricos 4, 5).

Zona 3: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 6 y el medidor del nodo 9 (nodos eléctricos 6, 7 y 8).

Zona 4: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 9 y el medidor del nodo 10 (nodos eléctricos 9, 10).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y suministrados por los algoritmos de detección de las zonas y las fases en falla se procede a la aplicación del método, haciendo aplicación de cada uno de los tipos de falla en cada una de los nodos eléctricos, pero únicamente ilustrando estos resultados en una de los nodos eléctricos por zona; los resultados completos del estudio de fallas en cada barra son mostrados en el Anexo A.

### **6.1 Simulación de falla trifásica en la zona 1**

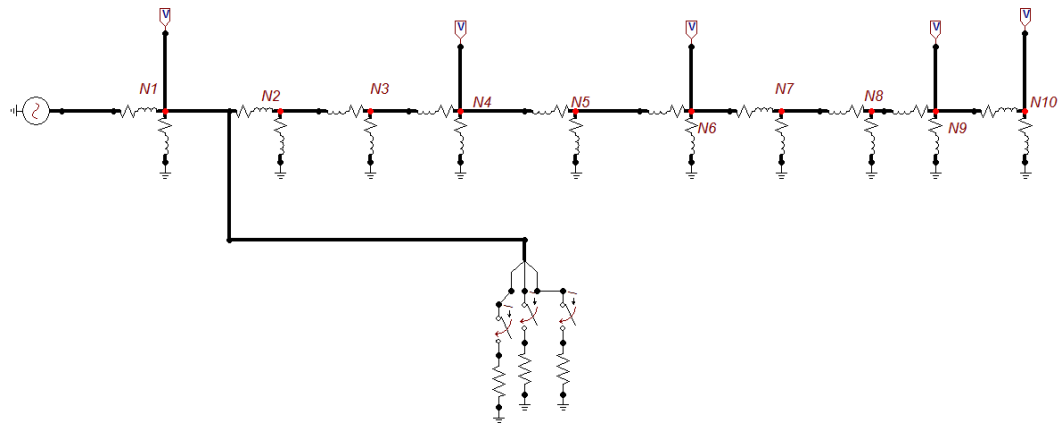
Esta zona comprende los nodos eléctricos entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 4. Para el cálculo de las corrientes de falla  $I_n$  e  $I_p$  es necesario tener en cuenta la magnitud de las impedancias sumadas en serie para los medidores involucrados en la zona:

$Z_{f1} = 0,0922 + j0,047 = 0,103488 \angle 27,010731 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde la fuente hasta el nodo 1

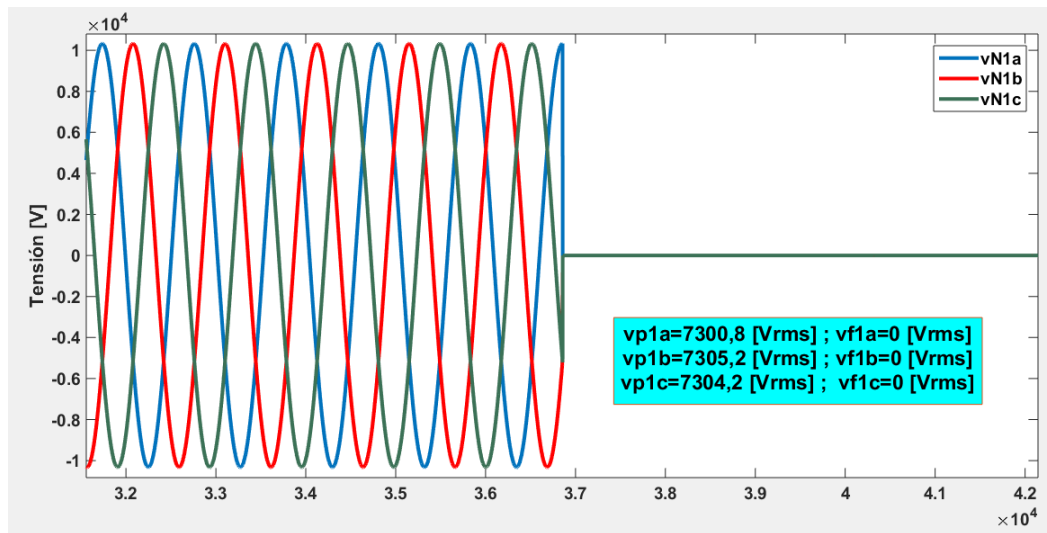
$Z_{14} = 1,2401 + j0,6316 = 1,391677 \angle 26,99037 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 4

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 1 (Anexo A), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica en el nodo 1:

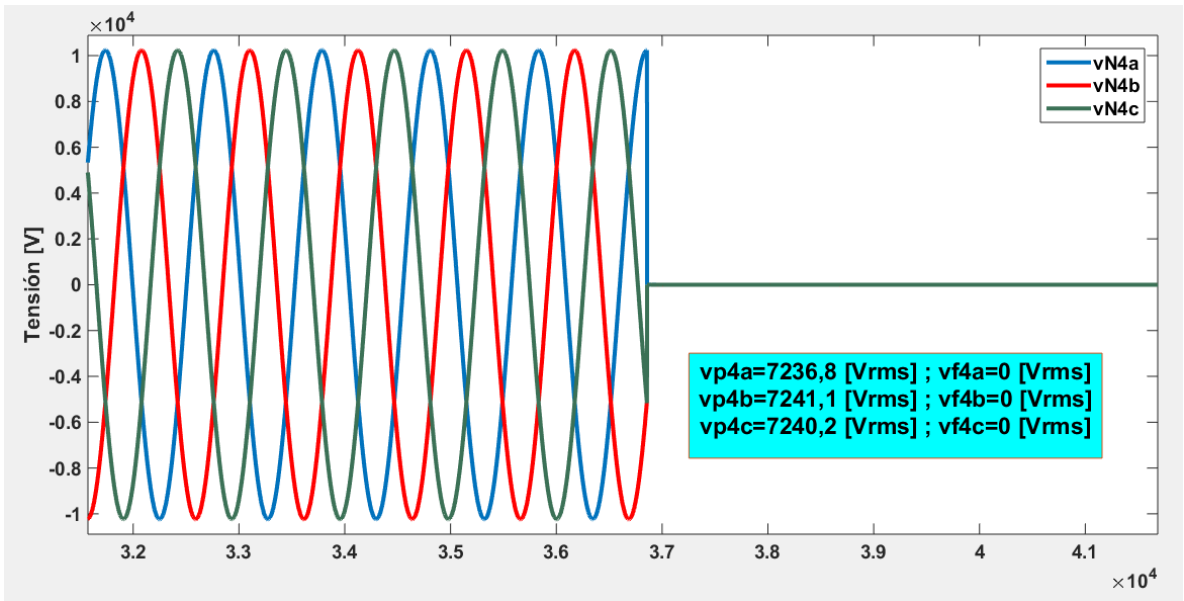
**Figura 27.** Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo 1



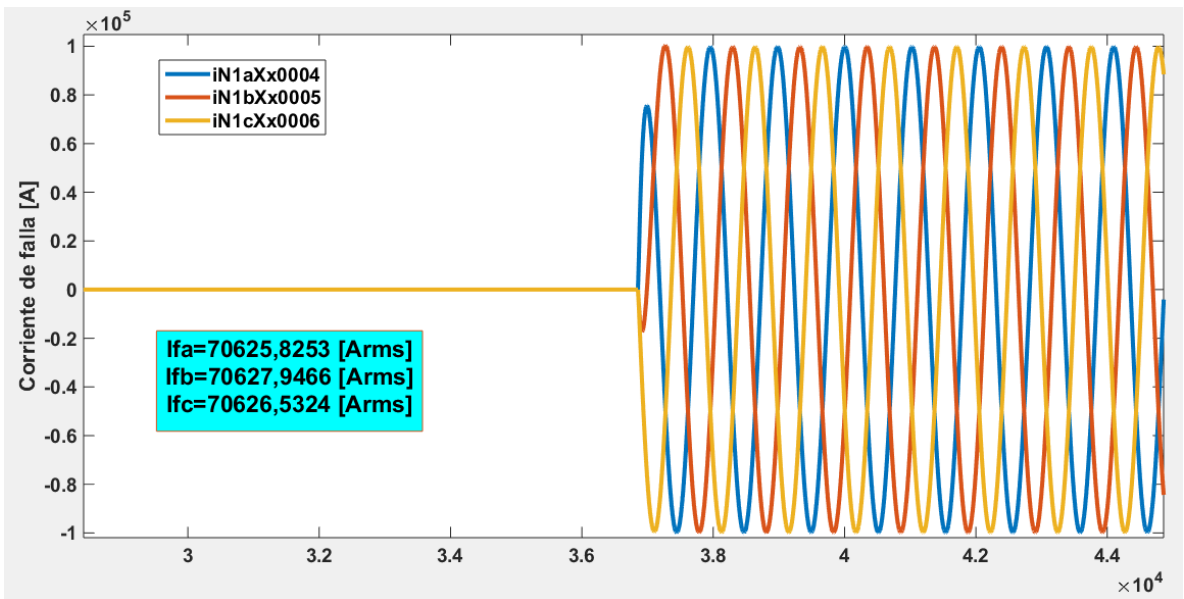
**Figura 28.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es en el nodo 1



**Figura 29.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 1



**Figura 30.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1



Para el análisis de corrientes de falla con el software Matlab se implementa un código que aplique las ecuaciones (6) (7) y (8) presentadas en el capítulo 5

Corrientes de falla estimadas con el medidor del nodo 4:

- $I_{41}$ : Corriente de falla en el nodo eléctrico 1 calculada con los datos del medidor 4.
- $Z_{41}$ : Valor de Impedancia en la matriz zbus
- $\Delta V_4$ : Dato de Tensión del medidor 4

$$\begin{pmatrix} I_{41}^{(a)} \\ I_{41}^{(b)} \\ I_{41}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{41} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{41} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{41} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_4^{(a)} \\ \Delta V_4^{(b)} \\ \Delta V_4^{(c)} \end{pmatrix} ;$$

$$\begin{pmatrix} I_{42}^{(a)} \\ I_{42}^{(b)} \\ I_{42}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{42} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{42} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{42} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_4^{(a)} \\ \Delta V_4^{(b)} \\ \Delta V_4^{(c)} \end{pmatrix} ;$$

$$\begin{pmatrix} I_{43}^{(a)} \\ I_{43}^{(b)} \\ I_{43}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{43} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{43} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{43} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_4^{(a)} \\ \Delta V_4^{(b)} \\ \Delta V_4^{(c)} \end{pmatrix}$$

Corrientes de falla halladas con el medidor del nodo 1:

$$\begin{pmatrix} I_{14}^{(a)} \\ I_{14}^{(b)} \\ I_{14}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{14} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{14} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{14} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_1^{(a)} \\ \Delta V_1^{(b)} \\ \Delta V_1^{(c)} \end{pmatrix} ;$$

$$\begin{pmatrix} I_{12}^{(a)} \\ I_{12}^{(b)} \\ I_{12}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{12} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{12} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{12} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_1^{(a)} \\ \Delta V_1^{(b)} \\ \Delta V_1^{(c)} \end{pmatrix} ;$$

$$\begin{pmatrix} I_{13}^{(a)} \\ I_{13}^{(b)} \\ I_{13}^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{13} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{13} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{13} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta V_1^{(a)} \\ \Delta V_1^{(b)} \\ \Delta V_1^{(c)} \end{pmatrix}$$

Corrientes de referencia:

Para el cálculo de las corrientes de referencia  $I_n$  e  $I_p$  se usan las ecuaciones (9) y (10)

$$I_1 = \left| \frac{|V_1| - |V_f|}{Z_{f1}} \right|; \quad I_4 = \left| \frac{|V_4| - |V_f|}{Z_{14}} \right| [A_{rms}]$$

Cálculo de deltas para la determinación del nodo en fallas usando las ecuaciones (11) (12) y (13) presentadas en el capítulo 5.

$$\delta_1 = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{41}^{fase} - I_1^{fase}|}{\max(I_{41}^{fase}; I_1^{fase})} * 100 \right); \quad \delta_2 = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{12}^{fase} - I_{42}^{fase}|}{\max(I_{12}^{fase}; I_{42}^{fase})} * 100 \right)$$

$$\delta_3 = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{13}^{fase} - I_{43}^{fase}|}{\max(I_{13}^{fase}; I_{43}^{fase})} * 100 \right); \quad \delta_4 = \sum_{fase}^{a,b,c} \left( \frac{|I_{14}^{fase} - I_4^{fase}|}{\max(I_{14}^{fase}; I_4^{fase})} * 100 \right)$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1 y 4 ( $V_1$  y  $V_4$ ) y la tensión en la fuente ( $V_f$ ) y con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 2.** Resultados falla trifásica en el nodo 1

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>4</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>4</sub>
A	7309,25441	0	0	70629,00441	0
B	7309,25441	0	0	70629,00441	0
C	7309,25441	0	0	70629,00441	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>41</sub>	I <sub>12</sub>	I <sub>42</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>43</sub>	I <sub>14</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	δ <sub>4</sub>
A	70630	70853	11124	71100	6843,2	71255	0,00140959	84,2998885	90,3752461	100
B	70673	70896	11131	71143	6847,3	71298	0,06225234	84,2995374	90,3753005	100
C	70663	70896	11131	71143	6846,4	71298	0,04810947	84,2995374	90,3765655	100
Resultado suma deltas							0,1117714	252,898963	271,127112	300

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 1, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra.

## 6.2 Simulación de falla monofásica en la zona 2

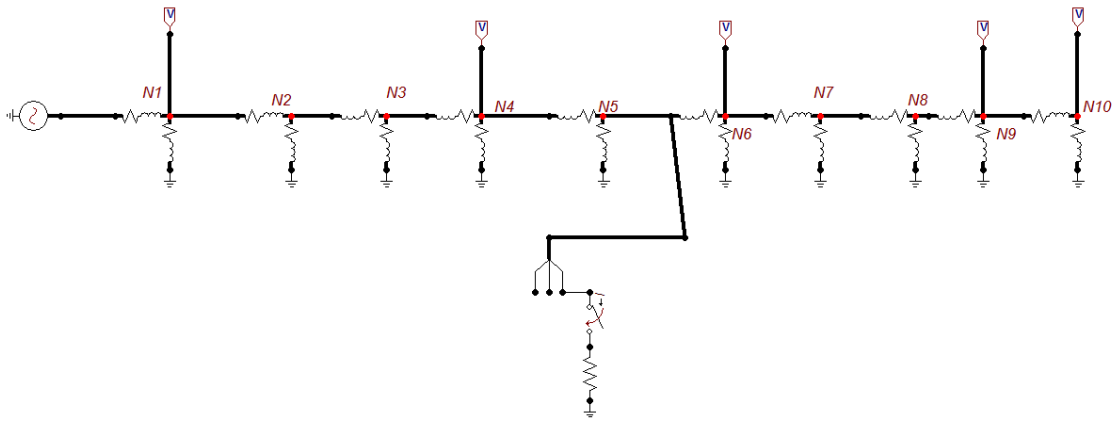
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 4 y el medidor del nodo 6

$Z_{46} = 1,0062 + j1,3258 = 1,664386 \angle 52,803755 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde el nodo 4 hasta el nodo 6

$Z_{14} = 1,2401 + j0,6316 = 1,391677 \angle 26,99037 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 4

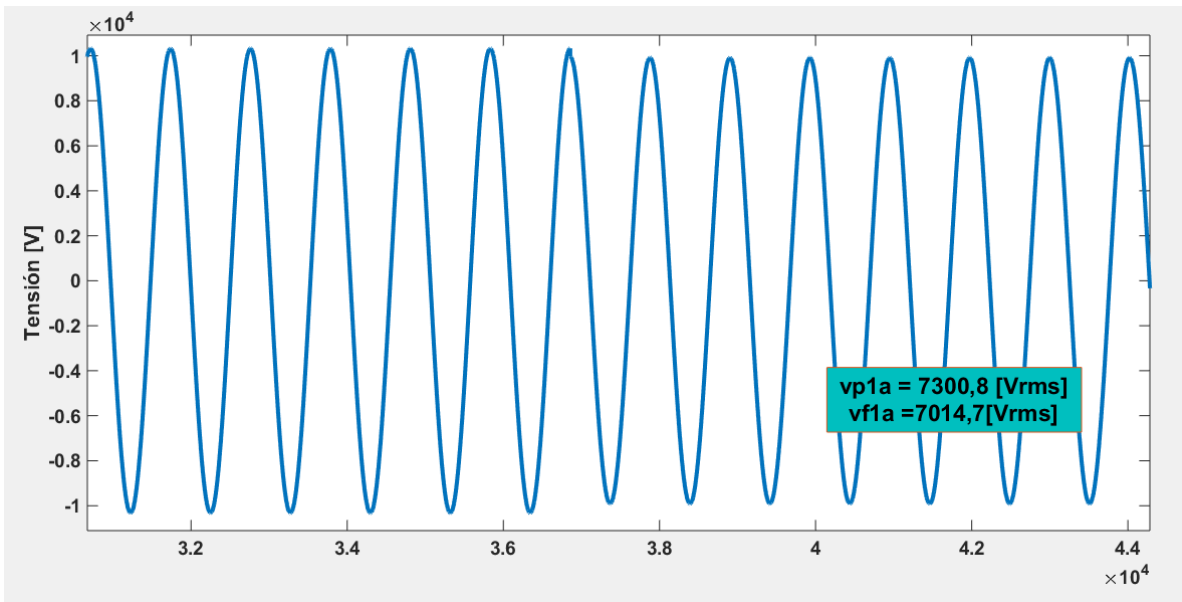
Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la fase 2(Anexo A), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla monofásica en el nodo 5:

**Figura 31.** Sistema de 10 nodos eléctricos con falla monofásica en el nodo 5

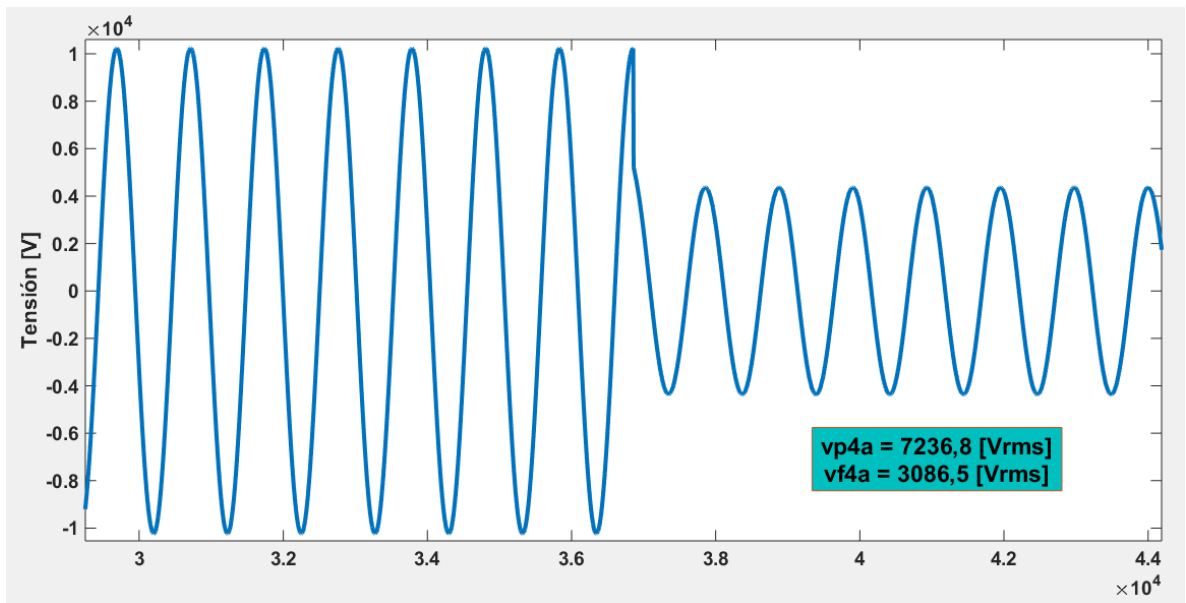


Partiendo de los resultados obtenidos por los algoritmos de referencia se hace el análisis de la falla para este caso solo en la fase donde ocurre, en este caso la fase A.

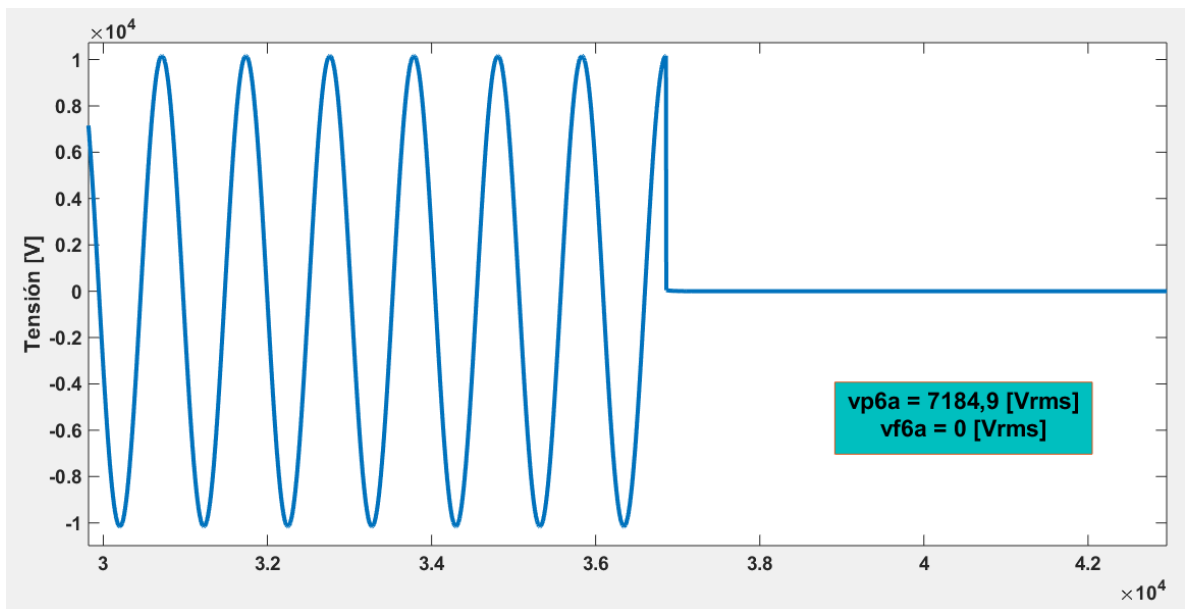
**Figura 332.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es en el nodo 5.



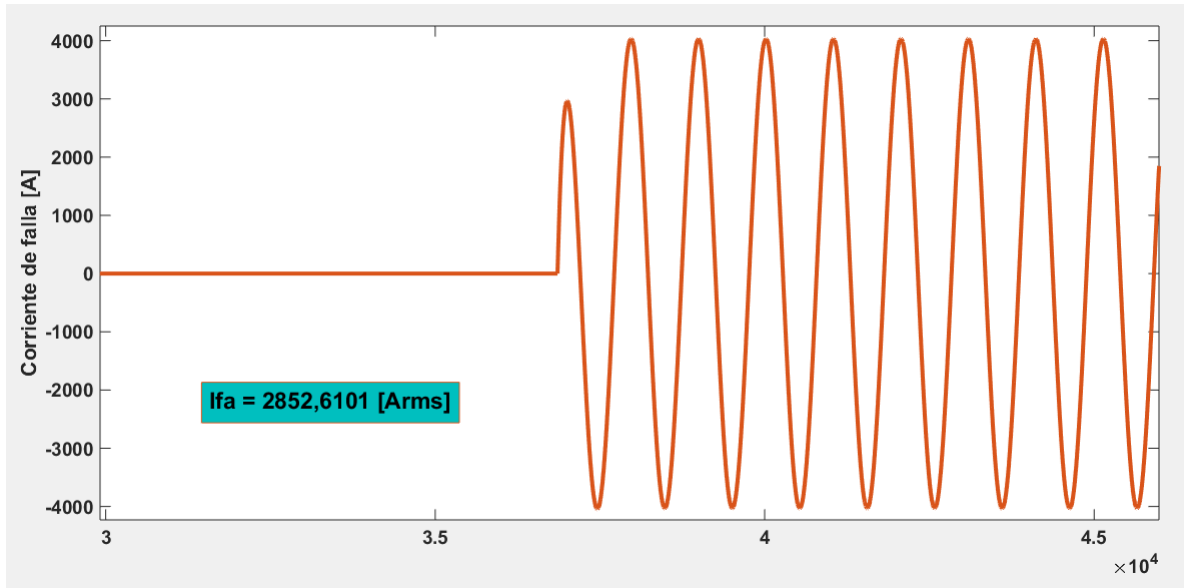
**Figura 33.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 5.



**Figura 34.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es en el nodo 5.



**Figura 35.** Corriente de falla monofásica en el nodo 5



En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1, 4 y 6 ( $V_1$ ,  $V_4$  y  $V_6$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia para la fase A.

**Tabla 3.** Resultados falla monofásica en el nodo 5

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	7013,79216	3086,5211	0	2822,12637	1854,54612

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	2815,5	2851,8	2821,2	42,2157216	1,27288029	34,2639262

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 5, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra.

### 6.3 Simulación de falla línea – línea en la zona 3

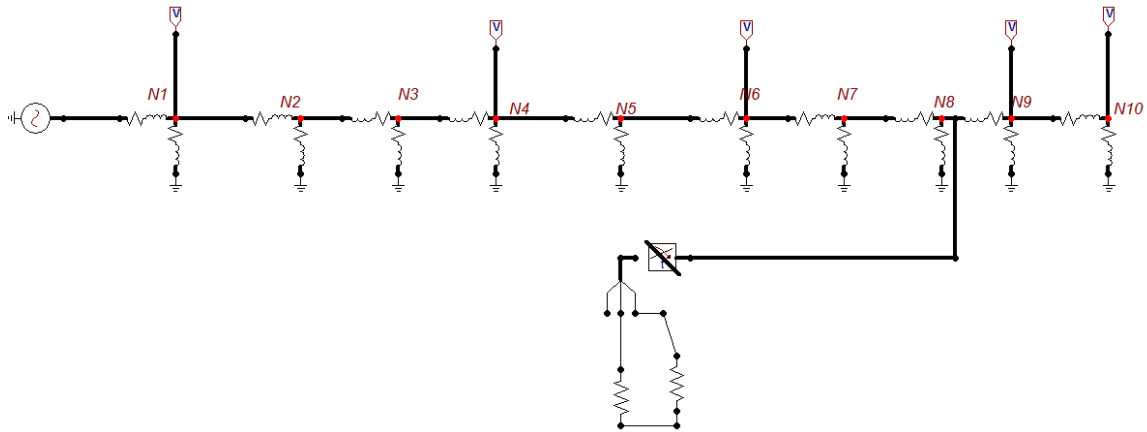
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 6 y el medidor del nodo 9

$Z_{46} = 1,0062 + j1,3258 = 1,664386 \angle 52,803755 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde el nodo 4 hasta el nodo 6

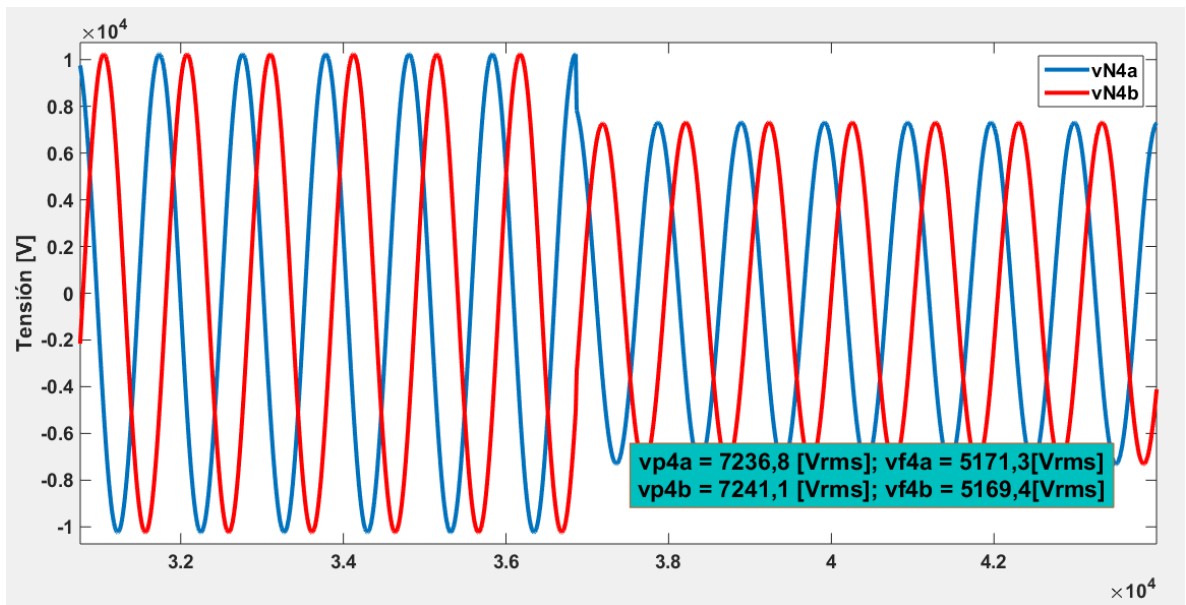
$Z_{69} = 2,7854 + j1,7151 = 3,271088 \angle 31,62253 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 6 hasta el nodo 9

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 3(Anexo A), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica en el nodo 8:

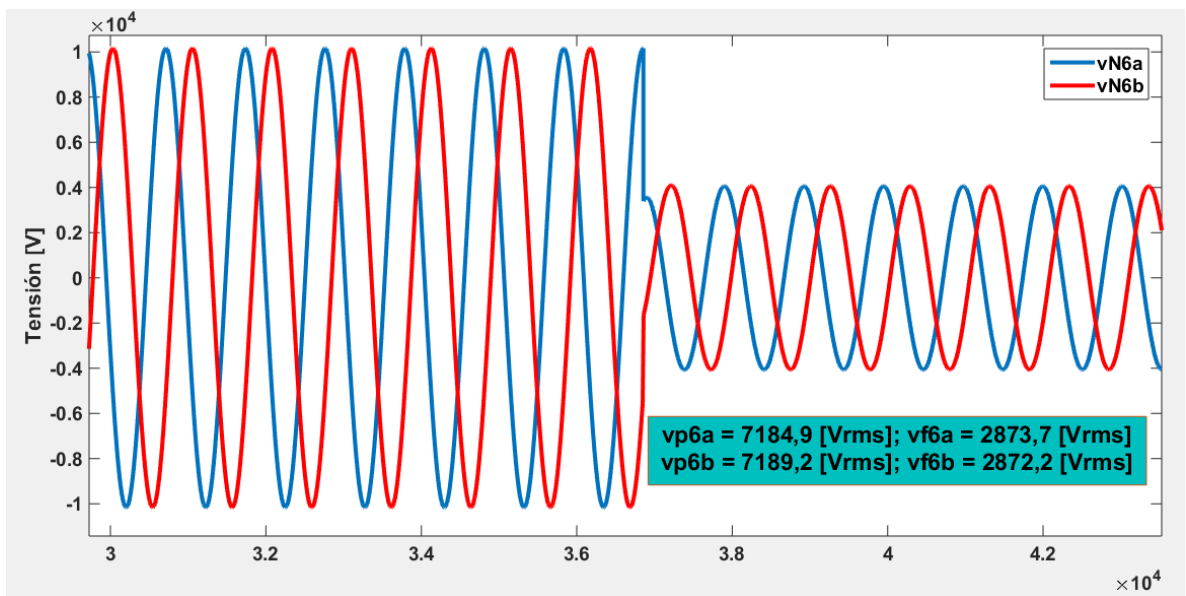
**Figura 36.** Sistema de 10 nodos eléctricos con falla bifásica en el nodo 8



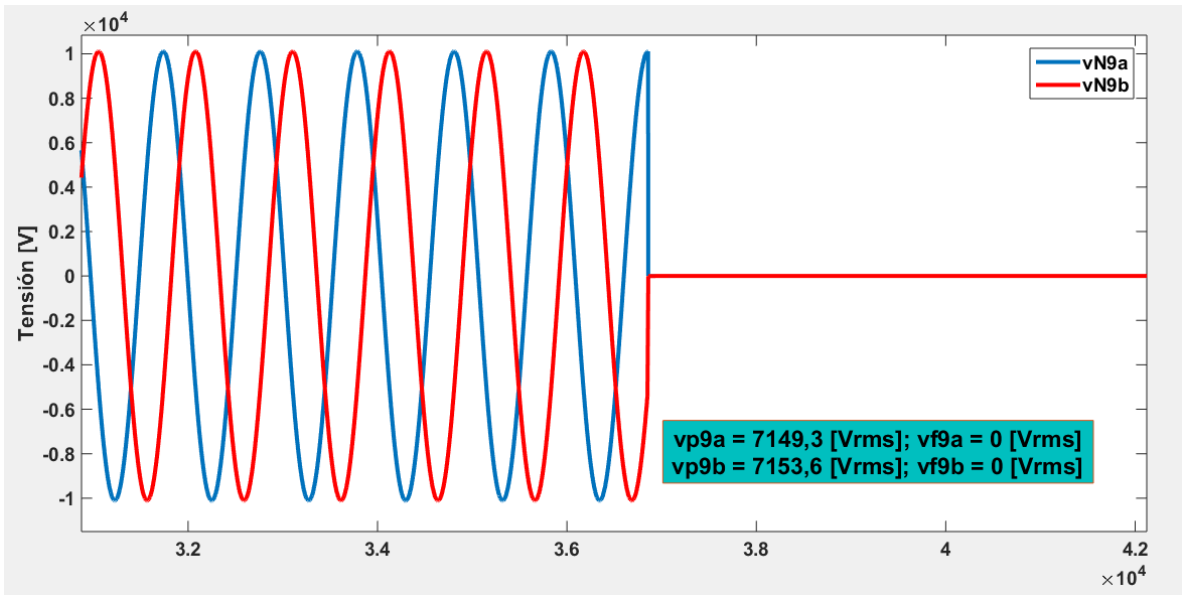
**Figura 37.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es en el nodo 8.



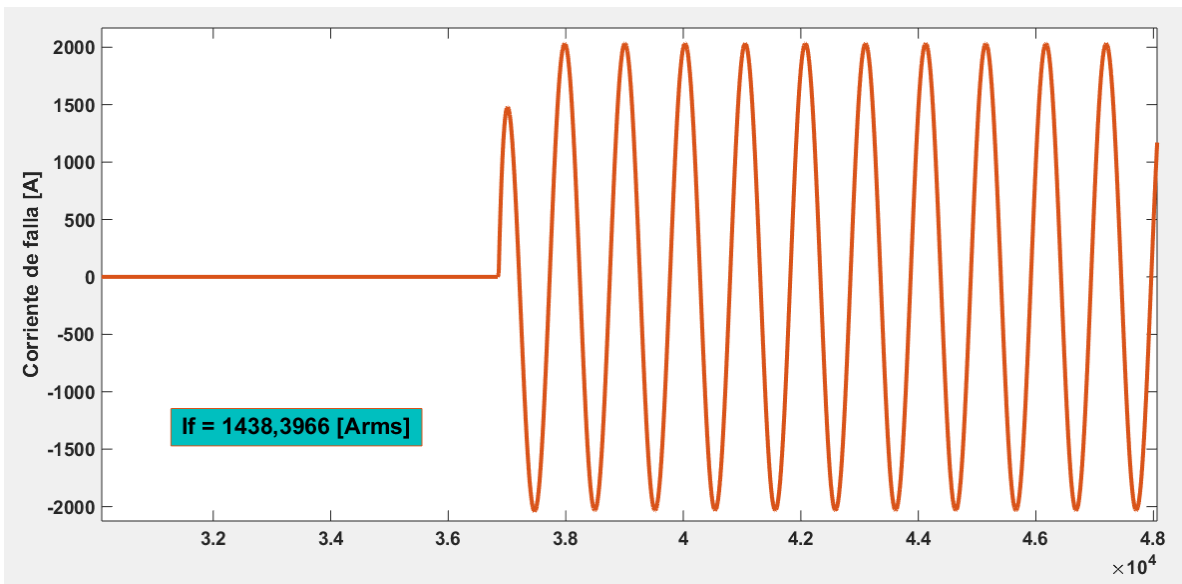
**Figura 38.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es en el nodo 8



**Figura 39.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es en el nodo 8



**Figura 40.** Corriente de falla bifásica en el nodo 8



En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 4, 6 y 9 ( $V_4$ ,  $V_6$  y  $V_9$ ) con los cuales se hace la

simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia para las fases A y B.

**Tabla 4.** Resultados falla bifásica en el nodo 8

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	5171,07189	2873,18698	0	1380,69153	878,381836
B	5171,07189	2873,18698	0	1380,69153	878,381836

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1424,3	1925,4	1426,6	1438	1428,2	41,7060787	26,0257609	0,79276773	38,4972808
B	2369,9	1426,2	1926,6	1428,6	1438,9	1430,2	41,7405154	25,9732171	0,71582459	38,5832866
<b>Resultado suma deltas</b>							83,4465941	51,9989779	1,50859232	77,0805674

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 8, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra.

#### 6.4 Simulación de falla trifásica en la zona 4

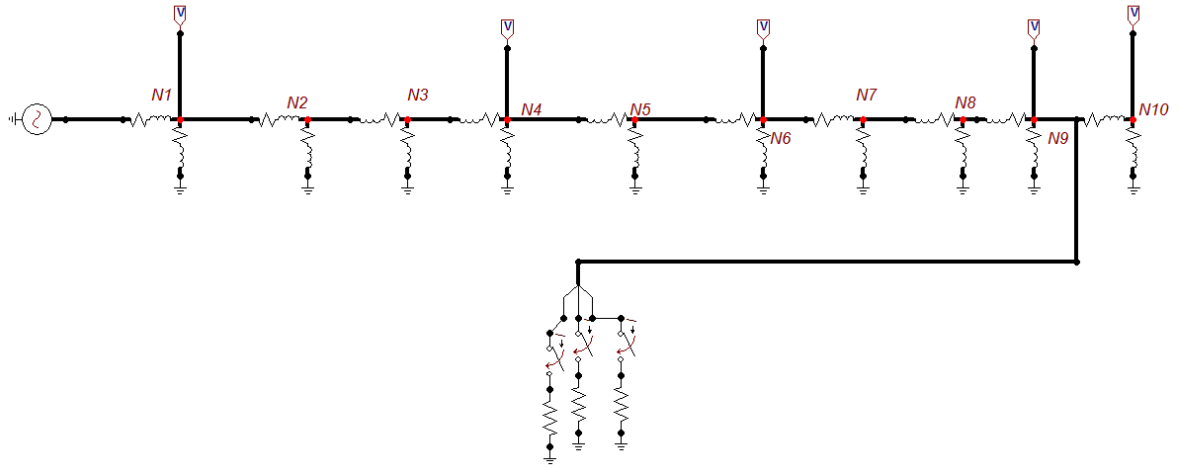
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 9 y el medidor del nodo 10

$Z_{69} = 2,7854 + j1,7151 = 3,271088 \angle 31.62253 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 6 hasta el nodo 9

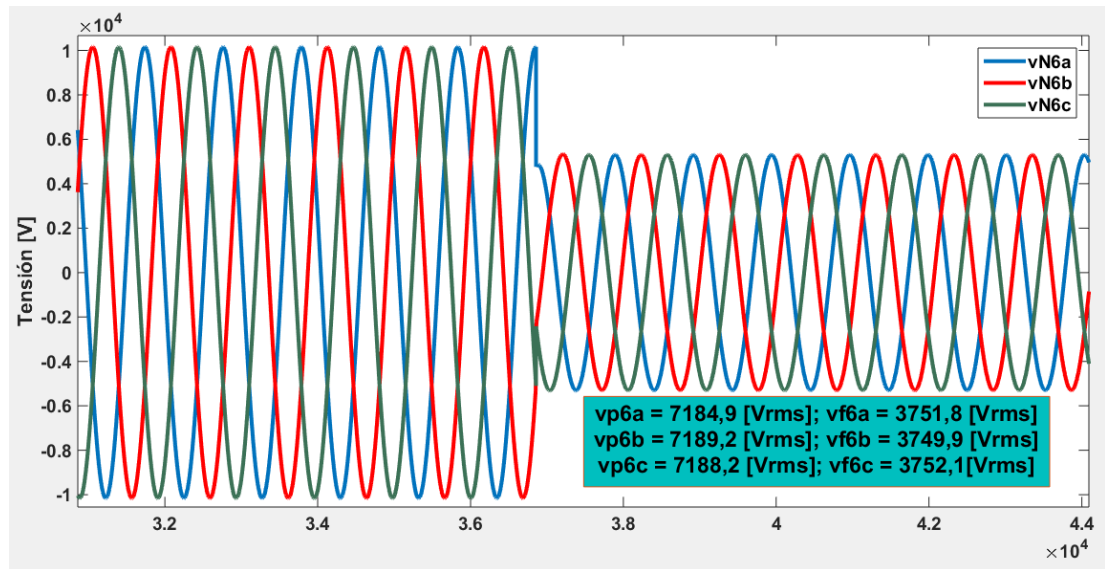
$Z_{910} = 0,1966 + j0,065 = 0,207066 \angle 18,29494 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde el nodo 9 hasta el nodo 10

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 4(Anexo A), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica a tierra en el nodo 9:

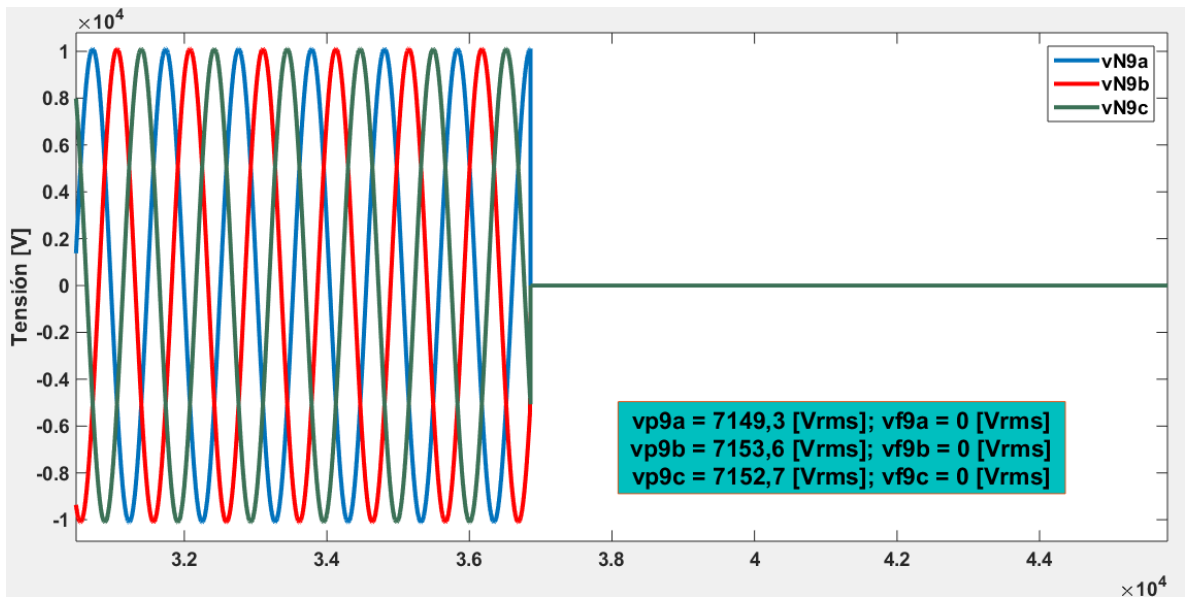
**Figura 41.** Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica el nodo 9



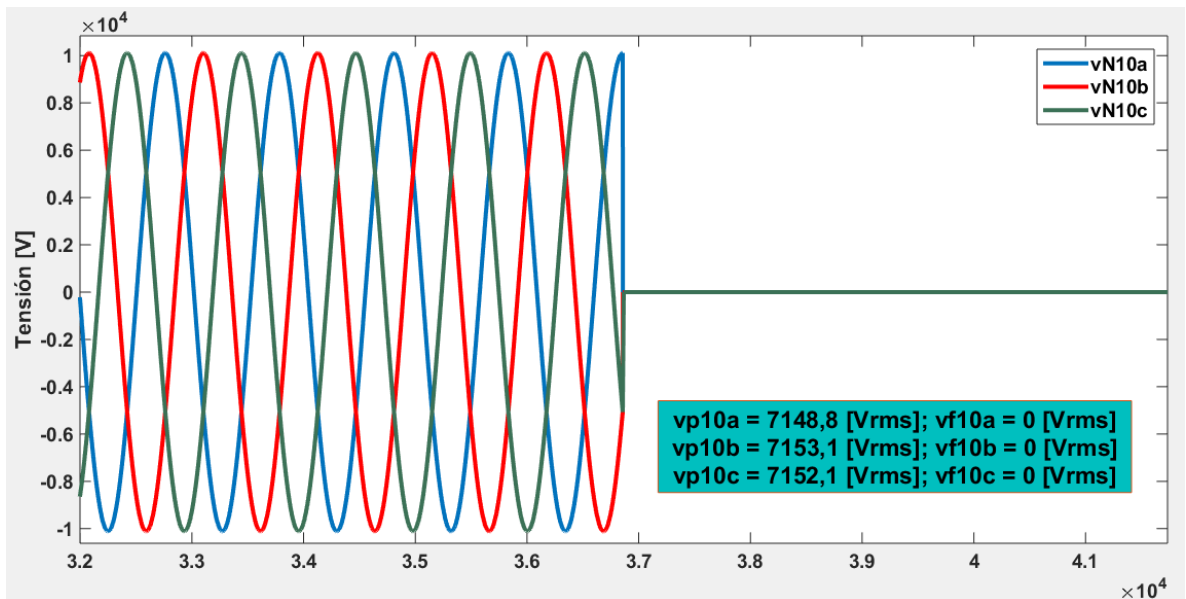
**Figura 42.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 9.



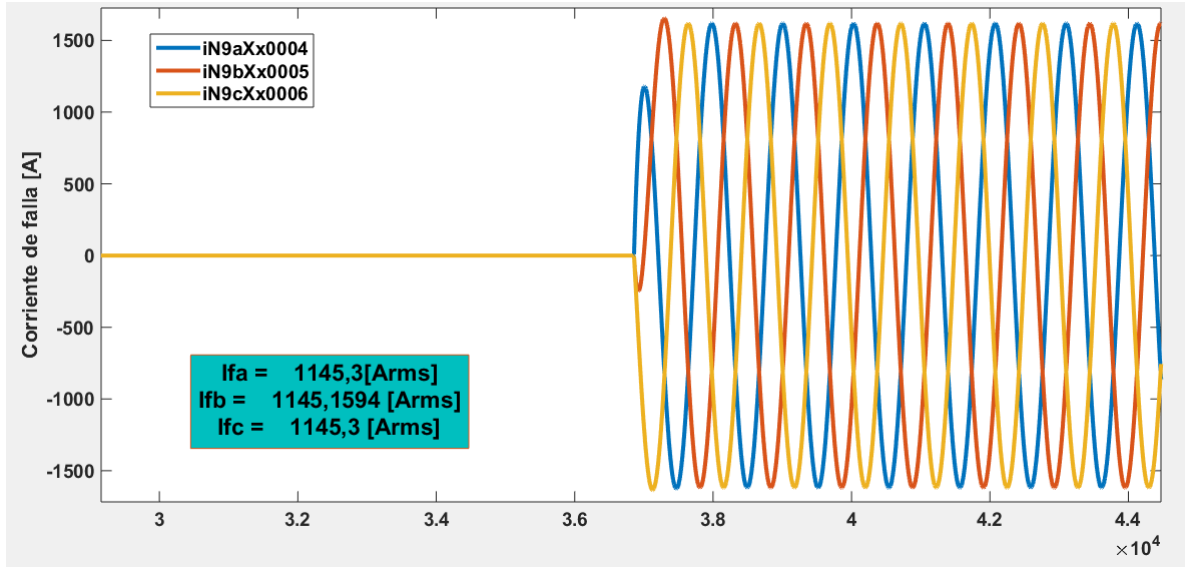
**Figura 43.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 9.



**Figura 44.** Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es trifásica en el nodo 9.



**Figura 45.** Corriente de falla trifásica en el nodo 9



En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 6, 9 y 10 ( $V_6$ ,  $V_9$  y  $V_{10}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 5.** Resultados falla trifásica en el nodo 9

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3751,20147	0	0	1146,805709	0
B	3751,27218	0	0	1146,827326	0
C	3751,27218	0	0	1146,827326	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1145	0,1661754	100
B	1145,6	1145,7	0,10701929	100
C	1145,4	1145,5	0,12445871	100
Resultado suma deltas			0,3976534	300

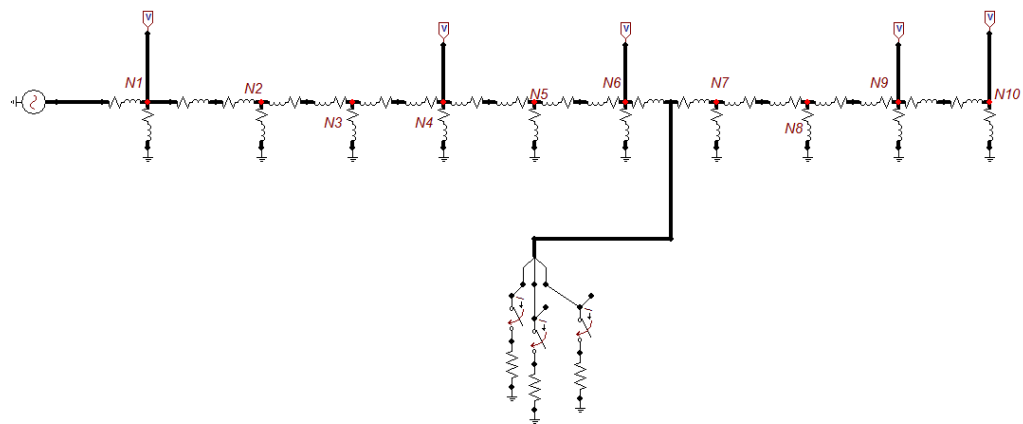
De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 9, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

### 6.5 Falla trifásica entre líneas

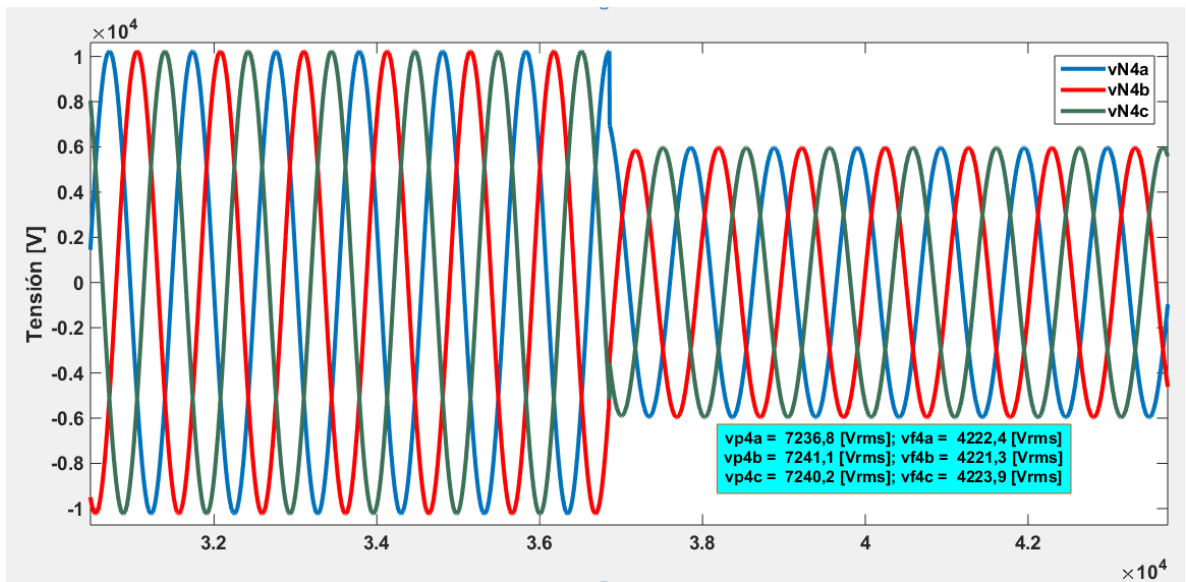
Como la mayoría de las fallas no ocurre en los nodos eléctricos directamente, sino que es posible que estas sean entre dos nodos eléctricos, el método funciona con la misma efectividad para la localización de falla cuando esta ocurre, por ejemplo, entre los nodos eléctricos 1 y 2. Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en cada una de las zonas (Anexo A), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica en los nodos eléctricos 6 y 7:

#### Falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7

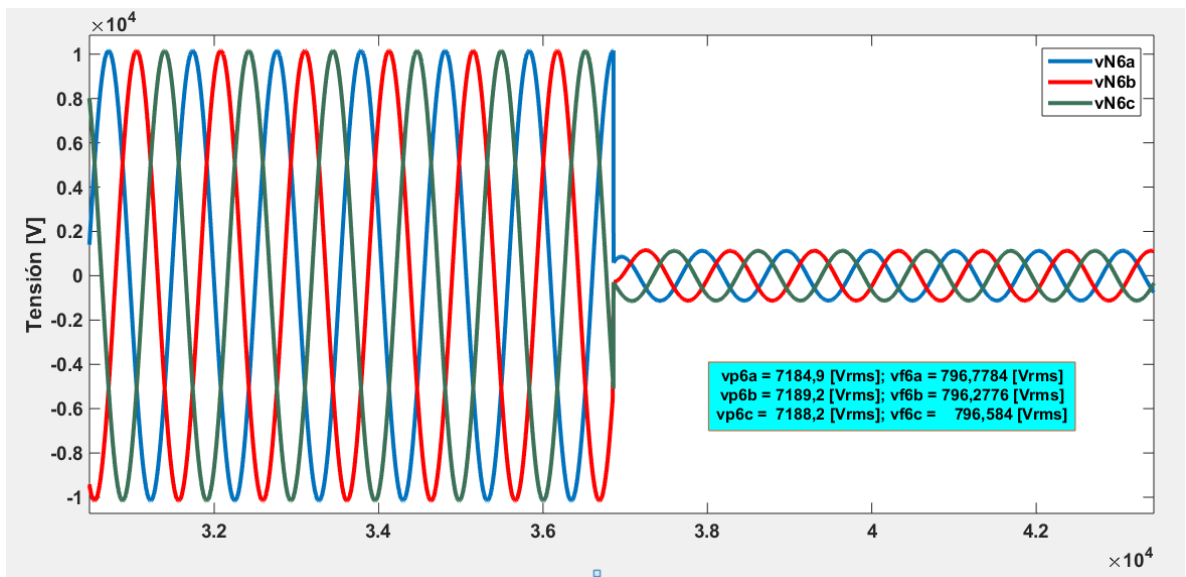
**Figura 46.** Sistema de 10 nodos eléctricos con falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7



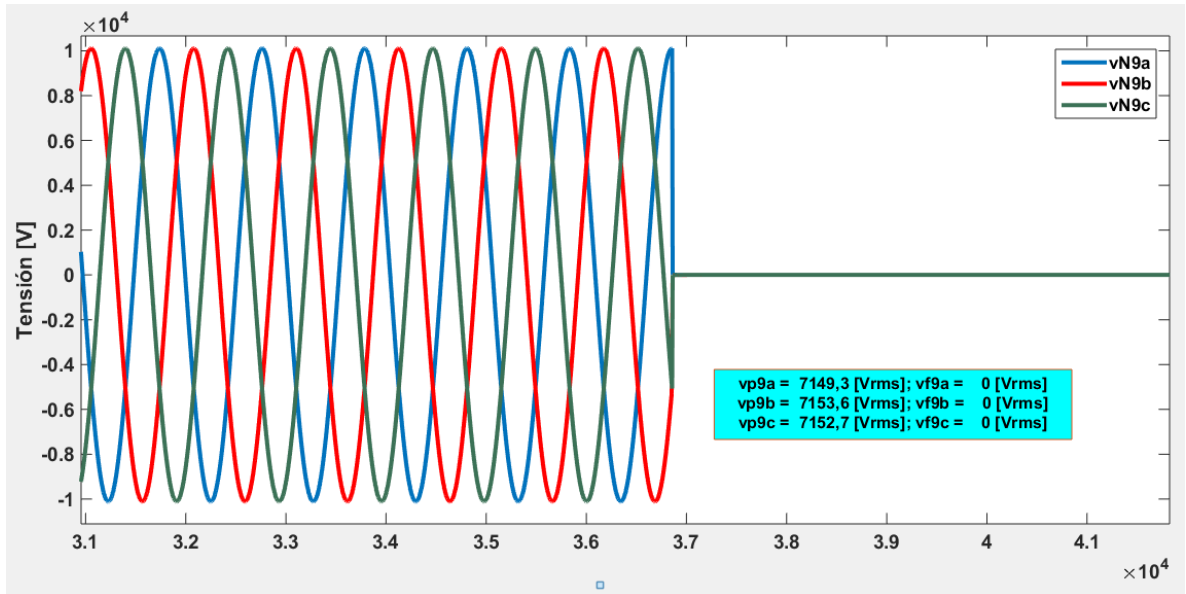
**Figura 47.** Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7



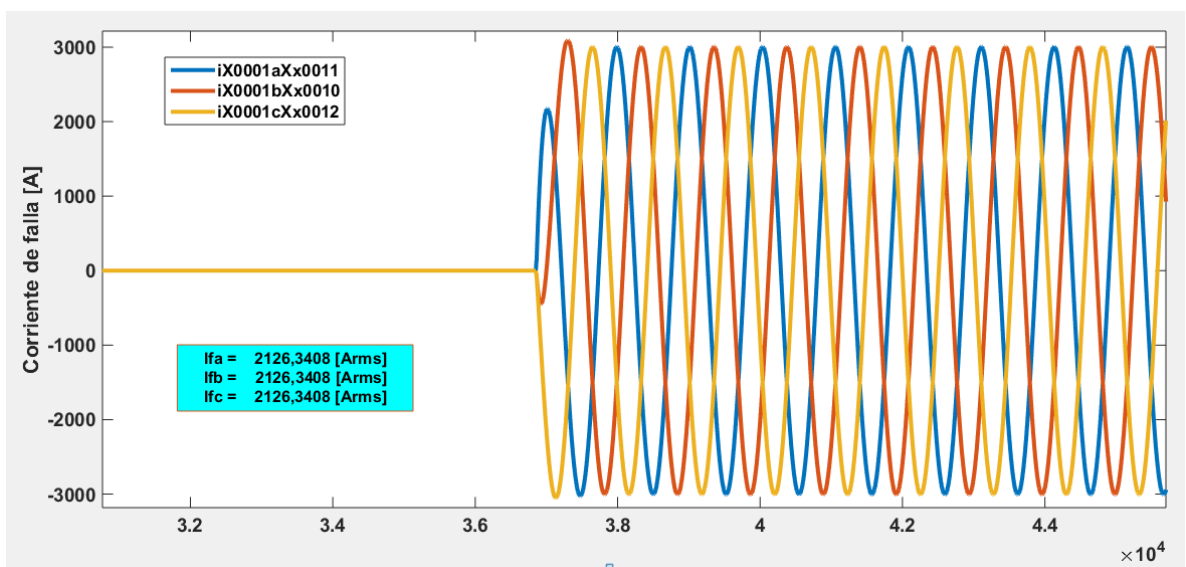
**Figura 48.** Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7



**Figura 49.** Gráficas de tensión suministradas por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es entre los nodos eléctricos 6 y 7



**Figura 50.** Corriente de falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7



En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 6, 9 y 10 ( $V_6$ ,  $V_9$  y  $V_{10}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 6.** Resultados falla trifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	4222,48814	796,555789	0	2058,48246	243,520571
B	4222,48814	796,555789	0	2058,48246	243,520571
C	4222,41743	796,555789	0	2058,43997	243,520571

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2110,5	1925,4	2113,9	1438	2116,3	13,0891932	8,77043355	31,9740764	88,4930978
B	2369,9	2112,1	1926,6	2115,5	1438,9	2117,9	13,1405351	8,78272809	31,9829827	88,5017909
C	2369,6	2111,7	1926,3	2115,1	1438,7	2117,5	13,1313314	8,7796562	31,9795754	88,4996188
Resultado suma deltas							39,3610598	26,3328178	95,9366345	265,494507

En este caso particular, es decir, en cada caso de falla entre líneas los dos valores más pequeños de los deltas dan a entender que la falla está localizada entre estos dos nodos eléctricos, para este ejemplo se demuestra que la falla se presentó entre los nodos eléctricos 6 y 7, lo que corrobora el rendimiento del método aún si la ésta ocurriera entre líneas y no en los nodos eléctricos.

En la Tabla 7 se ven reflejados los resultados de cada una de las simulaciones hechas a cada barra y el fondo en color verde significa que para el tipo de falla indicado en la primera columna cumple con el objetivo de la identificación de la falla, por el contrario, el fondo de color rojo significa que para esa barra y ese tipo de falla no es posible identificar la falla.

**Tabla 7.** Resultados generales de rendimiento del método para el sistema de 10 nodos eléctricos escogido

TIPO DE FALLA	BARRA										EFECTIVIDAD %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Trifásica											100
Monofásica											100
Línea - Línea											80
Línea - Línea a tierra											100
GENERAL											95

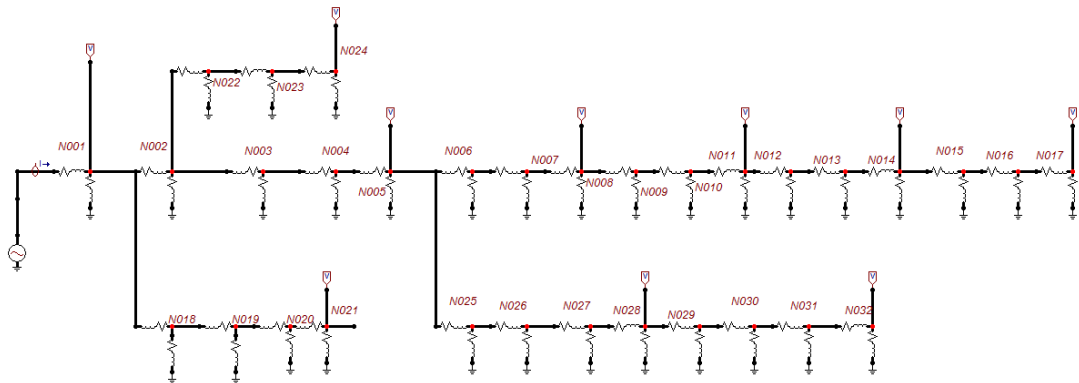
Falla trifásica entre líneas	1 -- 2	2 -- 3	3 -- 4	4 -- 5	5 -- 6	6 -- 7	7 -- 8	8 -- 9	9 -- 10	EFECTIVIDAD %
										88,88888889

De acuerdo a los resultados obtenidos por el método propuesto y el método de referencia, es posible determinar que el nuevo método propuesto presenta una efectividad más alta a la hora de identificación de la falla con un porcentaje aproximado del 90%, mientras que el método base o de referencia, presenta una efectividad inferior al 60 %, lo que conlleva a una diferencia considerable a la hora de la confiabilidad en el mismo.

## 7. IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN UN SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS

Para la aplicación del método se usó un sistema real de distribución conformado por 32 nodos eléctricos (Figura 51), y al cual se le realizaron la misma cantidad de pruebas por barra que al sistema de prueba, es decir, se simularon los mismos tipos de falla; para este sistema se ubicaron medidores inteligentes en los nodos eléctricos 1, 5, 8, 11, 14, 17, 21, 24, 28 y 32 a partir de los cuales es posible calcular las corrientes de falla de acuerdo a las tensiones que estos suministran.

**Figura 51.** Sistema real de 32 nodos eléctricos escogido para la aplicación del método.



De igual manera que para el sistema de 10 nodos eléctricos, este modelo de sistema cuenta con una fuente de alimentación conectada en serie con una impedancia antes la primera barra, lo que hace referencia a un equivalente de otro sistema interconectado con este.

**Figura 52.** Características de la fuente de alimentación del sistema de 32 nodos eléctricos

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Volt	10336.84671	AC3	ABC	N10
f	Hz	60			
pha	Deg/Rad	0			
A1		0			
Tstart	s	-1			
Tstop	s	1000			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source  
 Current  Voltage  Hide

Del sistema mostrado en la Figura 39 se obtiene una matriz de impedancias que caracterizan el mismo, donde se incluyen las cargas para el análisis de las corrientes de falla:

**Figura 53.** Zbus general del sistema de 32 nodos eléctricos

```

zbus=[0.0919 + 0.0469i  0.0905 + 0.0463i  0.0897 + 0.0461i  0.0889 + 0.0458i  0.0872 + 0.0447i
0.0871 + 0.0442i  0.0866 + 0.0440i  0.0860 + 0.0436i  0.0855 + 0.0432i  0.0854 + 0.0432i  0.0853 +
0.0432i  0.0848 + 0.0427i  0.0846 + 0.0425i  0.0845 + 0.0424i  0.0844 + 0.0423i  0.0843 + 0.0420i
0.0842 + 0.0420i  0.0919 + 0.0468i  0.0916 + 0.0466i  0.0915 + 0.0465i  0.0915 + 0.0464i  0.0902 +
0.0461i  0.0896 + 0.0456i  0.0893 + 0.0454i  0.0870 + 0.0447i  0.0867 + 0.0447i  0.0855 + 0.0442i
0.0846 + 0.0439i  0.0841 + 0.0439i  0.0838 + 0.0436i  0.0837 + 0.0435i  0.0837 + 0.0434i;
0.0905 + 0.0463i  0.5744 + 0.2939i  0.5695 + 0.2923i  0.5645 + 0.2907i  0.5537 + 0.2839i  0.5527 +
0.2805i  0.5496 + 0.2794i  0.5462 + 0.2767i  0.5430 + 0.2743i  0.5424 + 0.2742i  0.5414 + 0.2738i
0.5382 + 0.2710i  0.5372 + 0.2696i  0.5365 + 0.2688i  0.5358 + 0.2681i  0.5349 + 0.2668i  0.5346 +
0.2665i  0.0904 + 0.0463i  0.0902 + 0.0460i  0.0901 + 0.0459i  0.0901 + 0.0459i  0.5725 + 0.2925i
0.5690 + 0.2896i  0.5673 + 0.2882i  0.5522 + 0.2837i  0.5503 + 0.2835i  0.5427 + 0.2806i  0.5371 +
0.2787i  0.5343 + 0.2786i  0.5321 + 0.2764i  0.5316 + 0.2758i  0.5315 + 0.2757i;
0.0897 + 0.0461i  0.5695 + 0.2923i  0.9274 + 0.4760i  0.9194 + 0.4734i  0.9016 + 0.4624i  0.9001 +
0.4568i  0.8950 + 0.4550i  0.8895 + 0.4507i  0.8842 + 0.4468i  0.8833 + 0.4465i  0.8817 + 0.4459i
0.8764 + 0.4414i  0.8748 + 0.4390i  0.8737 + 0.4377i  0.8726 + 0.4367i  0.8712 + 0.4345i  0.8706 +
0.4340i  0.0897 + 0.0460i  0.0894 + 0.0458i  0.0893 + 0.0457i  0.0893 + 0.0456i  0.5675 + 0.2909i
0.5641 + 0.2880i  0.5624 + 0.2866i

```

En la Figura 53 se presenta una parte de la zbus general del sistema de 32 nodos eléctricos, los datos completos pueden ser consultados en el Anexo B.

Partiendo que se utilizan los algoritmos de identificación de zonas y tipo de falla y fase en la que ésta ocurre el análisis de las tensiones suministradas por los medidores inteligentes es subdividido en zonas delimitadas por los nodos eléctricos donde se encuentra medidor de la siguiente manera:

Zona 1: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 5 (nodos eléctricos 1, 2, 3 y 4).

Zona 2: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 21 (nodos eléctricos 1, 18, 19, 20, 21).

Zona 3: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 24 (nodos eléctricos 1, 2, 22, 23, 24).

Zona 4: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 5 y el medidor del nodo 8 (nodos eléctricos 5, 6, 7).

Zona 5: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 5 y el medidor del nodo 28 (nodos eléctricos 5, 25, 26, 27).

Zona 6: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 8 y el medidor del nodo 11 (nodos eléctricos 8, 9, 10).

Zona 7: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 11 y el medidor del nodo 14 (nodos eléctricos 11, 12, 13).

Zona 8: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 14 y el medidor del nodo 17 (nodos eléctricos 14, 15, 16, 17).

Zona 9: nodos eléctricos comprendidas entre el medidor del nodo 28 y el medidor del nodo 32 (nodos eléctricos 28, 29, 30, 31, 32).

En este caso, para la configuración que tiene el sistema es posible determinar las corrientes de falla en el nodo 1 mediante las tensiones suministradas por los medidores ubicados en los nodos 5, 21 y 24 como se muestra, cada uno de ellos ubicado en una zona diferente:

## 7.1 Simulación de falla trifásica en la zona 1

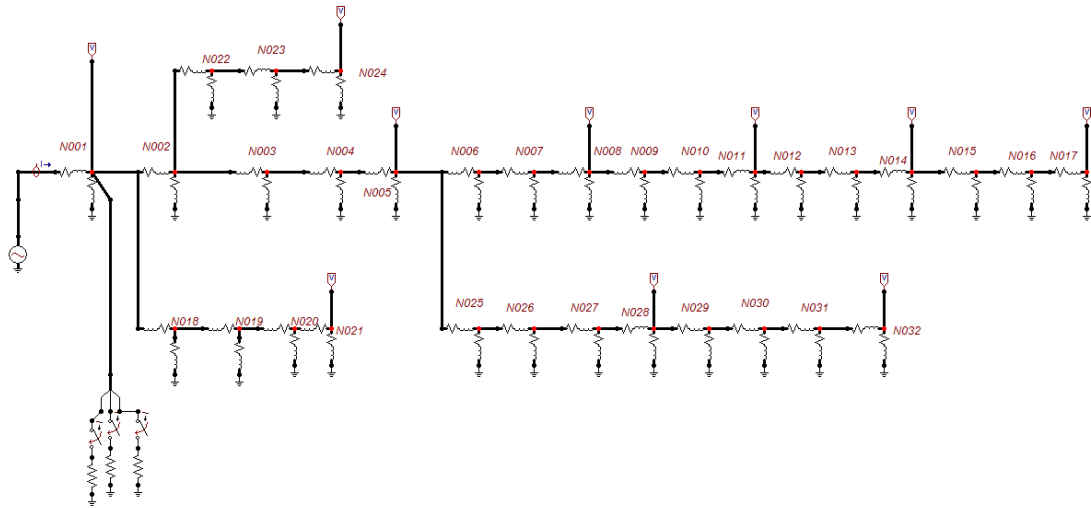
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 5.

$Z_{f1} = 0,0922 + j0,047 = 0,103480 \angle 27,011030 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde la fuente hasta el nodo 1

$Z_{15} = 2,0591 + j1,3386 = 2,45596 \angle 33,02748 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 5

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 1 (Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica en el nodo 1:

**Figura 554.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla trifásica en el nodo 1



En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1 y 5 ( $V_1$  y  $V_5$ ) y la fuente ( $V_f$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 8.** Resultados falla trifásica en el nodo1 con el medidor en 5.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>5</sub>
A	5967,98123	0	0	57668,3406	0
B	5967,98123	0	0	57668,3406	0
C	5967,98123	0	0	57668,3406	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>s1</sub>	I <sub>s2</sub>	I <sub>s2</sub>	I <sub>s3</sub>	I <sub>s3</sub>	I <sub>s4</sub>	I <sub>s4</sub>	I <sub>s5</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	δ <sub>4</sub>	δ <sub>5</sub>
A	70626	71655	11122	72225	6830	72838	4870,5	74336	18,3468686	84,4784035	90,5434406	93,3132431	100
B	70669	71698	11129	72269	6834,2	72882	4973,5	74381	18,3965521	84,4779492	90,5433865	93,1759557	100
C	70659	71688	11127	72259	6833,2	72872	4872,8	74371	18,3850032	84,4785738	90,5434617	93,3132067	100
Resultado suma deltas δi									55,1284239	253,434926	271,630289	279,802405	300

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 1, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

## 7.2 Simulación de falla trifásica en la zona 2

Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 21.

$Z_{f1} = 0,0922 + j0,047 = 0,103480 \angle 27,011030 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde la fuente hasta el nodo 1

$Z_{121} = 2,7866 + j2,9276 = 4,041779 \angle 46,413507 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 21

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 2(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica en el nodo1.

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1 y 21 ( $V_1$  y  $V_{21}$ ) y la fuente ( $V_f$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 9.** Resultados falla trifásica en el nodo 1 con el medidor en 21.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>21</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>21</sub>
A	5967,98123	0	0	57668,3406	0
B	5967,98123	0	0	57668,3406	0
C	5967,98123	0	0	57668,3406	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>211</sub>	I <sub>118</sub>	I <sub>2118</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>2119</sub>	I <sub>120</sub>	I <sub>2120</sub>	I <sub>121</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>18</sub>	δ <sub>19</sub>	δ <sub>20</sub>	δ <sub>21</sub>
A	70612	70630	22287	70876	3098,3	70969	2447	71001	18,3306795	68,4454198	95,6285626	96,5520157	100
B	70655	70673	22300	70919	3100,2	71012	2448,5	71043	18,3803827	68,4462242	95,6285534	96,5519912	100
C	70645	70663	22297	70910	3099,8	71002	2448,1	71034	18,3688292	68,4460043	95,6285432	96,552069	100
Resultado suma deltas δt									55,0798915	205,337648	286,88564	289,656076	300

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 1, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

### 7.3 Simulación de falla trifásica en la zona 3

Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 1 y el medidor del nodo 24.

$Z_{f1} = 0,0922 + j0,047 = 0,103480 \angle 27,011030 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia en serie desde la fuente hasta el nodo 1

$Z_{124} = 2,7382 + j1,9696 = 3,37299 \angle 35,72764 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 24

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 3(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla trifásica en el nodo1.

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1 y 24 ( $V_1$  y  $V_5$ ) y la fuente ( $V_f$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 10.** Resultados falla trifásica en el nodo 1 con el medidor en 24.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>24</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>24</sub>
A	7309,25441	0	0	70629,0044	0
B	7309,25441	0	0	70629,0044	0
C	7309,25441	0	0	70629,0044	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>241</sub>	I <sub>12</sub>	I <sub>242</sub>	I <sub>122</sub>	I <sub>2422</sub>	I <sub>123</sub>	I <sub>2423</sub>	I <sub>124</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>22</sub>	δ <sub>23</sub>	δ <sub>24</sub>
A	70644	71655	11122	71908	6046,4	72453	3091,3	72712	0,02122699	84,4784035	91,591478	95,733372	100
B	70686	71698	11129	71951	6050	72497	3093,2	71756	0,08063208	84,4779492	91,5914998	95,7333407	100
C	70677	71688	11127	71942	6049,2	72487	3092,8	72746	0,06790836	84,4785738	91,5915599	95,7333039	100
Resultado suma deltas δt									0,16976744	253,434926	274,774538	287,200017	300

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 1, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra; con esto se puede notar que aunque se determinó la ubicación relativa de la falla en 3 zonas diferentes, el resultado sigue siendo el esperado, en este caso, se localiza la falla en el nodo 1, con los medidores ubicados en los nodos eléctricos 5, 21 y 24.

#### 7.4 Simulación de falla línea – línea en la zona 4

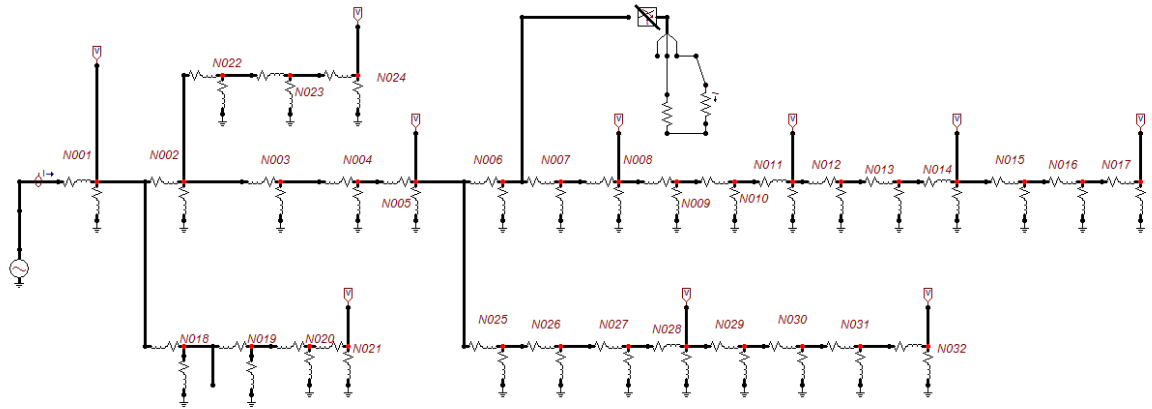
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 5 y el medidor del nodo 8.

$Z_{15} = 2,0591 + j1,3386 = 2,45596 \angle 33,02748 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 5

$Z_{58} = 1,9286 + j1,5939 = 2,502002 \angle 39,572179 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 5 hasta el nodo 8

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 4 (Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica en el nodo 6:

**Figura 55.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla entre las fases A y B del nodo 6.



En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1, 5 y 8 ( $V_1, V_5$  y  $V_8$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 11.** Resultados falla bifásica en el nodo 6.

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_1$	$V_5$	$V_8$	$I_5$	$I_8$
A	7062,72395	1518,15826	0	3285,03199	606,7778814
B	7062,72395	1518,15826	0	3285,03199	606,7778814

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	$I_{85}$	$I_{56}$	$I_{86}$	$I_{57}$	$I_{87}$	$I_{58}$	$\delta_5$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$
A	2841,7	2227	2347,5	2238,9	1901,8	2254,5	13,4955152	5,13312034	15,056501	73,0859223
B	2843,4	2228,6	2348,9	2240,5	1902,9	2256,1	13,4437653	5,12154626	15,0680652	73,1050095
Resultado suma deltas $\delta_t$							26,9392806	10,2546666	30,1245661	146,190932

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 6, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra.

## 7.5 Simulación de falla monofásica en la zona 5

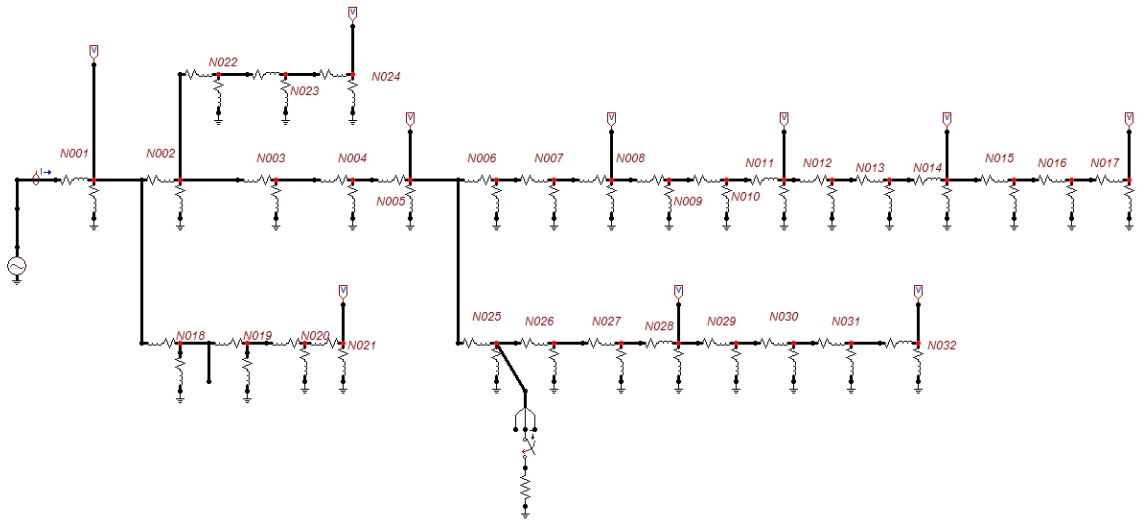
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 5 y el medidor del nodo 28.

$Z_{15} = 2,0591 + j1,3386 = 2,45596 \angle 33,02748 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 1 hasta el nodo 5

$Z_{528} = 2,3504 + j1,8824 = 3,01128 \angle 38,69071 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 5 hasta el nodo 28

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 5(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla monofásica en el nodo 25:

**Figura 56.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla en la fase B del nodo 25



En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1, 5 y 28 ( $V_1$ ,  $V_5$  y  $V_{28}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 12.** Resultados falla monofásica en el nodo 25.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>28</sub>
B	7032,17694	593,644427	0	3814,68747	197,1402284

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>285</sub>	I <sub>525</sub>	I <sub>2825</sub>	I <sub>526</sub>	I <sub>2826</sub>	I <sub>527</sub>	I <sub>2827</sub>	I <sub>528</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>25</sub>	δ <sub>26</sub>	δ <sub>27</sub>	δ <sub>28</sub>
B	2843,5	2605,4	2606,6	2613,1	2333,8	2647,8	1597,5	2673,4	25,4591622	0,04603698	10,6884543	39,6668933	92,6258611

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 25, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

### 7.6 Simulación de falla monofásica en la zona 6

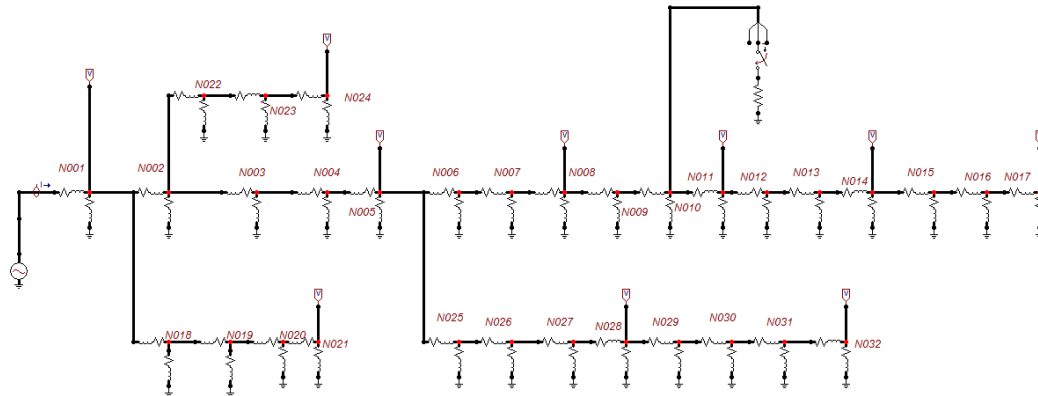
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 8 y el medidor del nodo 11.

$Z_{58} = 1,9286 + j1,5939 = 2,502002 \angle 39,572179 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 5 hasta el nodo 8

$Z_{811} = 1,6157 + j0,9288 = 1,86364 \angle 29,89283 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 8 hasta el nodo 11

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 6(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla monofásica en el nodo 10:

**Figura 57.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla en la fase B del nodo 10



En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 5, 8 y 11 ( $V_5$ ,  $V_8$  y  $V_{11}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 13.** Resultados falla monofásica en el nodo 10.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
B	4338,38295	1610,15285	0	1090,4197	864,2642677

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
B	1415	1087,8	1123,7	1088,8	1089	1090,7	22,938537	3,19480288	0,01836547	20,7605879

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 10, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

## 7.7 Simulación de falla línea – línea a tierra en la zona 7

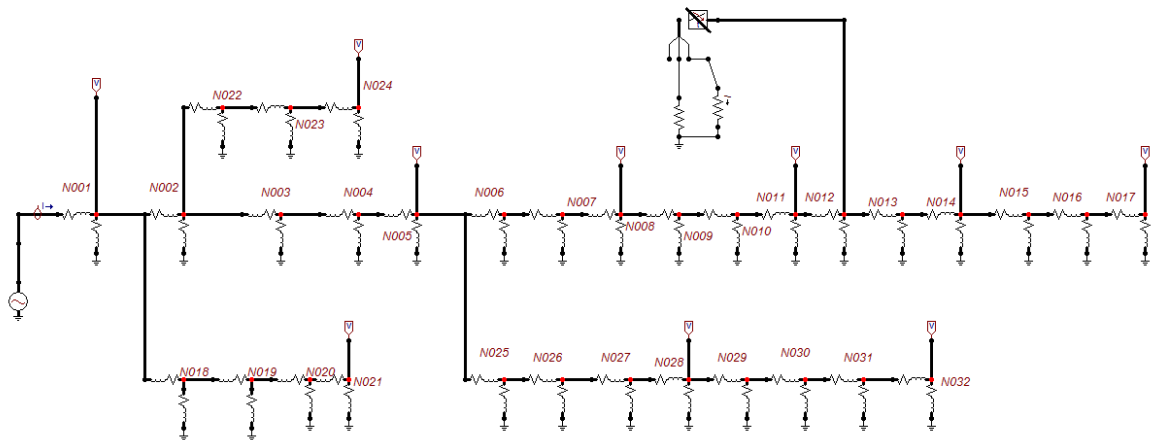
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 11 y el medidor del nodo 14.

$Z_{811} = 1,6157 + j0,9288 = 1,86364 \angle 29,89283 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 8 hasta el nodo 11

$Z_{1114} = 2,6013 + j2,3939 = 3,53518 \angle 42,62245 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 11 hasta el nodo 14

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 7(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica a tierra en el nodo 12:

**Figura 58.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica a tierra en el nodo 12



En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 8, 11 y 14 ( $V_8$ ,  $V_{11}$  y  $V_{14}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 14.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 12.

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>14</sub>
A	2998,76915	1503,45044	0	802,625992	425,3451359
B	2998,76915	1503,45044	0	802,625992	425,3451359

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1411</sub>	I <sub>1112</sub>	I <sub>1412</sub>	I <sub>1113</sub>	I <sub>1413</sub>	I <sub>1114</sub>	δ <sub>11</sub>	δ <sub>12</sub>	δ <sub>13</sub>	δ <sub>14</sub>
A	1027,4	804,048	804,6031	806,1113	731,3323	807,3978	21,8779451	0,06899054	9,27651058	47,3190123
B	1028,1	804,7581	805,0869	806,8232	731,772	808,108	21,9311359	0,04084031	9,30206271	47,3653106
Resultado suma deltas δ <sub>i</sub>							43,8090809	0,10983085	18,5785733	94,6843229

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 12, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra

### 7.8 Simulación de falla línea – línea en la zona 8

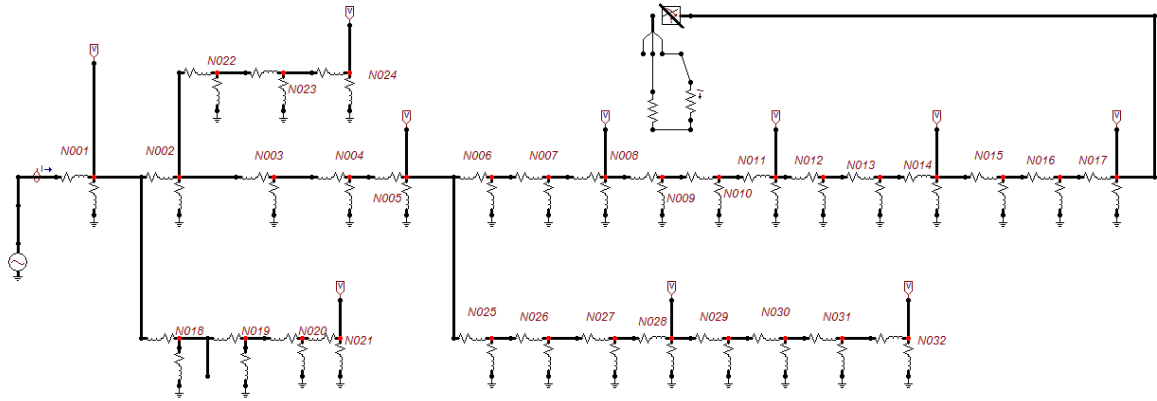
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 14 y el medidor del nodo 17.

$Z_{1114} = 2,6013 + j2,3939 = 3,53518 \angle 42,62245 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 11 hasta el nodo 14

$Z_{1417} = 2,7673 + j2,84 = 3,96529 \angle 45,74281 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 14 hasta el nodo 17

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 8(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica en el nodo 17:

**Figura 59.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla entre las fases A y B del nodo 17



En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 11, 14 y 17 ( $V_{11}$ ,  $V_{14}$  y  $V_{17}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 15.** Resultados falla bifásica en el nodo 17.

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_{11}$	$V_{14}$	$V_{17}$	$I_{14}$	$I_{17}$
A	4422,95292	3558,51488	3323,33116	244,56045	59,31059656
B	4422,95292	3558,51488	3323,33116	244,56045	59,31059656

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	$I_{1714}$	$I_{1415}$	$I_{1715}$	$I_{1416}$	$I_{1716}$	$I_{1417}$	$\delta_{14}$	$\delta_{15}$	$\delta_{16}$	$\delta_{17}$
A	336,9279	315,1495	308,5989	315,8778	259,3125	316,0943	27,4146041	2,07856906	17,9073363	81,2364233
B	337,3323	281,6949	308,9693	282,346	259,6238	282,5395	27,5016208	8,82754371	8,04764367	79,0080337
Resultado suma deltas $\delta_t$							54,916225	10,9061128	25,95498	160,244457

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 15, por lo que en este caso no fue identificado de forma correcta el nodo donde ocurre la falla.

## 7.9 Simulación de falla línea – línea a tierra en la zona 9

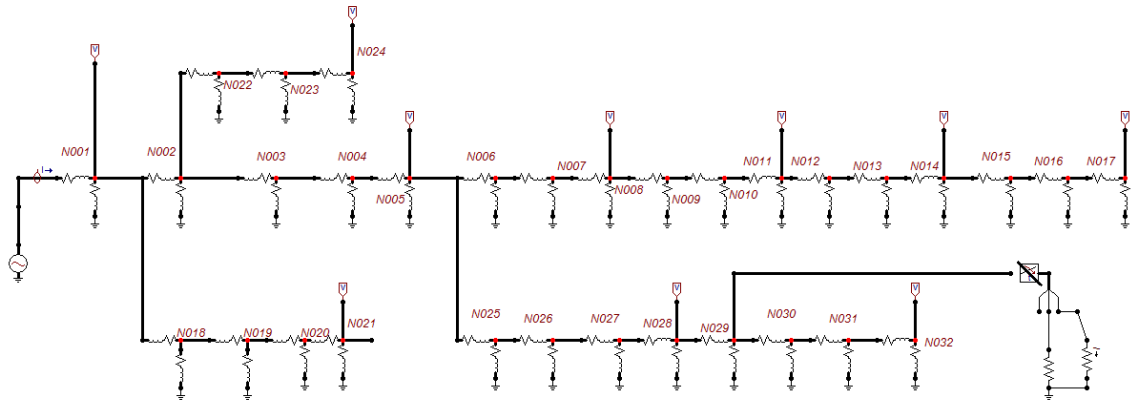
Nodos eléctricos comprendidos entre el medidor del nodo 28 y el medidor del nodo 32.

$Z_{528} = 2,3504 + j1,8824 = 3,01128 \angle 38,69071 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 5 hasta el nodo 28

$Z_{2832} = 2,1334 + j2,1136 = 3,00311 \angle 44,73288 \left[ \frac{\Omega}{f_{ase}} \right]$ : Impedancia serie desde el nodo 28 hasta el nodo 32

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en la zona 9(Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica a tierra en el nodo 29:

**Figura 60.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica a tierra en el nodo 29



En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 5, 28 y 32 ( $V_5$ ,  $V_{28}$  y  $V_{32}$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 16.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 29.

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_5$	$V_{28}$	$V_{32}$	$I_{28}$	$I_{32}$
A	4173,27351	664,78644	0	1165,11486	221,3659974
B	4173,27351	664,78644	0	1165,11486	221,3659974

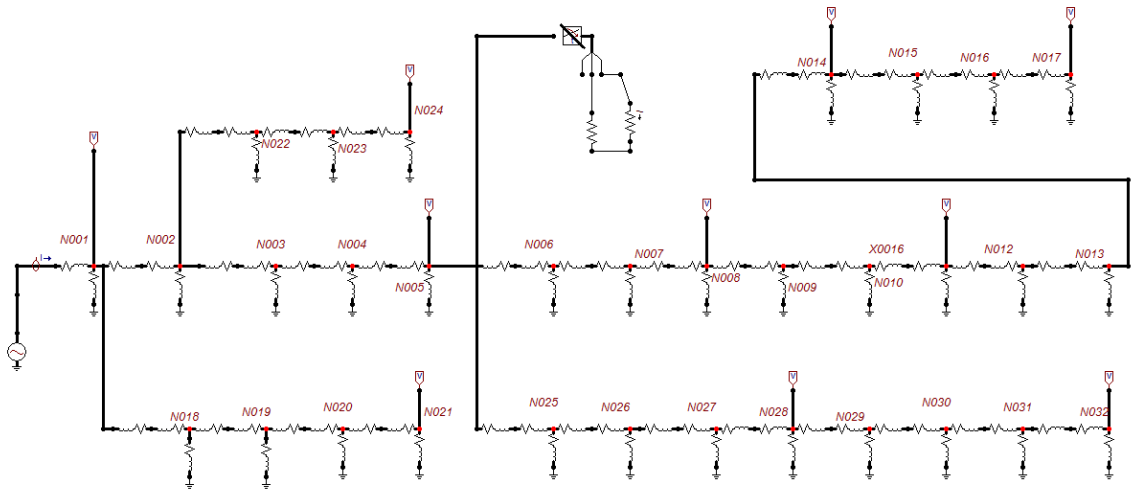
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{3228}$	$I_{2829}$	$I_{3229}$	$I_{2830}$	$I_{3230}$	$I_{2831}$	$I_{3231}$	$I_{2832}$	$\delta_{28}$	$\delta_{29}$	$\delta_{30}$	$\delta_{31}$	$\delta_{32}$
A	1287,5	1165,2	1166,9	1170,9	947,685	1172,2	889,5998	1172,6	9,50564205	0,14568515	19,0635409	24,108531	81,1217809
B	1288,3	1166	1167,6	1171,8	948,2601	1173	890,1396	1173,4	9,56183663	0,13703323	19,0766257	24,1142711	81,1346517
Resultado suma deltas $\delta_i$									19,0674787	0,28271838	38,1401666	48,2228021	162,256433

De acuerdo a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta los valores hallados de los deltas, se puede determinar que la falla ocurre en el nodo 29, ya que relacionando los valores de corriente de falla entre sí y con los valores de corriente de referencia se obtiene el valor más pequeño de estos deltas en esta barra.

### 7.10 Simulación de falla trifásica entre líneas

Se realiza el análisis de cada tipo de falla ocurrida en cada una de las zonas del sistema de 32 nodos eléctricos (Anexo C), para este caso se muestra un ejemplo del método cuando ocurre una falla bifásica entre los nodos eléctricos 6 y 7, como se muestra en la Figura 61:

**Figura 61.** Sistema de 32 nodos eléctricos con falla bifásica entre los nodos eléctricos 5 y 6



En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha en ATP, de donde se extraen los datos de tensión durante la falla en los medidores ubicados en los nodos eléctricos 1, 5 y 8 ( $V_1$ ,  $V_5$  y  $V_8$ ) con los cuales se hace la simulación en Matlab para la determinación de las corrientes de falla y las corrientes de referencia.

**Tabla 17.** Resultados falla bifásica entre los nodos eléctricos 5 y 6.

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_1$	$V_5$	$V_8$	$I_5$	$I_8$
A	7085,20995	3447,85267	3392,27407	2155,05338	22,21366627
B	7105,71604	3447,85267	3392,27407	2167,20279	22,21366627

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	$I_{85}$	$I_{56}$	$I_{86}$	$I_{57}$	$I_{87}$	$I_{58}$	$\delta_5$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$
A	1414,4	1419,8	1168,4	1427,4	946,5599	1437,3	34,3682151	17,7067193	33,6864299	98,4544864
B	1416,1	1421,5	1169,8	1429,1	9847,7041	1439	34,6577068	17,7066479	85,487988	98,4563123
Resultado suma deltas $\delta_t$							69,0259218	35,4133672	119,174418	196,910799

Para este caso, la identificación de la falla entre líneas se hace con los dos valores más pequeños de los deltas, lo que da a entender que la falla está localizada entre

estos dos nodos eléctricos, para este ejemplo se demuestra que la falla se presentó entre los nodos eléctricos 5 y 6, lo que corrobora el rendimiento del método aún si ésta ocurriera entre líneas y no en los nodos eléctricos.

Al ver la efectividad del método mostrada para el sistema de 10 nodos eléctricos, se decidió para el sistema de 32 nodos eléctricos implementar la distribución de fallas en todo el sistema, es decir, se aplicó cada tipo de falla a 8 nodos eléctricos diferentes, de la siguiente manera:

Falla trifásica aplicada a los nodos eléctricos 1, 4, 9, 15, 19, 23, 26, 30.

Falla monofásica aplicada a los nodos eléctricos 2, 5, 10, 13, 16, 18, 25, 31.

Falla bifásica aplicada a los nodos eléctricos 3, 6, 11, 14, 17, 20, 24, 27.

Falla bifásica a tierra a los nodos eléctricos 7, 8, 12, 21, 22, 28, 29, 32.

En la Tabla 18 se evidencian los resultados de la efectividad del método para un sistema real de 32 nodos eléctricos, relacionando el tipo de falla y algunas de los nodos eléctricos del sistema.

**Tabla 17.** Resultados generales de rendimiento del método para el sistema de 32 nodos eléctricos escogido

TIPO DE FALLA	BARRA																																EFECTIVIDAD %	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32		
Trifásica	■			■					■						■				■					■								■		100
Monofásica		■			■					■			■			■		■			■				■							■		87,5
Línea - Línea			■			■					■			■			■			■				■								■		37,5
Línea - Línea a tierra							■					■											■									■		87,5
GENERAL																																	78,125	

El rendimiento mostrado por el método propuesto para este sistema sigue siendo de un porcentaje aceptable y aunque su valor de efectividad se ve disminuido, es considerablemente más alto que el método de referencia sobre el cual se basó el primer estudio.

## 8. CONCLUSIONES

- ❖ La localización de fallas es de vital importancia para el correcto funcionamiento de los sistemas de distribución; mediante los medidores inteligentes la detección de estas anomalías se realiza de una forma más eficiente y con una mayor precisión.
- ❖ La precisión en la localización relativa de la falla es mayor al incluir en la matriz de impedancias del sistema cada valor de las impedancias de carga conectadas en los nodos eléctricos, ya que permite aumentar la diferencia entre las corrientes de falla calculadas y las corrientes de referencia halladas a partir de las tensiones suministradas por los medidores inteligentes en el momento en que ocurre la falla.
- ❖ Para ciertas situaciones, numéricamente, el mínimo  $\delta$  debe ser asociado con más de una barra  $k$  indicando estimación múltiple, debido a esto, el método aplica la regla general de la ubicación relativa de la falla no en el valor más pequeño de este  $\delta$ , sino que se extiende a los dos valores más pequeños en los nodos eléctricos involucrados en la zona, lo cual se puede asociar con una zona del sistema de distribución la cual posee el nodo eléctrico en falla el cual asociamos al mínimo valor del  $\delta$ .
- ❖ La ubicación de los medidores es de vital importancia a la hora de la obtención de las tensiones en el momento de la falla ya que afectan la calidad de la medición. Es necesario tener un medidor en cada final de ramal y una separación mínima entre ellos de 3 barras para así determinar con mayor precisión el nodo en falla.

## 9. OBSERVACIONES

- Para su mejor funcionamiento se debe escoger las zonas donde van a estar ubicados los medidores en barras no consecutivas, es decir, si se ubica un medidor en el nodo  $k$ , lo más recomendado es ubicar el siguiente medidor en el nodo  $k+2$ .
- Se hace énfasis en la preferencia de colocar  $n/2$  de medidores inteligentes ( $n$ =nodos eléctricos) en el sistema de distribución, agudizando la precisión del método.
- De acuerdo a los resultados obtenidos con fallas con resistencia de falla, es necesario profundizar más en este tema e incorporar esto en cada uno de los modelos estudiados.
- Se recomienda analizar estos métodos cuando se tiene generación distribuida, entendiendo de antemano que la operación no es radial.

## REFERENCIAS

- [1] C. L. Trindade, W. Freitas, J. C. M. Vieira, "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters", in Proc IEEETRANSACTIONSONPOWERDELIVERY, VOL.29, NO.1, FEBRUARY2014.
- [2] G. Morales, J.J. Mora, H. Vargas, "MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIA", Scientia et Technica Año XIII, No 34, mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [3] R. A. F. Pereira, L. G. W. da Silva, M. Kezunovic, and J. R. S. Mantovani, "Improved fault location on distribution feeders based on matchingduring-faultvoltagesags," IEEETrans.PowerDel., vol.24, no. 2, pp. 852–862, Apr. 2009.
- [4] S.M. Brahma, "Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation, IEEETrans.PowerDel" vol.26, no. 3, pp. 1545–1553, Jul. 2011.
- [5] R. A. F. Pereira, "Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões" (in Portuguese) Ph. D. dissertation, Univ. Estadual Paulista, São Paulo, Brazil, 2007. [Online]. Available: [http://www.dee.feis.unesp.br/pos/teses/arquivos/031-tese\\_rodrigo\\_aparecido\\_fernandes\\_pereira.pdf](http://www.dee.feis.unesp.br/pos/teses/arquivos/031-tese_rodrigo_aparecido_fernandes_pereira.pdf).
- [6] M. Kezunovic, "Smart fault location for smart grids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011.
- [7] V. A. Gómez, R. A. Peña, C. Hernández, "Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución, utilizando medidores de calidad del servicio de energía eléctrica", julio de 2011
- [8] T. Tayjasant, C. Li, andW.Xu, "Aresistancesign-basedmethodfor voltagesagsourcedetection, IEEETrans.PowerDel" vol.20, no.4, pp. 2544–2551, Oct. 2005.
- [9] A.K. PradhanandA.Routray, "Applyingdistancerelayforvoltagesag sourcedetection, IEEETrans.PowerDel" vol.20, no.1, pp.529–531, Jan. 2005.

- [10] S. Lotfifard, M. Kezunovic, and M.J. Mousavi, "Voltage sag data utilization for distribution fault location," IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, pp. 1239–1246, Apr. 2011
- [11] M. Popa, "Datacollectingfromsmartmetersinanadvancedmetering Infrastructure," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. Intell. Eng. Syst., 2011, pp. 137–142.
- [12] Peñuela, A., Pacheco, J., Jairo, H., Ordóñez, G., IEEE. & Benjamín. J., 2005
- [13] A Novel Algorithm for Characterizing Measured Three-Phase Voltage Sags, 2012 Andean Region International Conference.
- [14] J. Blanco, J.F. Petit, G. Ordóñez Electrical and Electronic School, Algorithm for Relative Location of Voltage Sags and Capacitor Switching Transients Based on Voltage Measurements Only, Universidad Industrial of Santander, Bucaramanga, Colombia.
- [15] Mora J. "Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos Basados en el Conocimiento" 2006, Tesis doctoral. Universidad de Girona, España.
- [16] Das R. "Determining the Locations of Faults in Distribution Systems", 1998. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- [17] Novosel D., Hart D., Myllymaki J. "System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads". 1998. US Patent number 5,839,093.
- [18] Yang L. "One terminal fault location system that corrects for fault resistance effects". 1998. US Patent number 5,773,980.
- [19] Warrington, A. R, Van C. "Protective relays. Their theory and practice", Chapman and Hall Ltd. London, 1968.

## BIBLIOGRAFÍA

C. L. Trindade, J. C. M. Vieira, W. Freitas, "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters", in Proc IEEE TRANSACTIONSONPOWERDELIVERY, VOL.29, NO.1, FEBRUARY2014.

G. Morales, H. Vargas, J.J. Mora, "MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN GRÁFICAS DE REACTANCIA", Scientia et Technica Año XIII, No 34, mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

[4] S.M. Brahma, "Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation, IEEETrans.PowerDel" vol.26, no. 3, pp. 1545–1553, Jul. 2011.

[13] A Novel Algorithm for Characterizing Measured Three-Phase Voltage Sags, 2012 Andean Region International Conference.

[14] G. Ordóñez, J. Blanco, J.F. Petit, Electrical and Electronic School, Algorithm for Relative Location of Voltage Sags and Capacitor Switching Transients Based on Voltage Measurements Only, Universidad Industrial of Santander, Bucaramanga, Colombia.

## ANEXOS

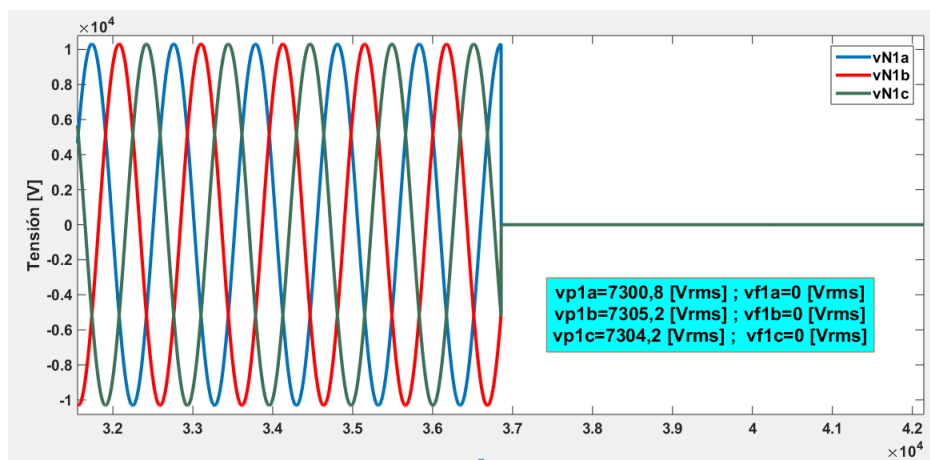
### ANEXO A. RESULTADOS DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL SISTEMA DE 10 NODOS ELÉCTRICOS

#### A.1 Simulación de cada tipo de falla en los nodos eléctricos de la zona 1

##### A.1.1 Nodo eléctrico 1

##### Falla trifásica en el nodo 1

**Figura A1.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura A2.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 1

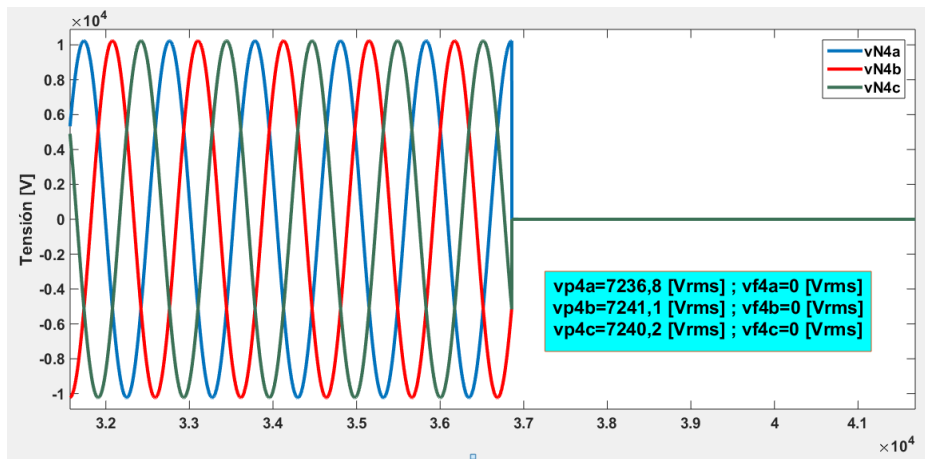


Figura A3. Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1

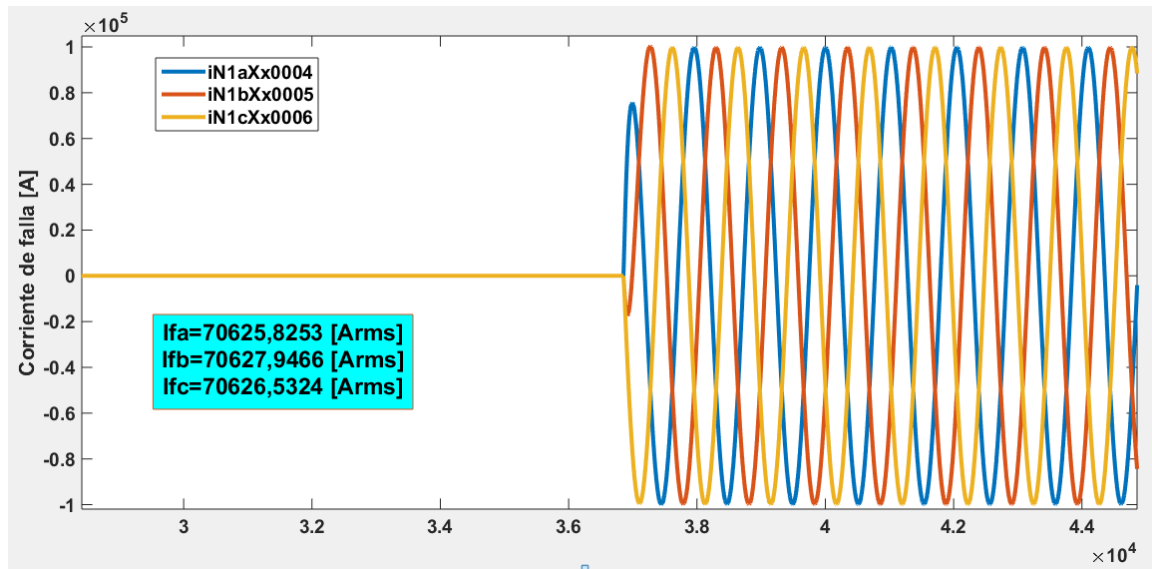


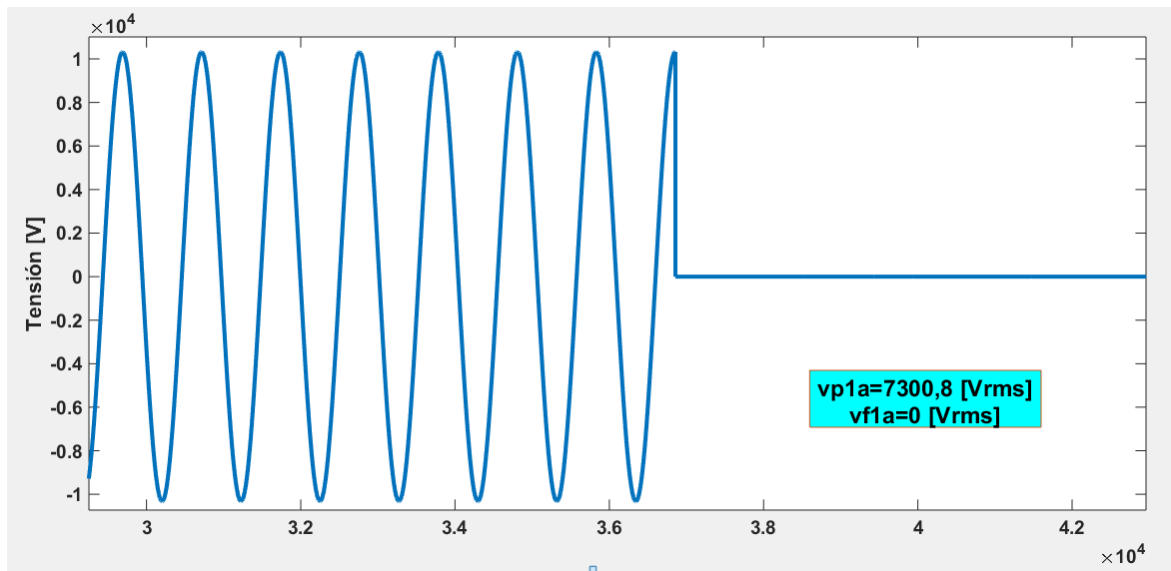
Tabla A1. Resultados falla trifásica en el nodo 1

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	0	0	70629,00441	0
B	7309,25441	0	0	70629,00441	0
C	7309,25441	0	0	70629,00441	0

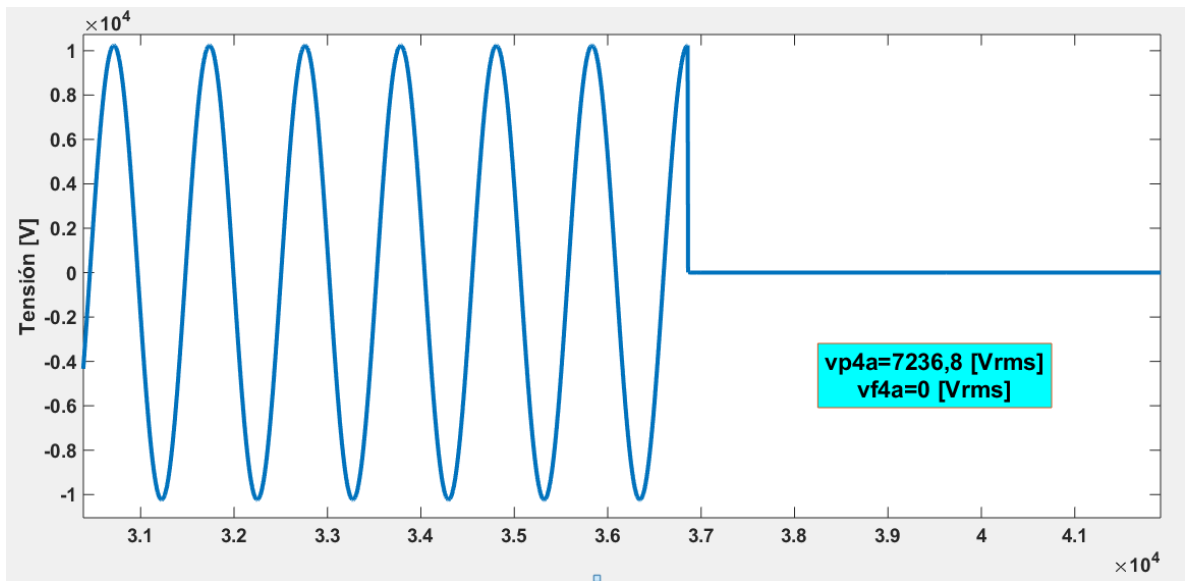
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70630	70853	11124	71100	6843,2	71255	0,00140959	84,2998885	90,3752461	100
B	70673	70896	11131	71143	6847,3	71298	0,06225234	84,2995374	90,3753005	100
C	70663	70896	11131	71143	6846,4	71298	0,04810947	84,2995374	90,3765655	100
Resultado suma deltas							0,1117714	252,898963	271,127112	300

### Falla monofásica en el nodo 1

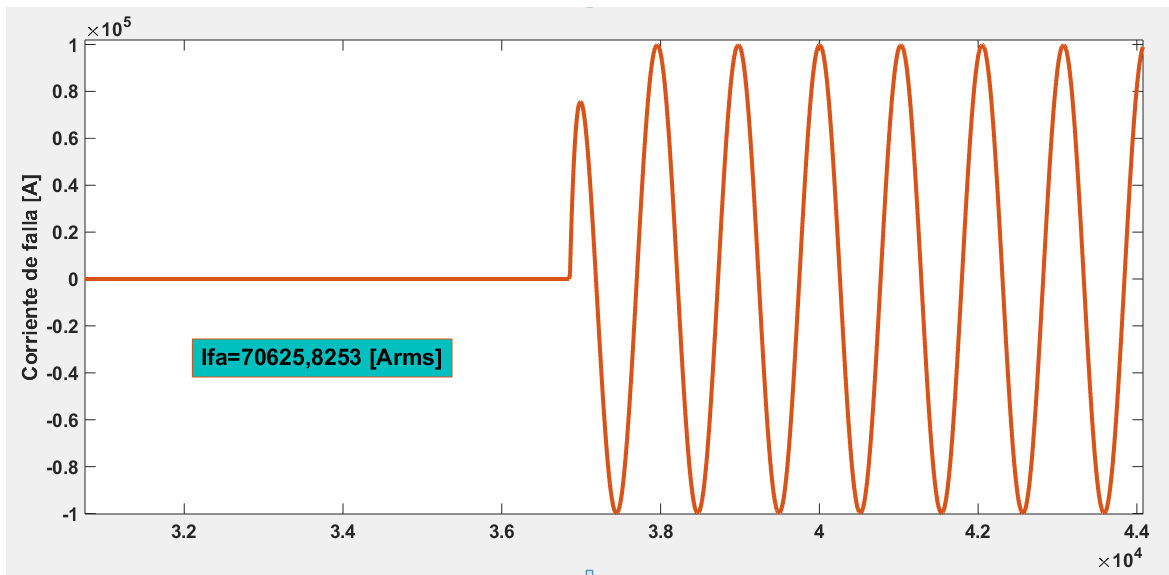
**Figura A4.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 1



**Figura A5.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 1



**Figura A6.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 1



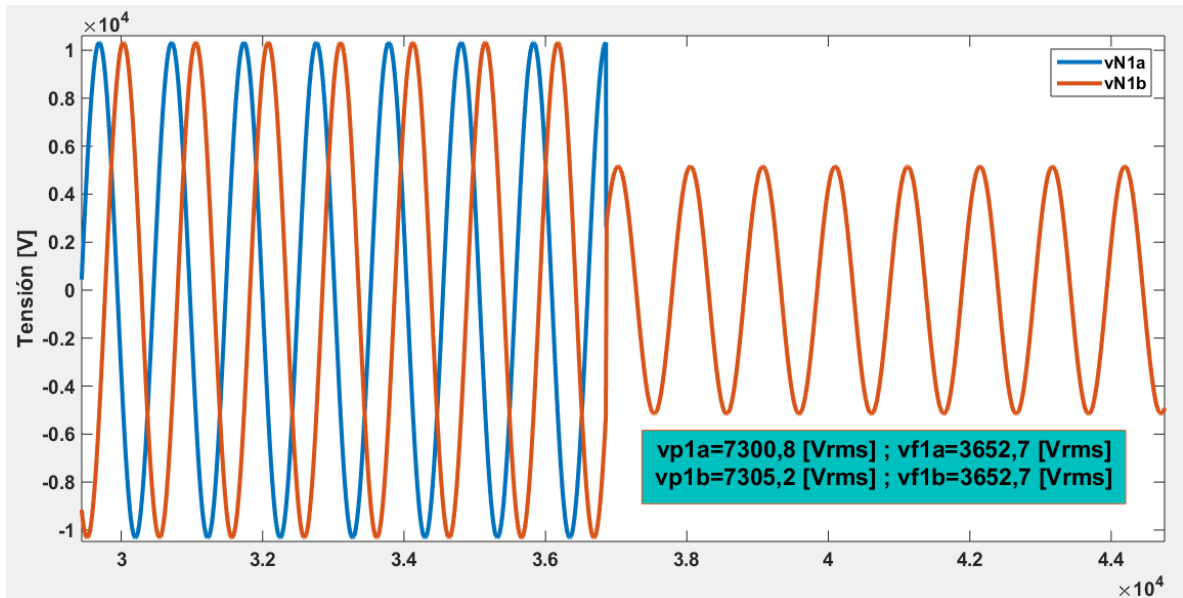
**Tabla A2.** Resultados falla monofásica en el nodo 1

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	0	0	70629,0044	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70630	70853	11124	71100	6843,2	71255	0,00140959	84,2998885	90,3752461	100

### Falla línea – línea en el nodo 1

**Figura A7.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 1.



**Figura A8.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 1

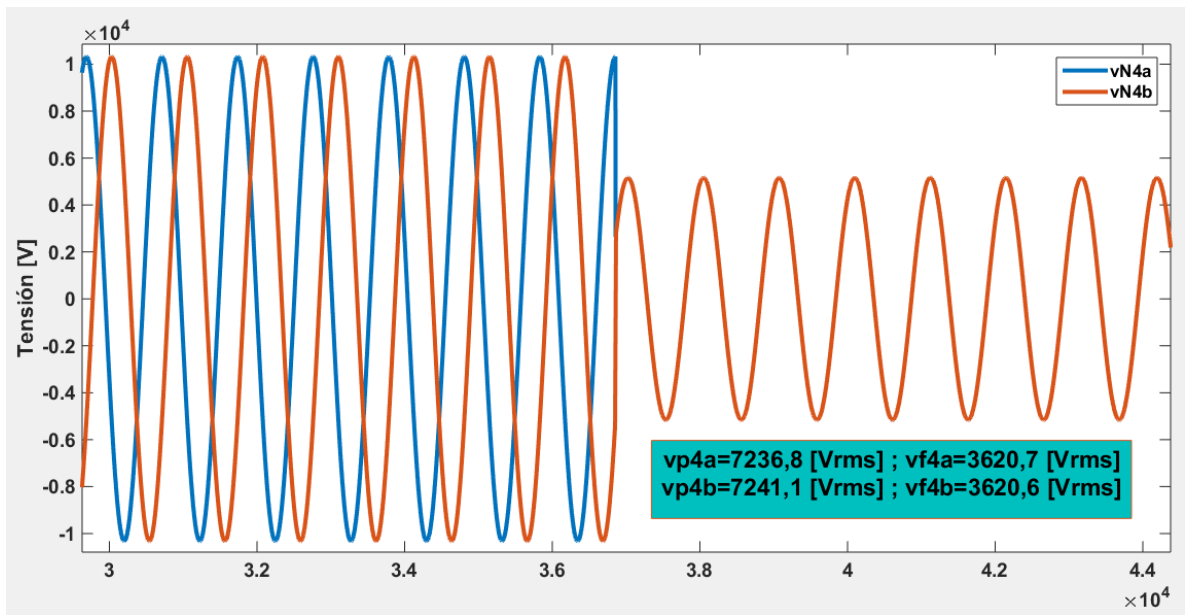


Figura A9. Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 1

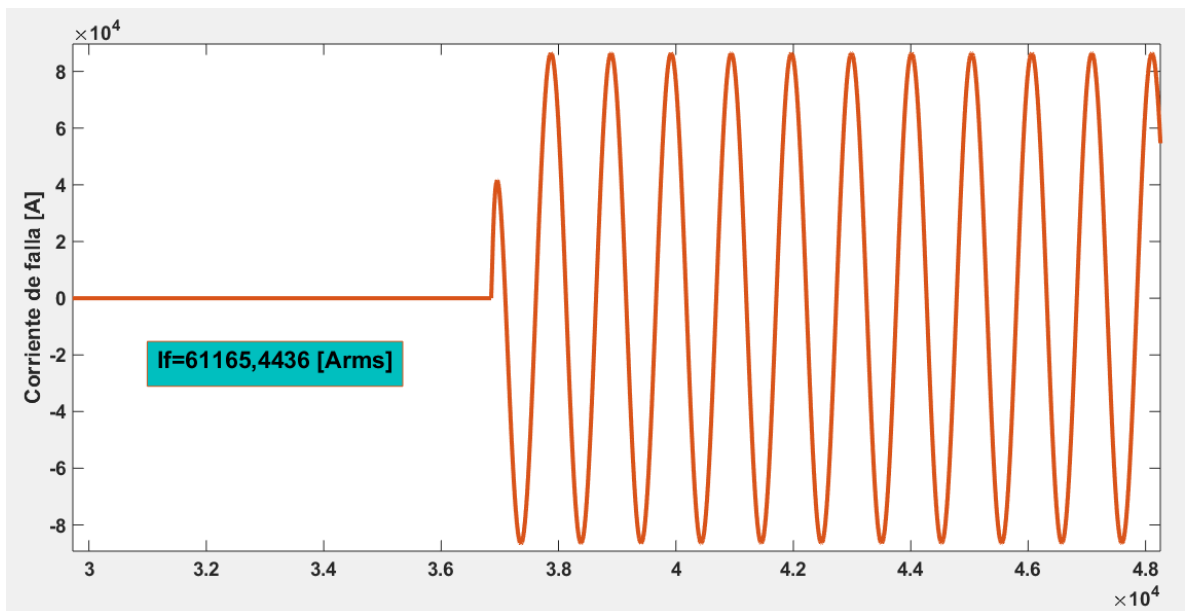


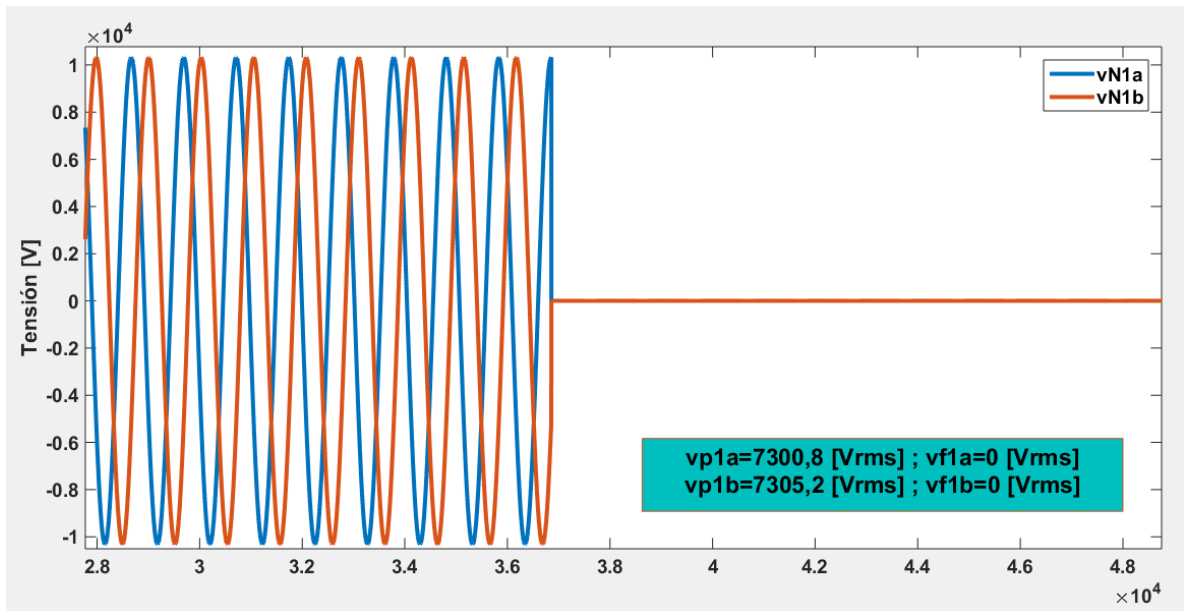
Tabla A3. Resultados falla bifásica en el nodo 1

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	3651,71155	3619,67961	35342,676	23,0180635
B	7309,25441	3651,64084	3619,6089	35343,3593	23,0180635

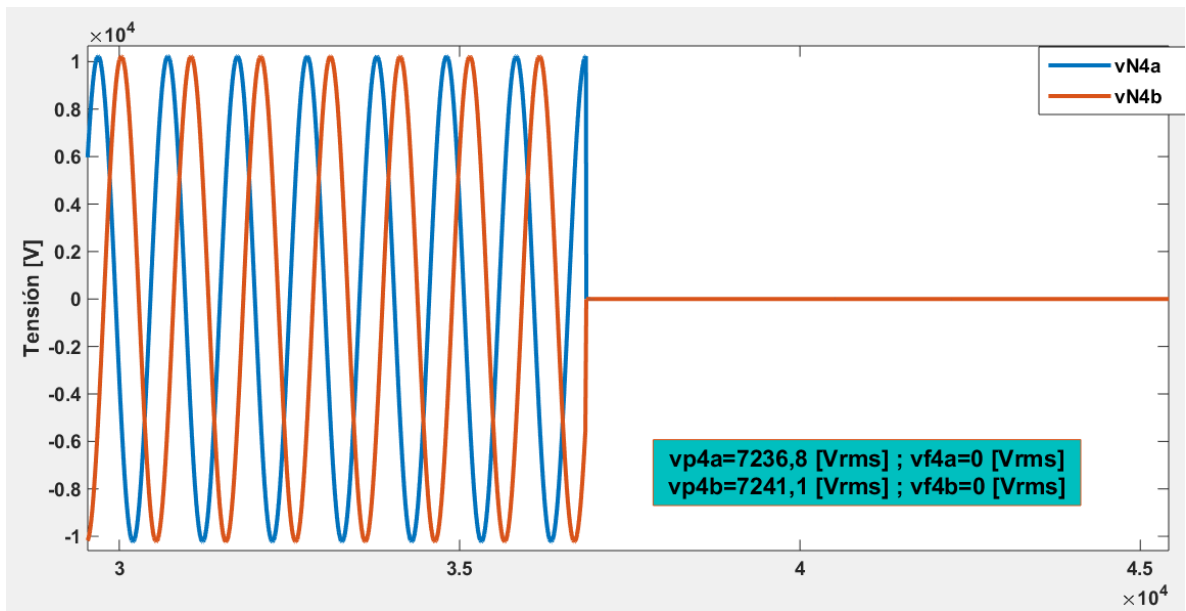
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	35293	35404	5558,7	35528	3419,4	35605	0,1405554	84,2992317	90,3754785	99,9353516
B	35336	35448	5565,4	35571	3423,6	35649	0,02082233	84,2998195	90,3753057	99,9354314
Resultado suma deltas							0,16137773	168,599051	180,750784	199,870783

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 1

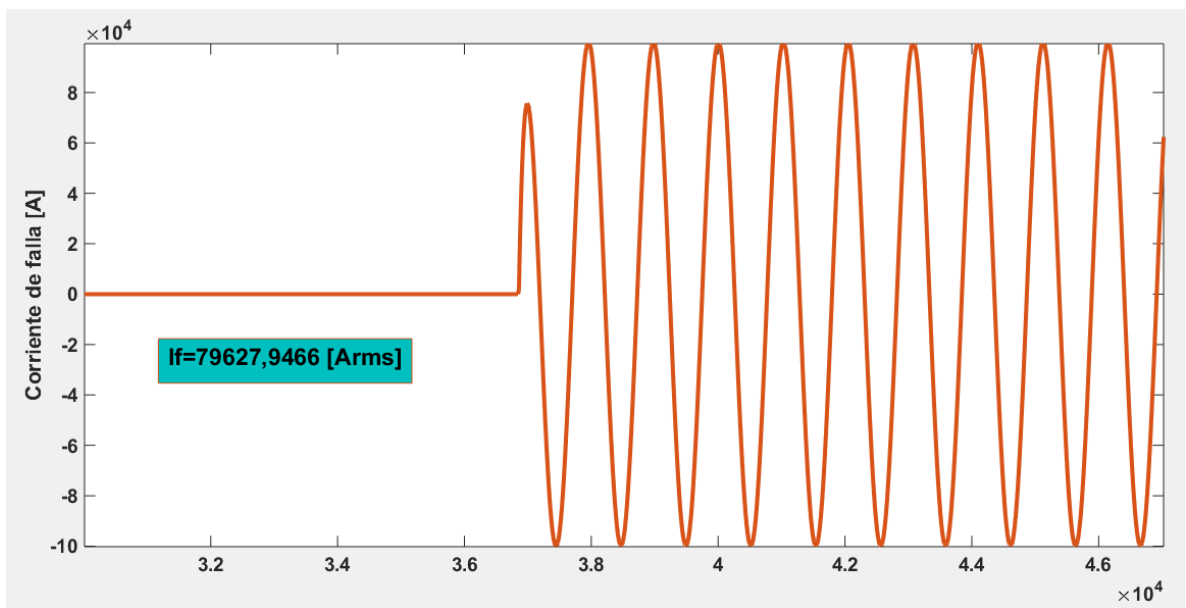
**Figura A10.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 1



**Figura A11.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 1



**Figura A12.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 1



**Tabla A4.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 1

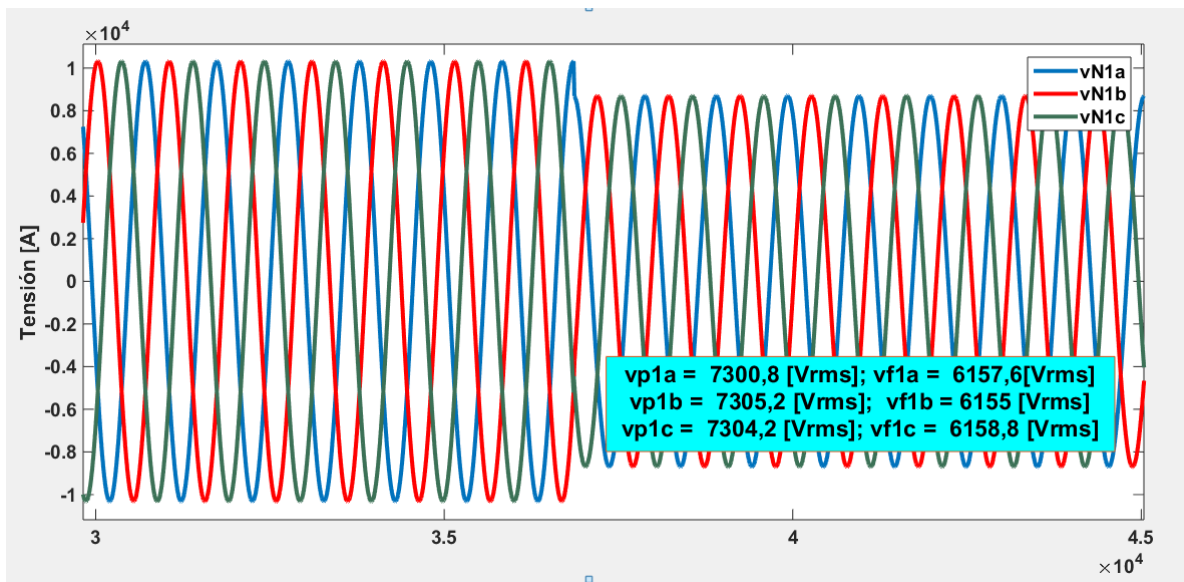
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,254408	0	0	70629,00441	0
B	7309,254408	0	0	70629,00441	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70630	70853	11124	71100	6843,2	71255	0,001409591	84,2998885	90,37524613	100
B	70673	70896	11131	71143	6847,3	71298	0,062252337	84,29953735	90,37530045	100
Resultado suma deltas							0,063661928	168,5994259	180,7505466	200

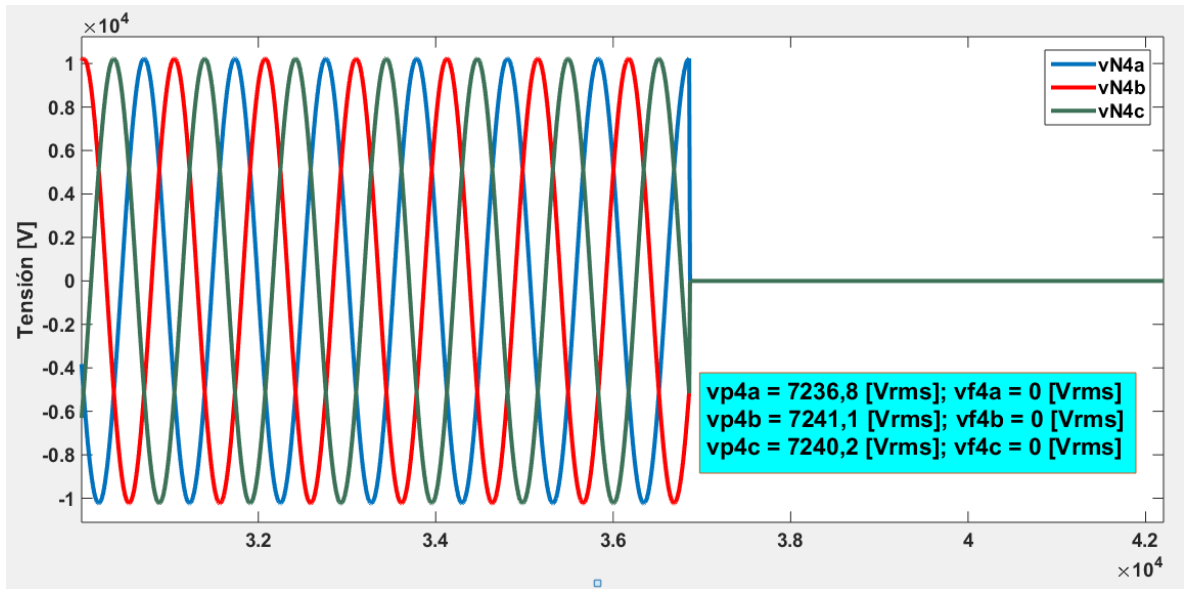
## A.1.2 Nodo eléctrico 2

### Falla trifásica en el nodo 2

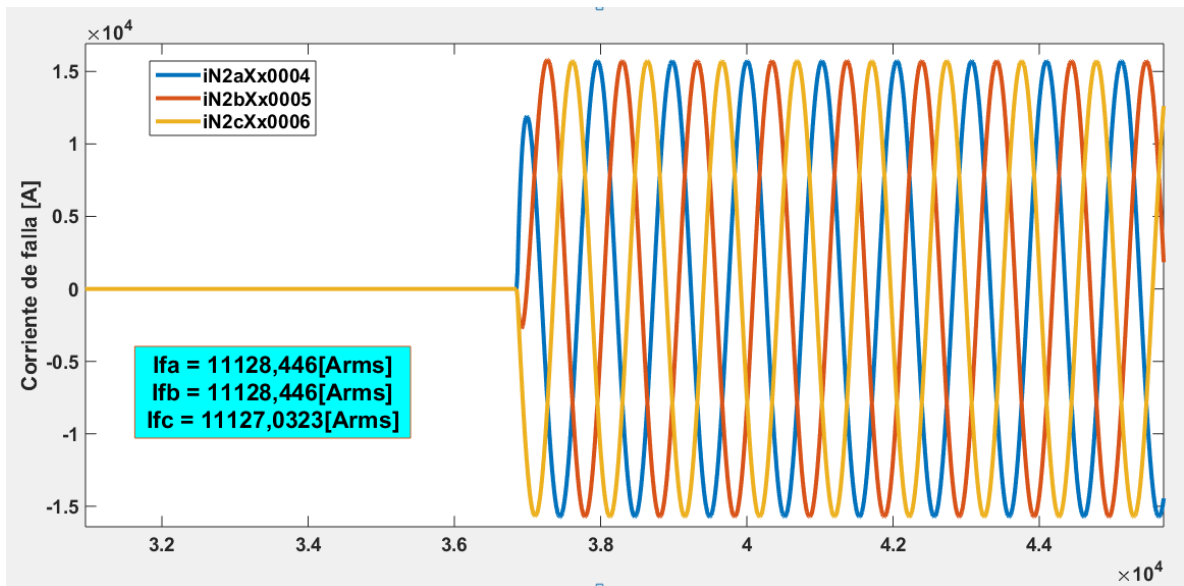
Figura A13. Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 2



**Figura A14.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 2



**Figura A15.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 2



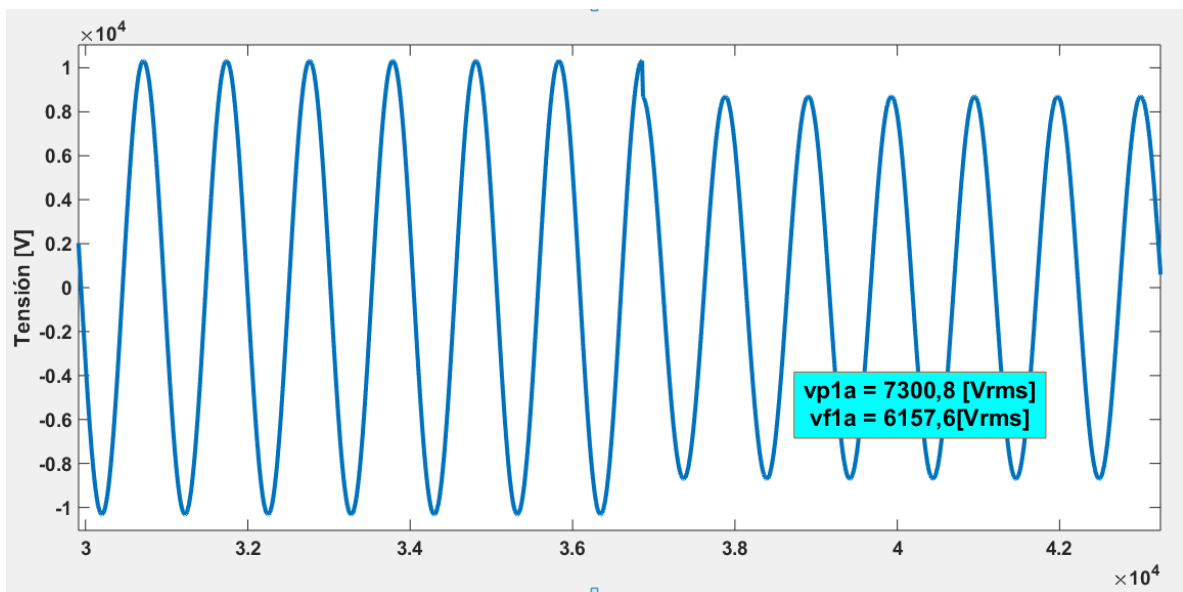
**Tabla A5.** Resultados falla trifásica en el nodo 2

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6156,42519	0	11139,73811	4423,990508
B	7309,25441	6157,06159	0	11133,58864	4424,44782
C	7309,25441	6156,92017	0	11134,95519	4424,346195

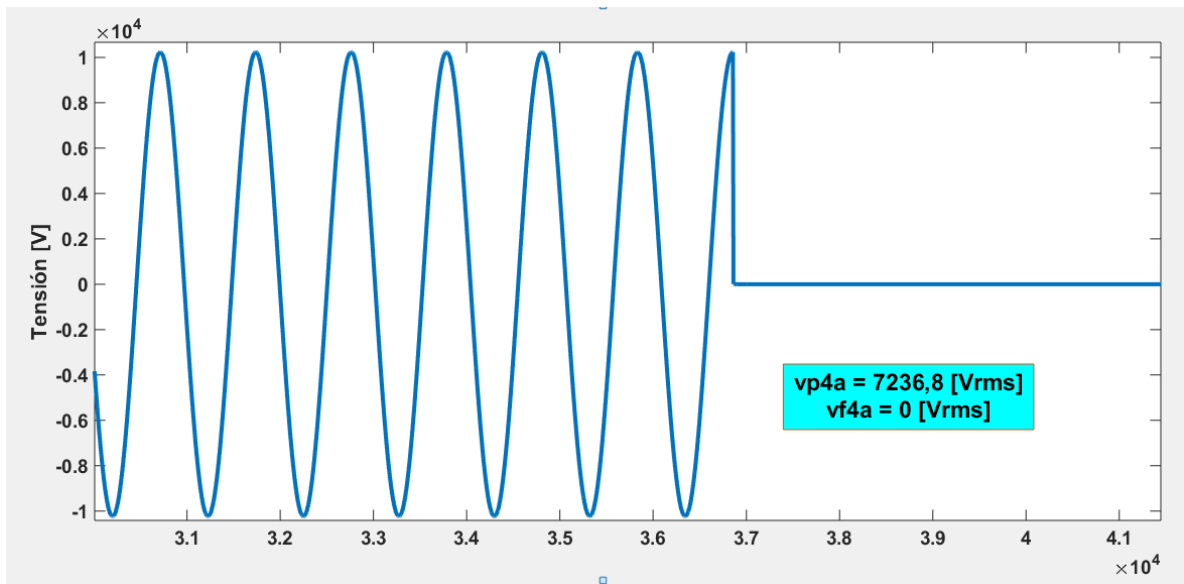
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	11095	11124	11133	6843,2	11158	84,2282594	0,26069759	38,5322914	60,3514025
B	70673	11163	11131	11202	6847,3	11227	84,2463336	0,28666129	38,8743082	60,5910054
C	70664	11117	11130	11156	6846,4	11180	84,2423933	0,11680144	38,6303335	60,4262415
Resultado suma deltas							252,716986	0,66416032	116,036933	181,368649

## Falla monofásica en el nodo 2

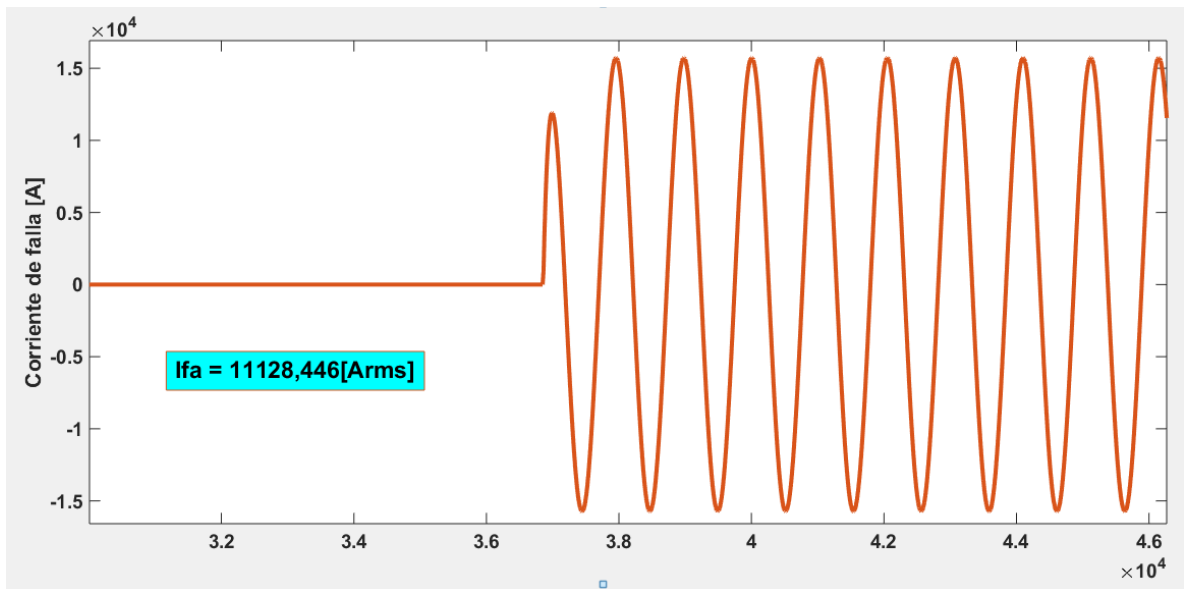
**Figura A16.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura A17.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura A18.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 2



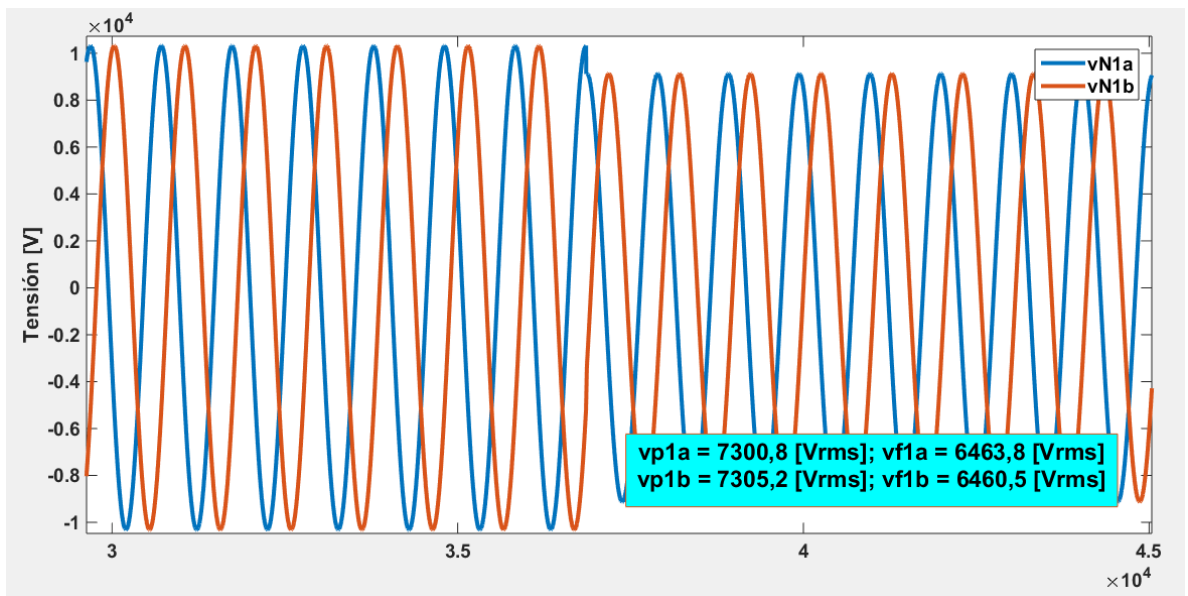
**Tabla A6.** Resultados falla monofásica en el nodo 2

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6156,42519	0	11139,7381	4423,99051

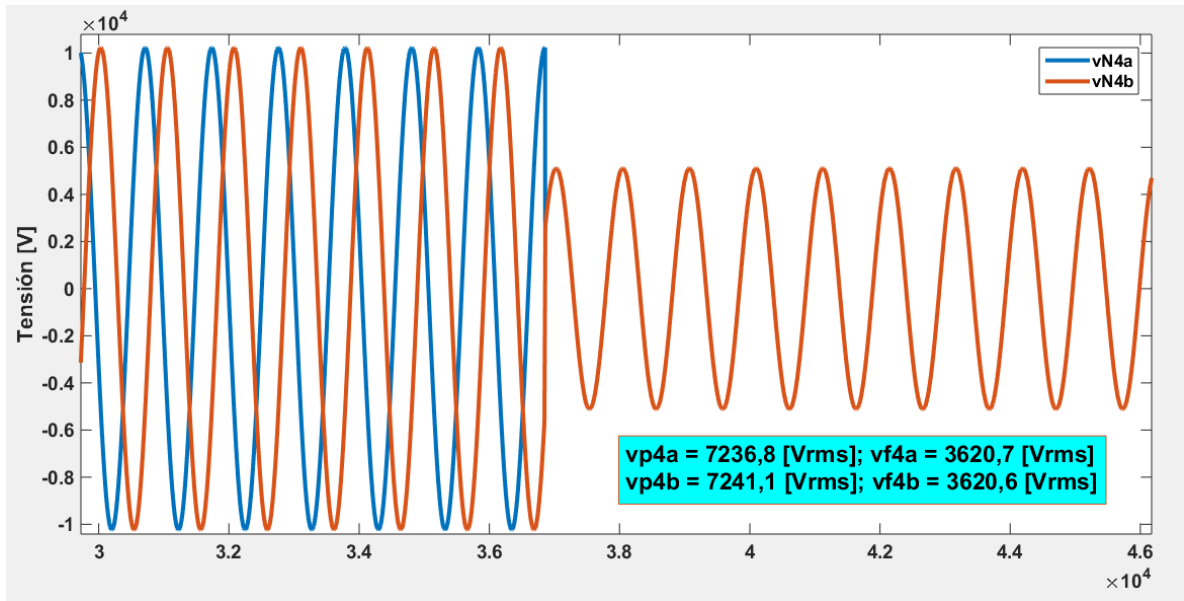
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	11095	11124	11133	6843,2	11158	84,2282594	0,26069759	38,5322914	60,3514025

## Falla línea – línea en el nodo 2

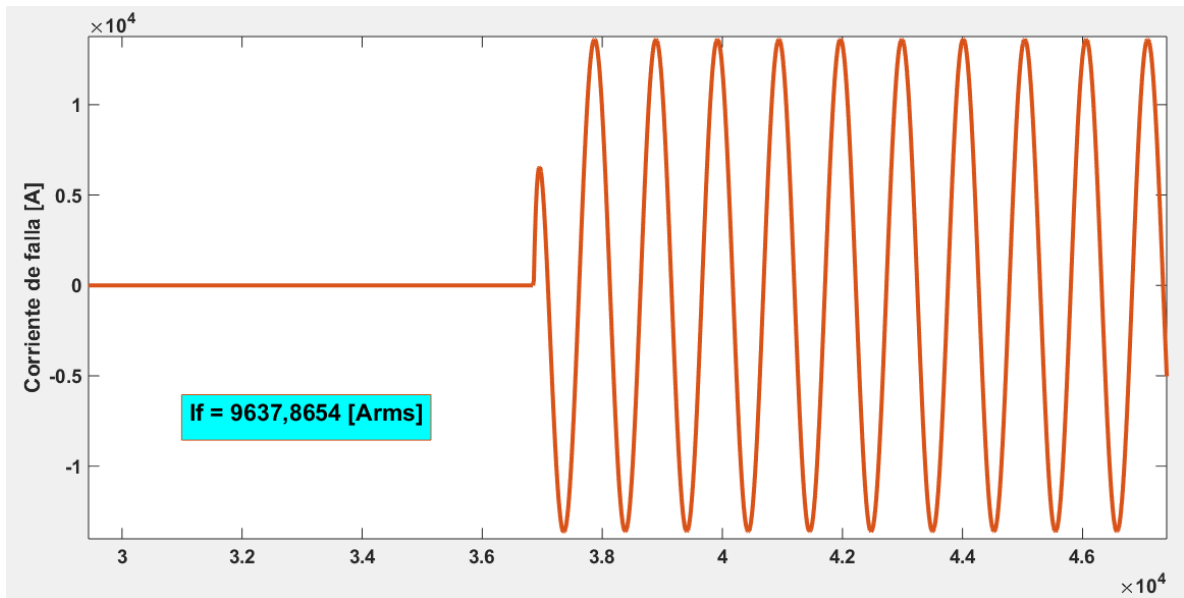
**Figura A19.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 2



**Figura A20.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 2



**Figura A21.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 2



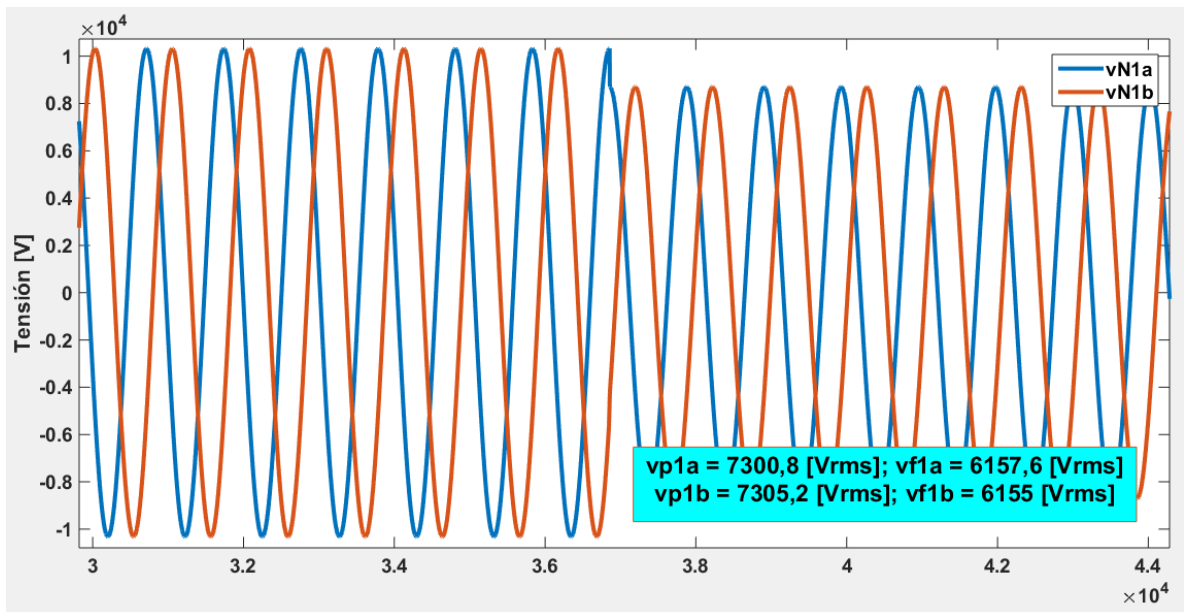
**Tabla A7.** Resultados falla bifásica en el nodo 2

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
<b>A</b>	7309,25441	6462,88527	3619,67961	8178,42782	2043,1199
<b>B</b>	7309,25441	6462,60243	3619,67961	8181,16092	2042,91665

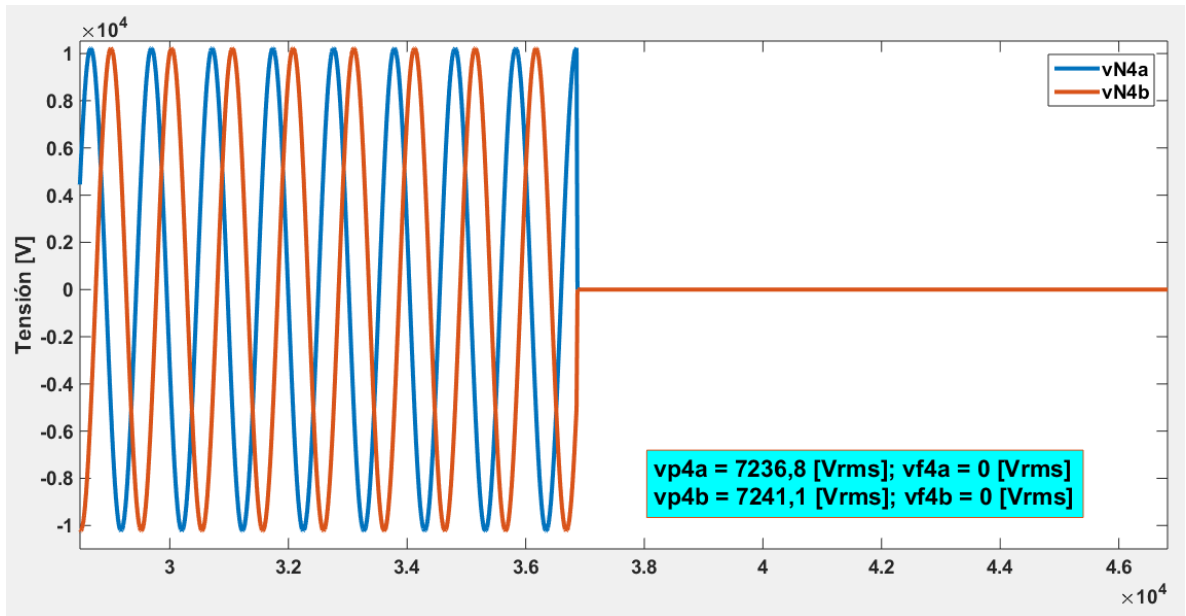
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
<b>A</b>	35293	8123,4	5558,7	8151,7	3419,5	8169,5	76,827054	31,5717557	58,0516947	74,9908819
<b>B</b>	35336	8197,9	5565,4	8226,5	3423,6	8244,4	76,8475183	32,1118823	58,3832736	75,2205539
<b>Resultado suma deltas</b>							153,674572	<b>63,683638</b>	116,434968	150,211436

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 2

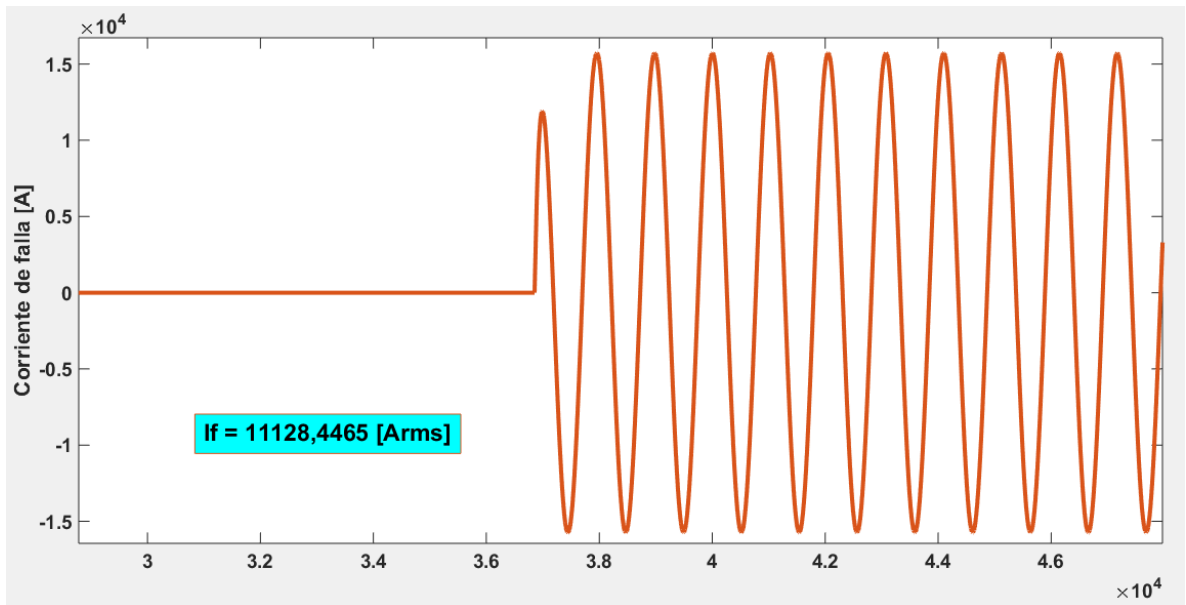
**Figura A22.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 2



**Figura A23.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 2



**Figura A24.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 2



**Tabla A8.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 2

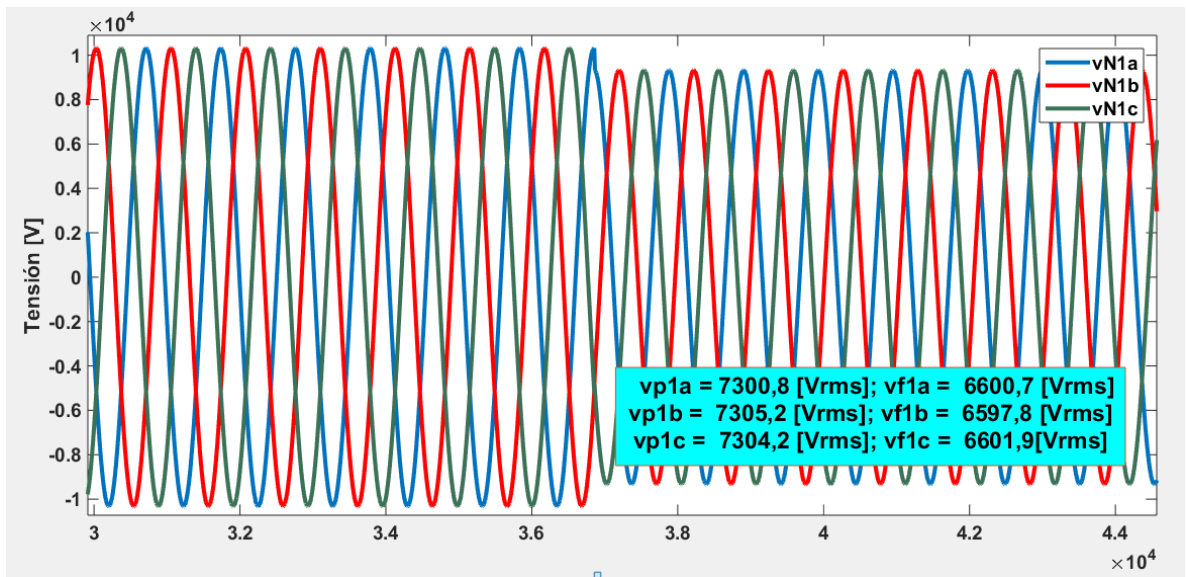
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,254408	6157,061587	0	11133,58864	4424,44782
B	7309,254408	6157,061587	0	11133,58864	4424,44782

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{f1}$	$I_{f2}$	$I_{f3}$	$I_{f4}$	$I_{f5}$	$I_{f6}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	11095	11124	11133	6843,2	11158	84,23696586	0,260697591	38,53229139	60,347304
B	70673	11163	11131	11202	6847,3	11227	84,24633362	0,286661292	38,87430816	60,59100543
Resultado suma deltas							168,4832995	0,547358883	77,40659955	120,9383094

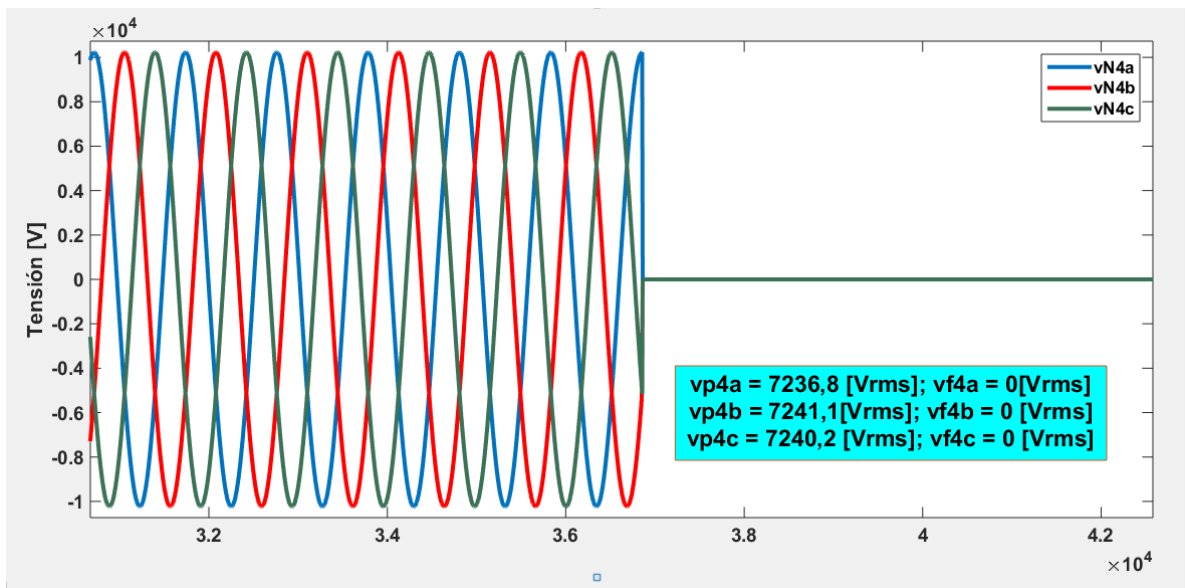
### A.1.3 Nodo eléctrico 3

#### Falla trifásica en el nodo 3

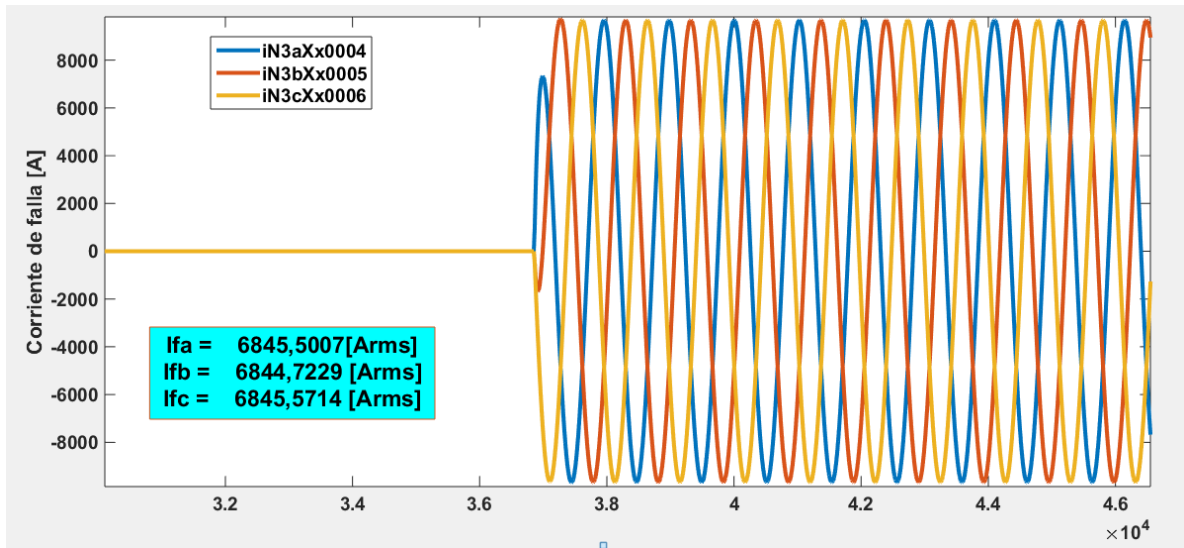
**Figura A25.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 3



**Figura A26.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 3



**Figura A27.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 3



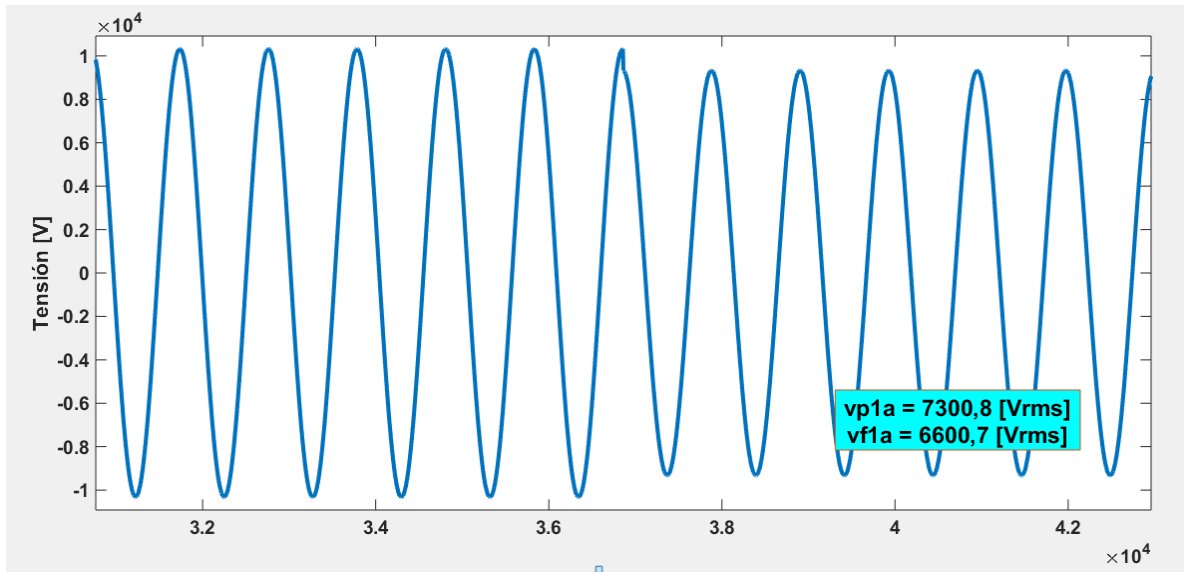
**Tabla A9.** Resultados falla trifásica en el nodo 3

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
<b>A</b>	7309,25441	6600,1347	0	6852,192644	4742,838959
<b>B</b>	7309,25441	6600,06398	0	6852,875918	4742,788147
<b>C</b>	7309,25441	6600,06398	0	6852,875918	4742,788147

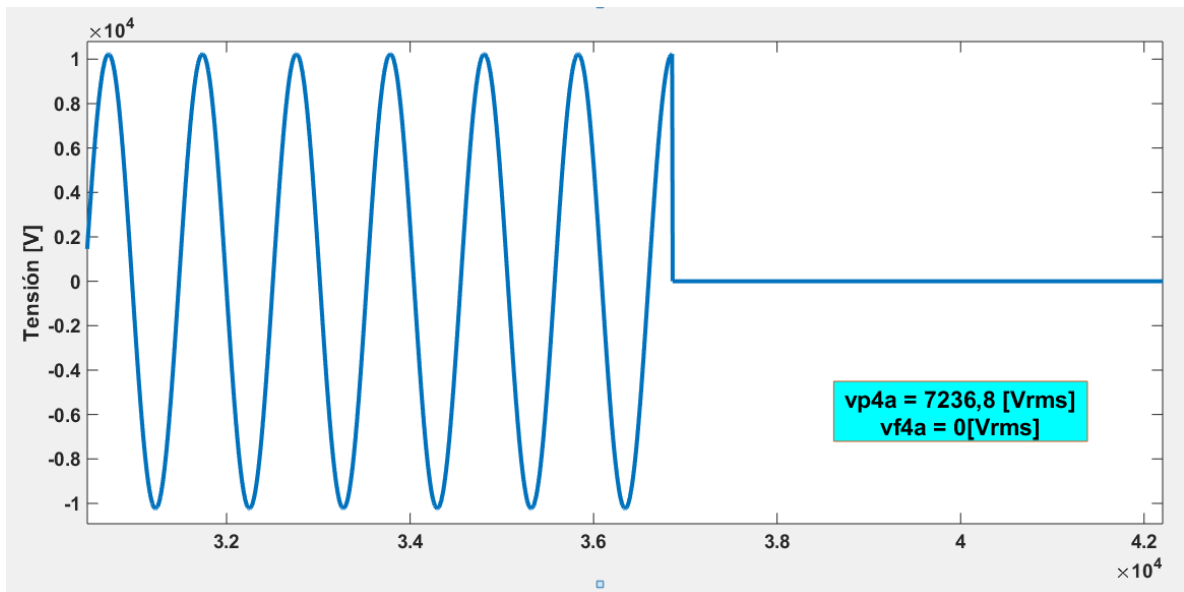
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
<b>A</b>	70631	6794,9	11124	6818,6	6843,2	6833,5	90,2986045	38,9167566	0,35948094	30,5942934
<b>B</b>	70673	6865,3	11131	6889,3	6847,3	6904,3	90,3034031	38,3227024	0,60964104	31,3067487
<b>C</b>	70664	6816,6	11130	6839,9	6846,4	6854,8	90,3021681	38,754717	0,09494041	30,8106999
<b>Resultado suma deltas</b>							270,904176	115,994176	<b>1,06406239</b>	92,711742

### Falla monofásica en el nodo 3

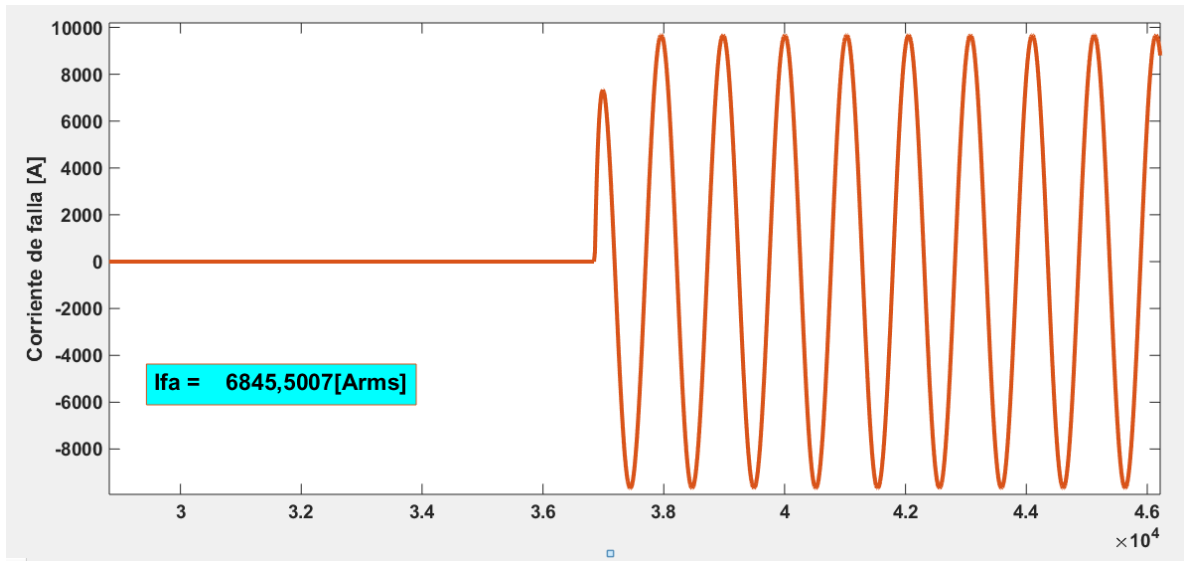
**Figura A28.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 3



**Figura A29.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 3



**Figura A30.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 3



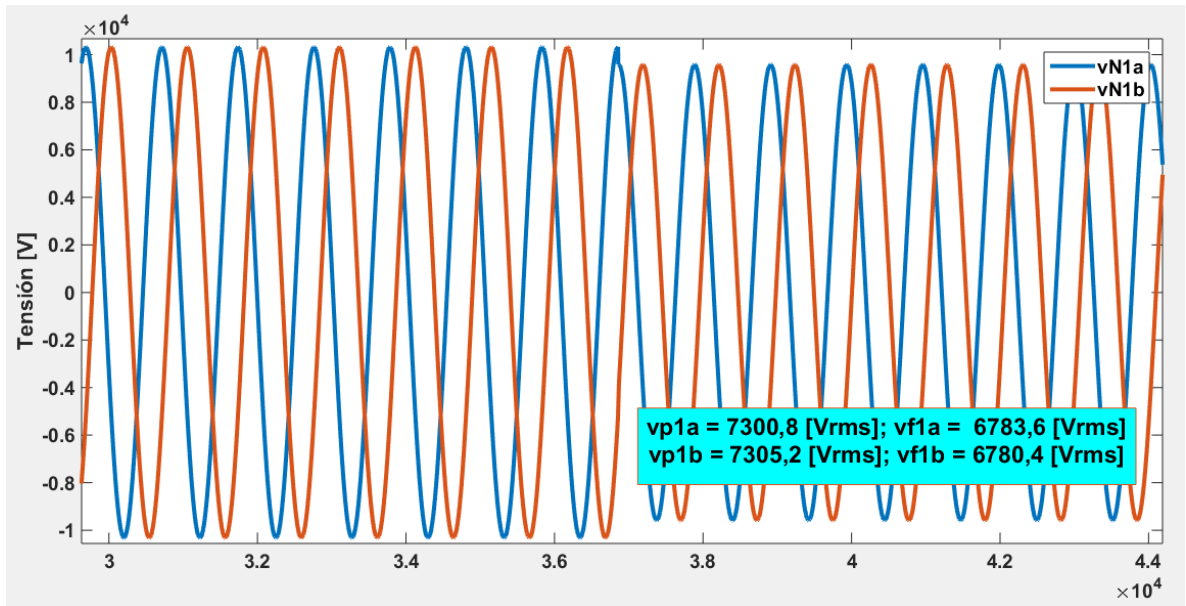
**Tabla A10.** Resultados falla monofásica en el nodo 3

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6600,1347	0	6852,19264	4742,83896

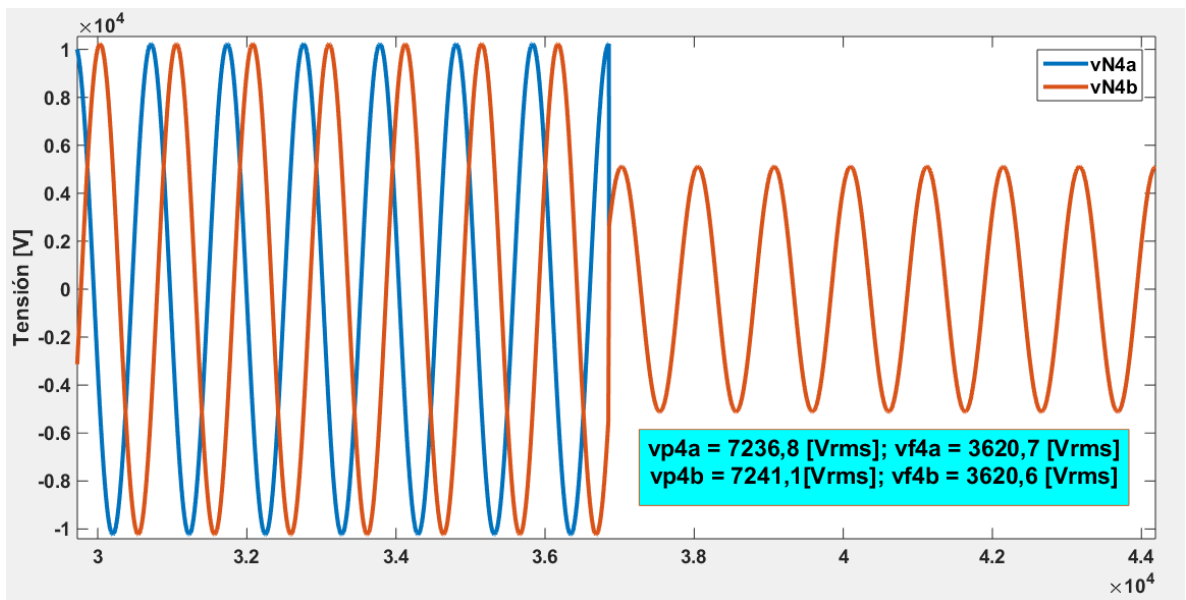
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	6794,9	11124	6818,6	6843,2	6833,5	90,2986045	38,9167566	0,35948094	30,5942934

**Falla línea – línea en el nodo 3**

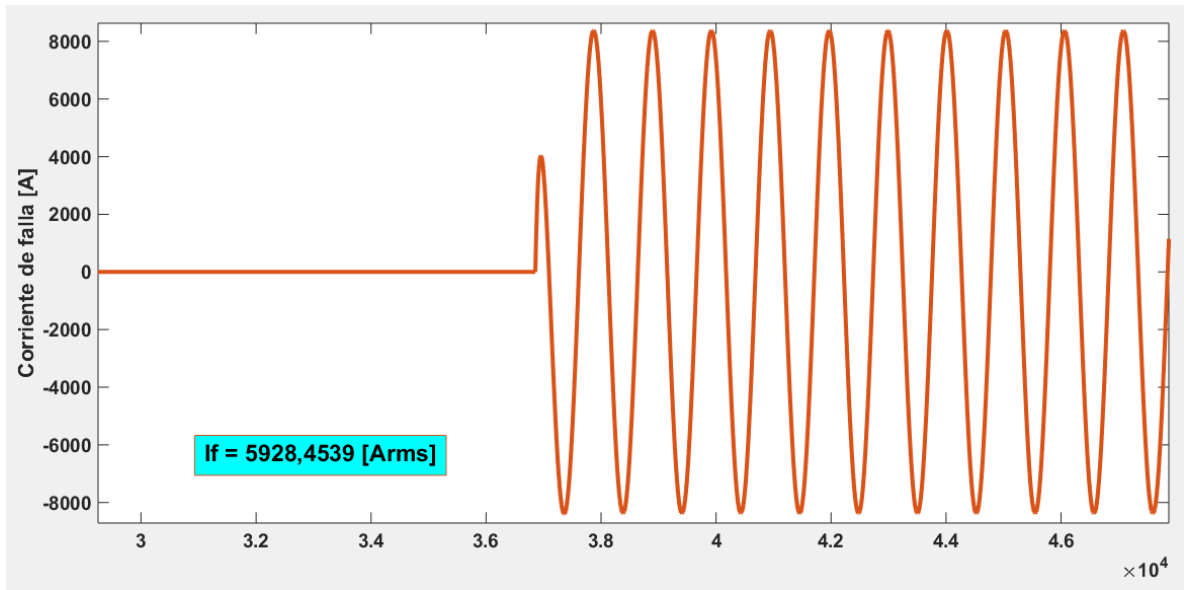
**Figura A31.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 3



**Figura A32.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 3



**Figura A33.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 3



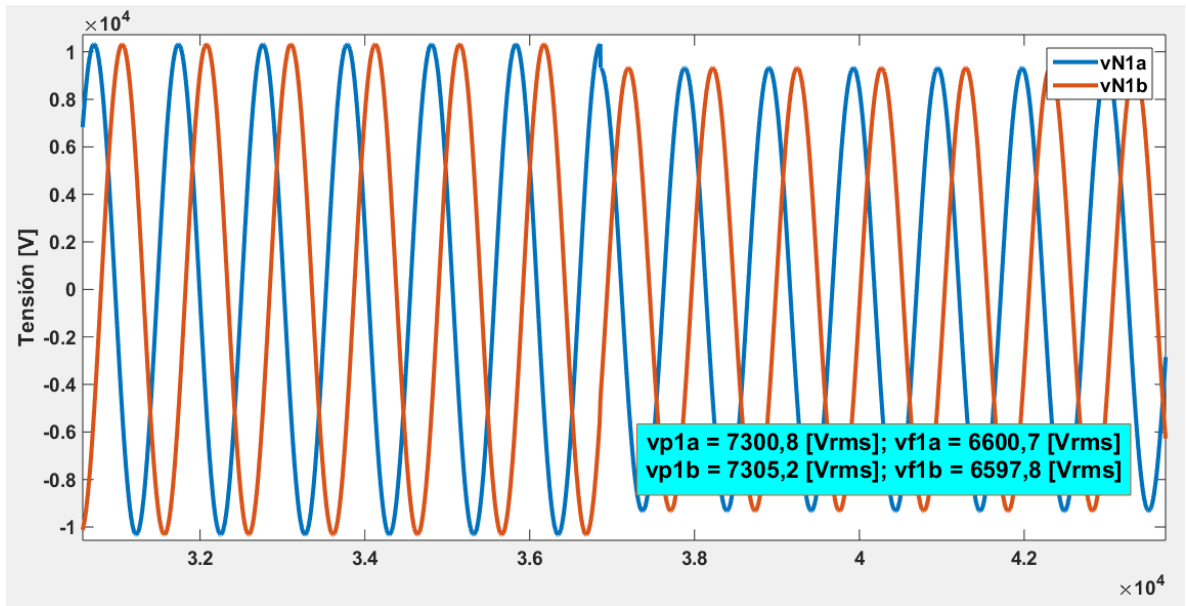
**Tabla A11.** Resultados falla bifásica en el nodo 3

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6782,70967	3619,67961	5087,97872	2272,94485
B	7309,25441	6782,85109	3619,67961	5086,61217	2273,04648

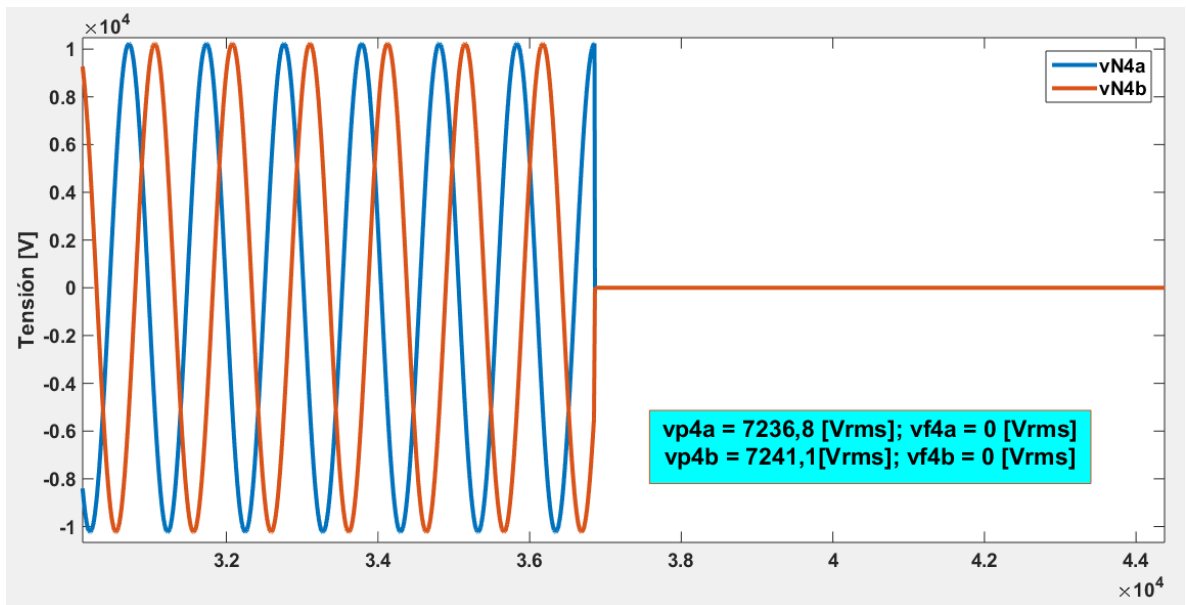
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	35293	5019,2	5558,2	5036,7	3419,5	5047,7	85,5836038	9,69738405	32,1083249	54,9706827
B	35336	5093,3	5565,4	5111	3423,6	5122,2	85,6050142	8,48276853	33,0150655	55,623629
<b>Resultado suma deltas</b>							171,188618	18,1801526	65,1233904	110,594312

**Falla línea – línea a tierra en el nodo 3**

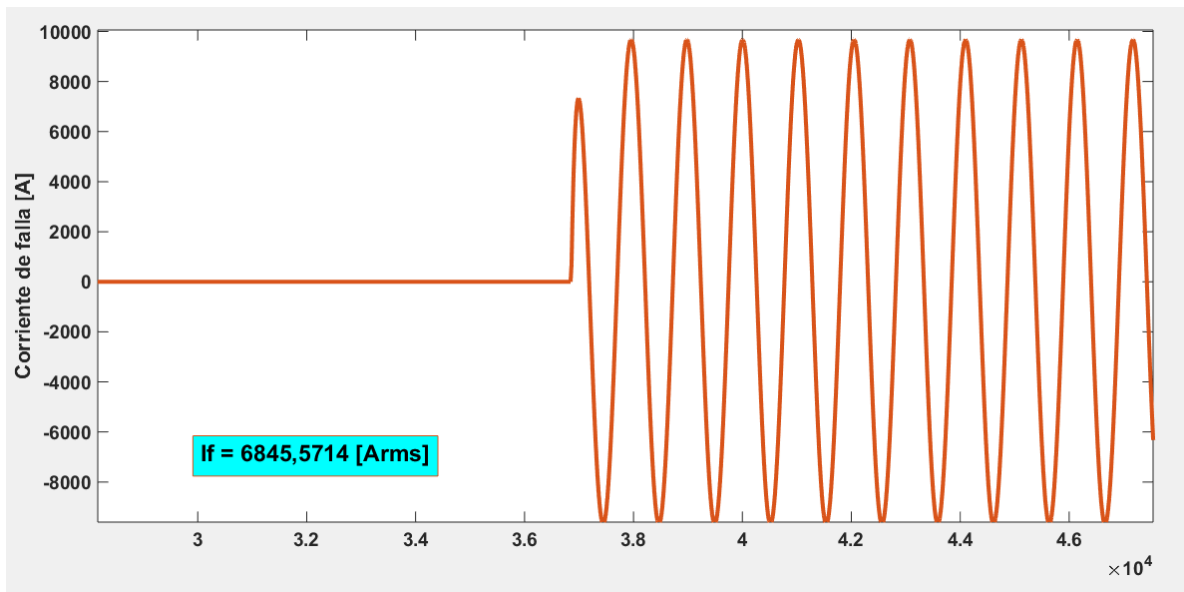
**Figura A34.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 3



**Figura A35.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 3



**Figura A36.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 3



**Tabla A12.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 3

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,254408	6600,134696	0	6852,192644	4742,838959
B	7309,254408	6600,134696	0	6852,192644	4742,838959

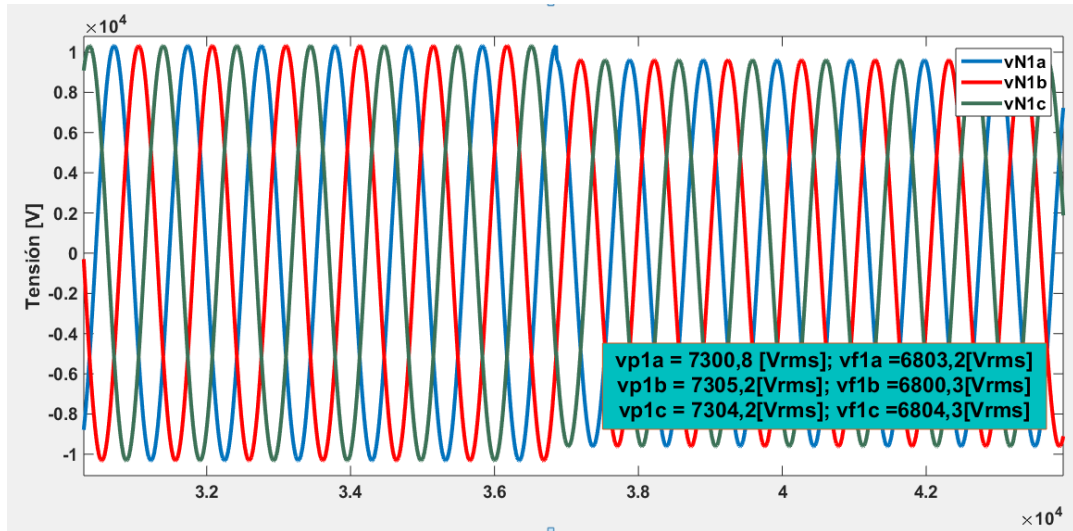
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	6794,9	11124	6818,6	6843,2	6833,5	90,29860452	38,91675656	0,359480945	30,59429342
B	70673	6865,3	11131	6889,3	6847,3	6904,3	90,30436992	38,32270236	0,609641038	31,30601279
<b>Resultado suma deltas</b>							180,6029744	77,23945893	0,969121982	61,90030621

## A.2 Simulación de cada tipo de falla en los nodos eléctricos de la zona 2

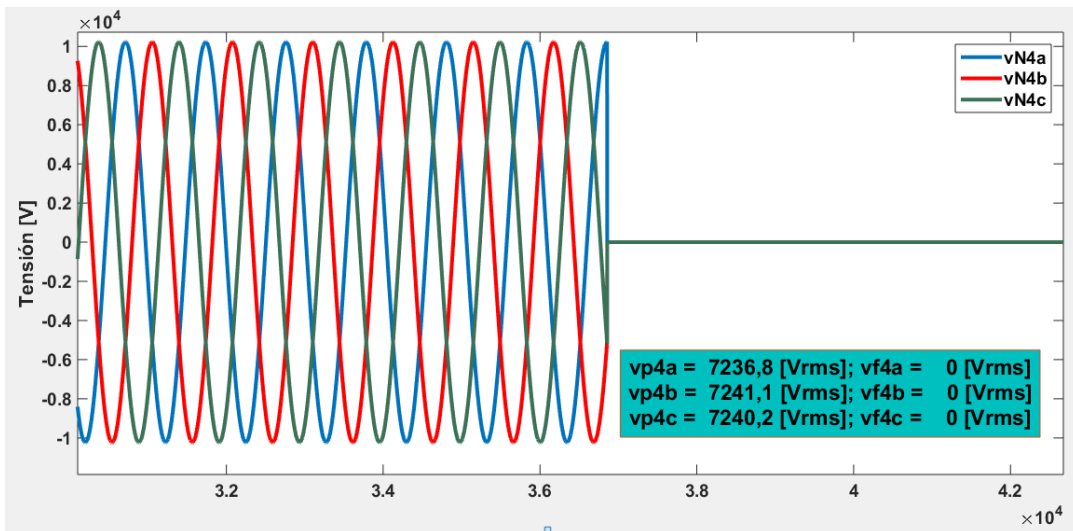
### A.2.1 Nodo eléctrico 4

## Falla trifásica en el nodo 4

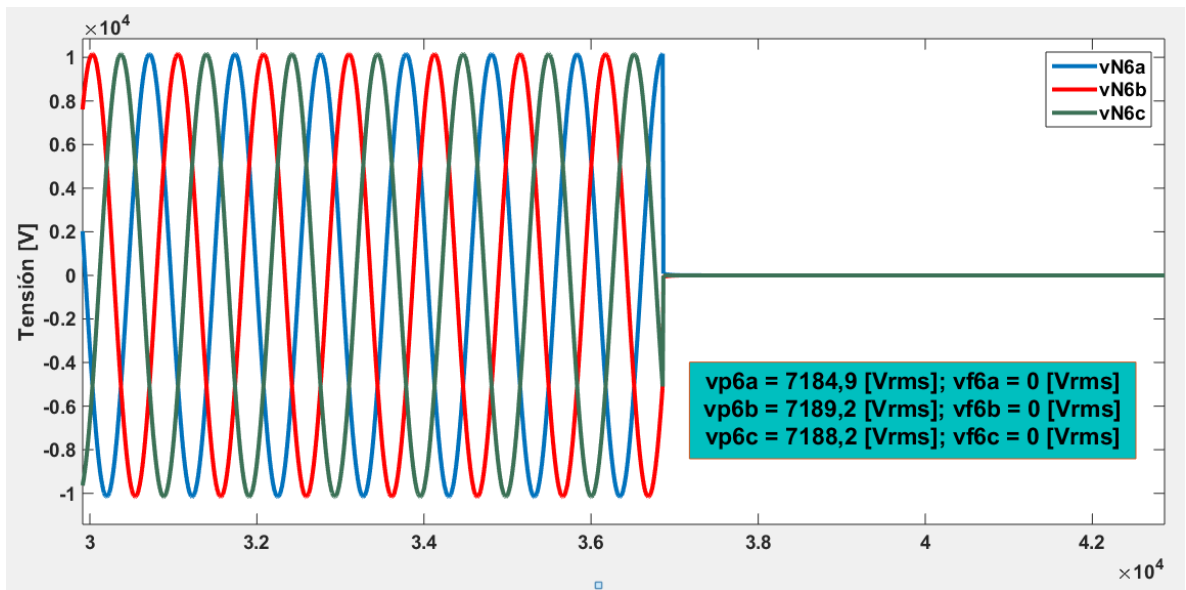
**Figura A37.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 4



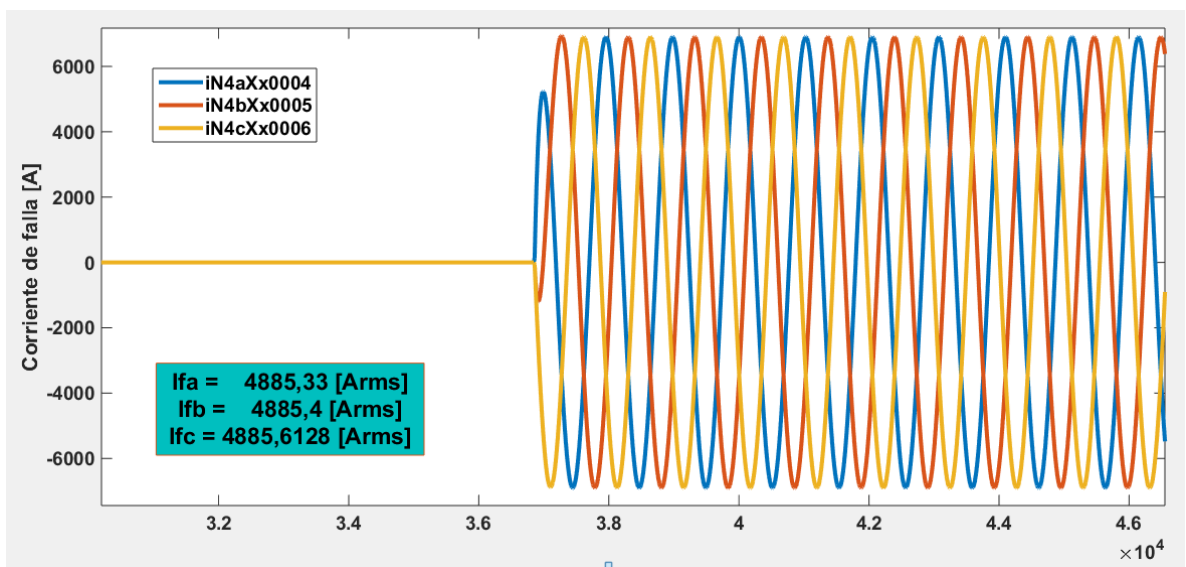
**Figura A38.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 4



**Figura A39.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 4



**Figura A40.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 4



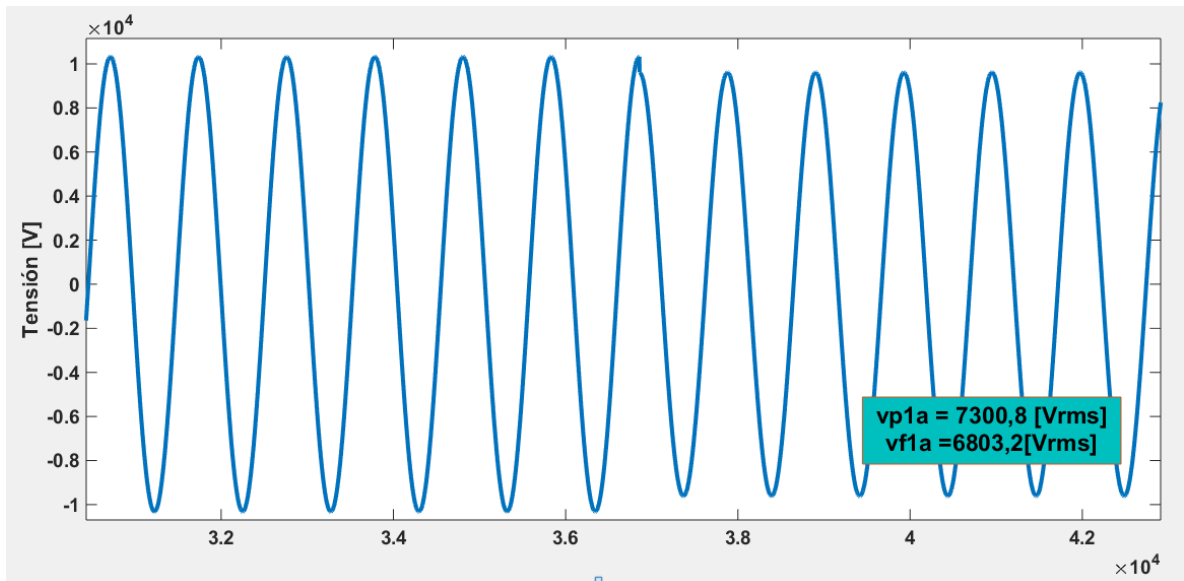
**Tabla A13.** Resultados falla trifásica en el nodo 4

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	6802,57937	0	0	4888,315153	0
B	6802,57937	0	0	4888,315153	0
C	6802,57937	0	0	4888,315153	0

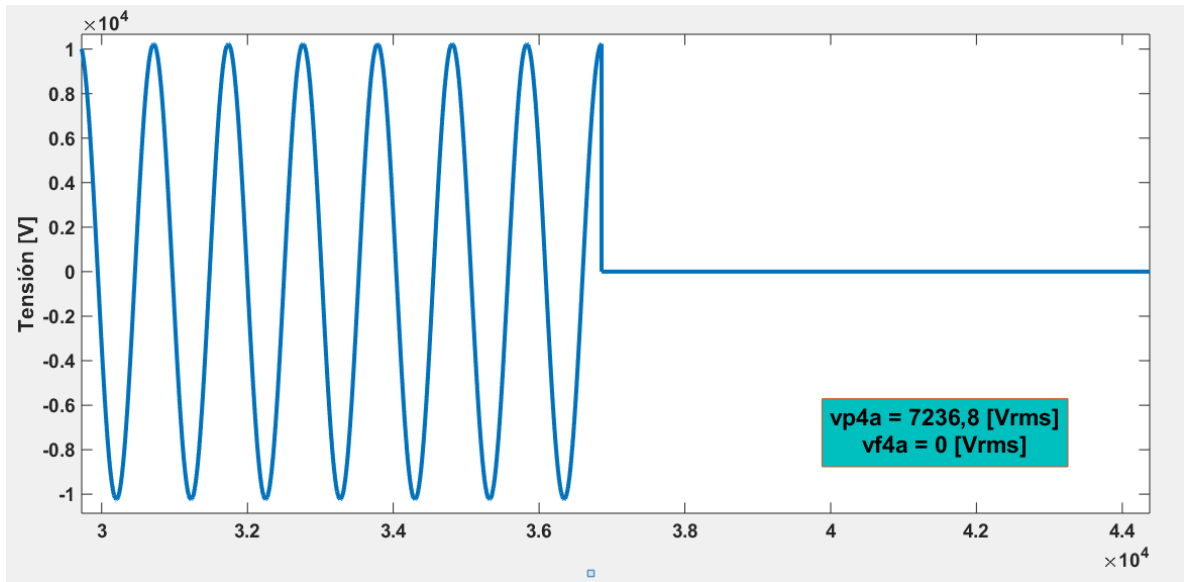
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	4909,3	2851,8	4919,2	0,09032055	41,910252	100
B	4886,9	4912,3	2853,5	4922,2	0,02894971	41,9111211	100
C	4886,2	4911,6	2853,1	4921,5	0,04326957	41,9109862	100
Resultado suma deltas					0,16253983	125,732359	300

### Falla monofásica en el nodo 4

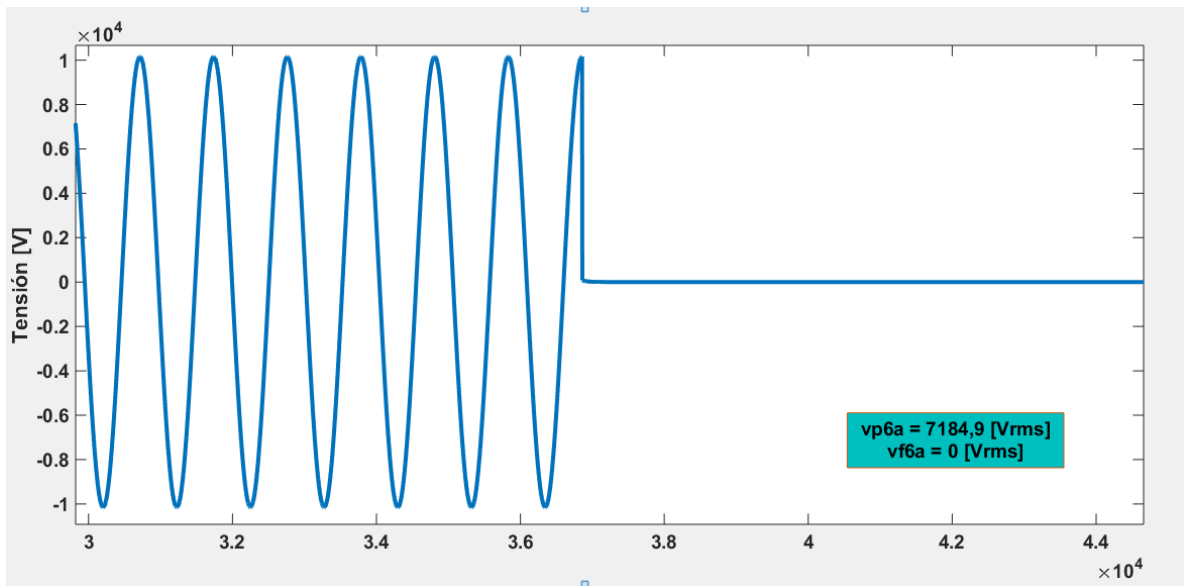
Figura A41. Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 4



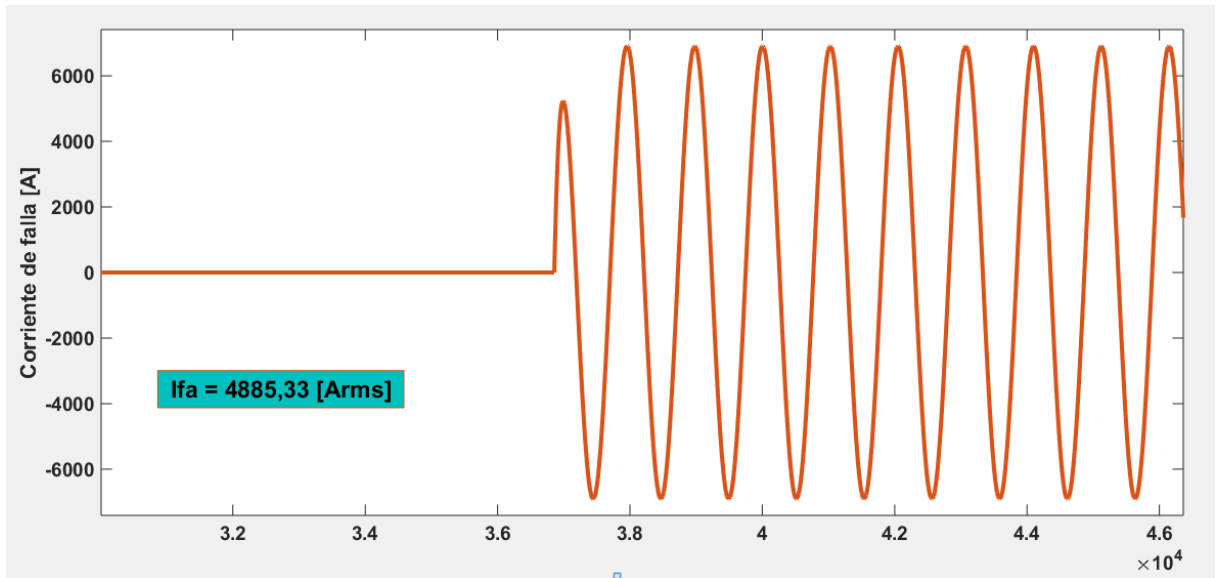
**Figura A42.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 4



**Figura A43.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 4



**Figura A44.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 4



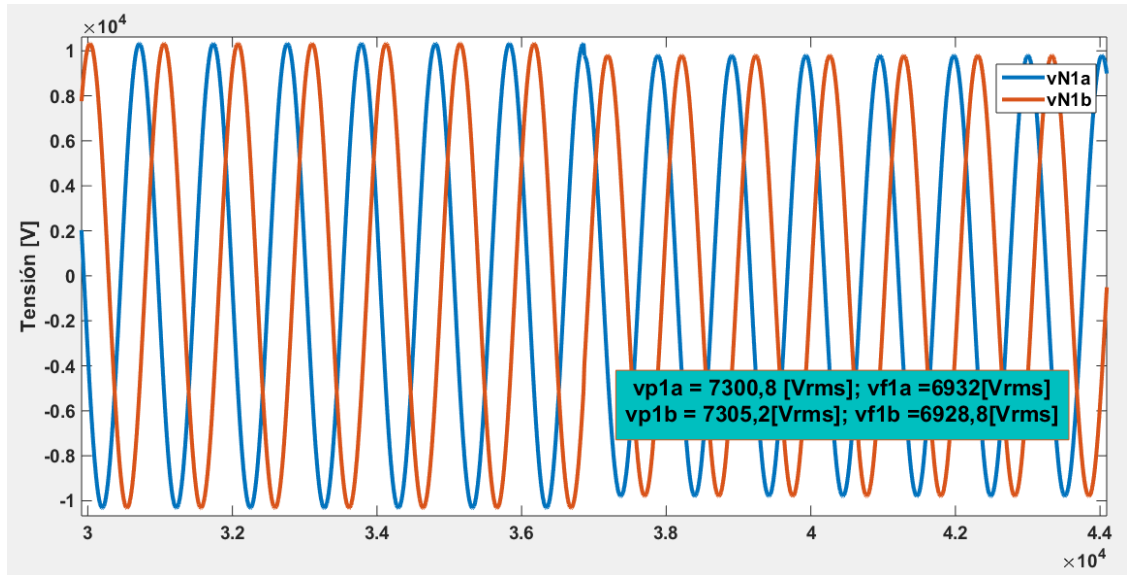
**Tabla A14.** Resultados falla monofásica en el nodo 4

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	6802,57937	0	0	4888,31515	0

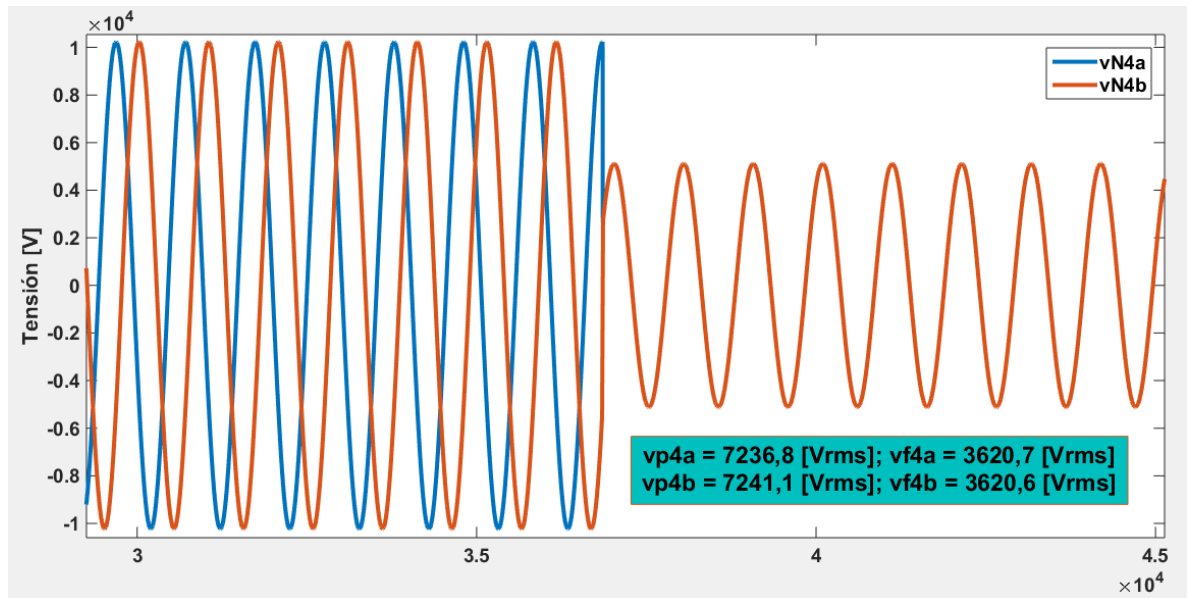
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	4909,3	2851,8	4919,2	0,09032055	41,910252	100

## Falla línea – línea en el nodo 4

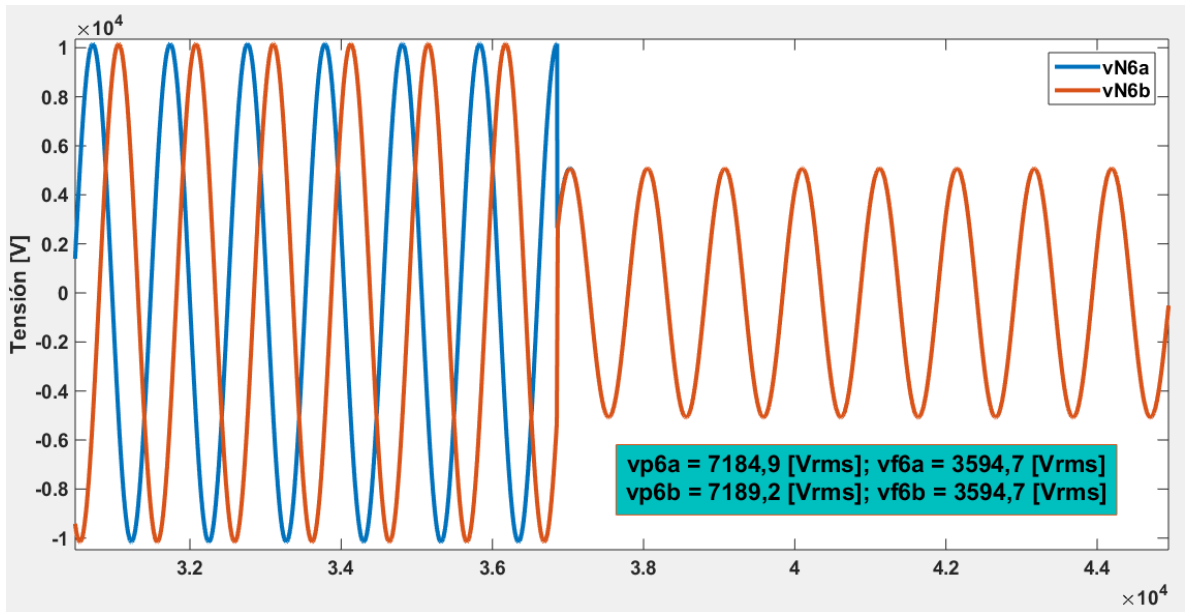
**Figura A45.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 4



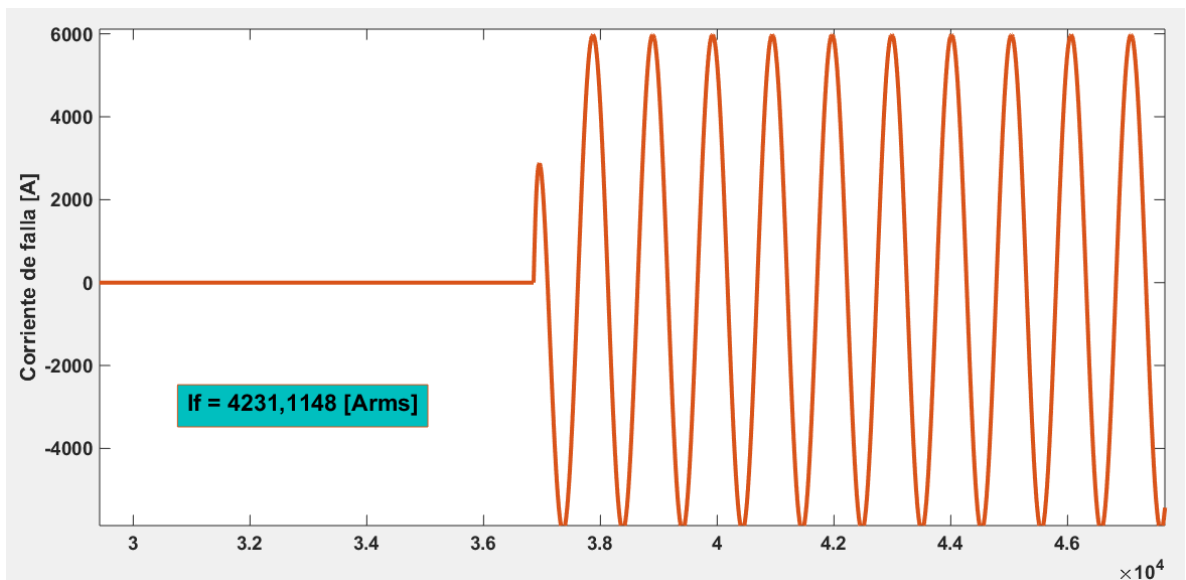
**Figura A46.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 4



**Figura A47.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 4



**Figura A48.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 4



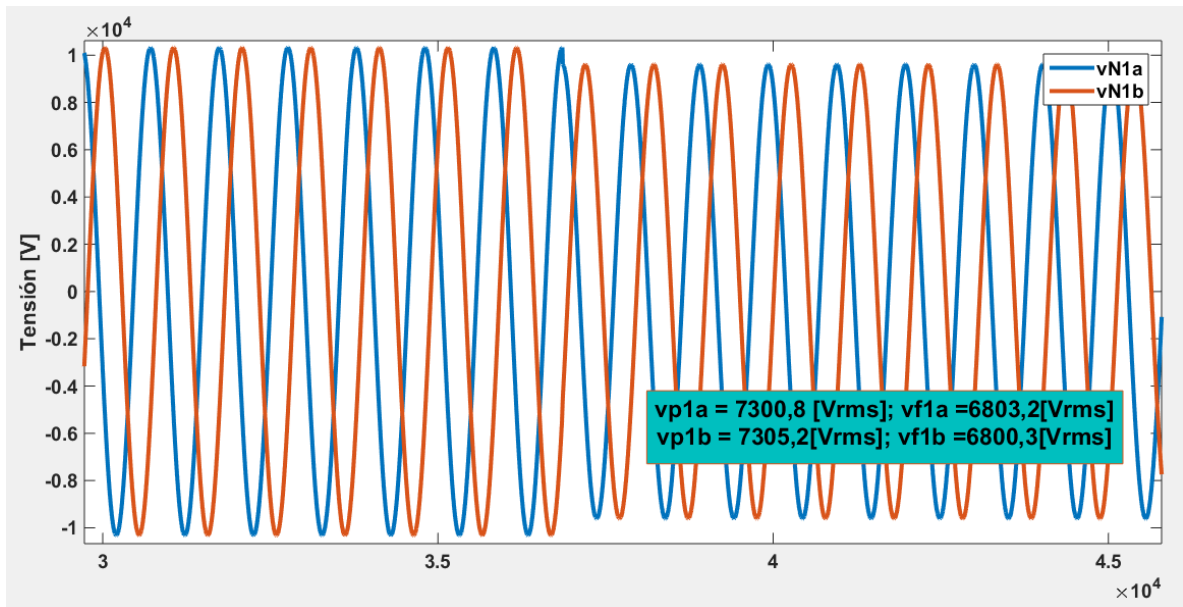
**Tabla A15.** Resultados falla bifásica en el nodo 4

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
<b>A</b>	6931,2728	3619,6089	3593,58737	2379,75273	15,6351196
<b>B</b>	6931,2728	3619,67961	3593,72879	2379,70192	15,5926329

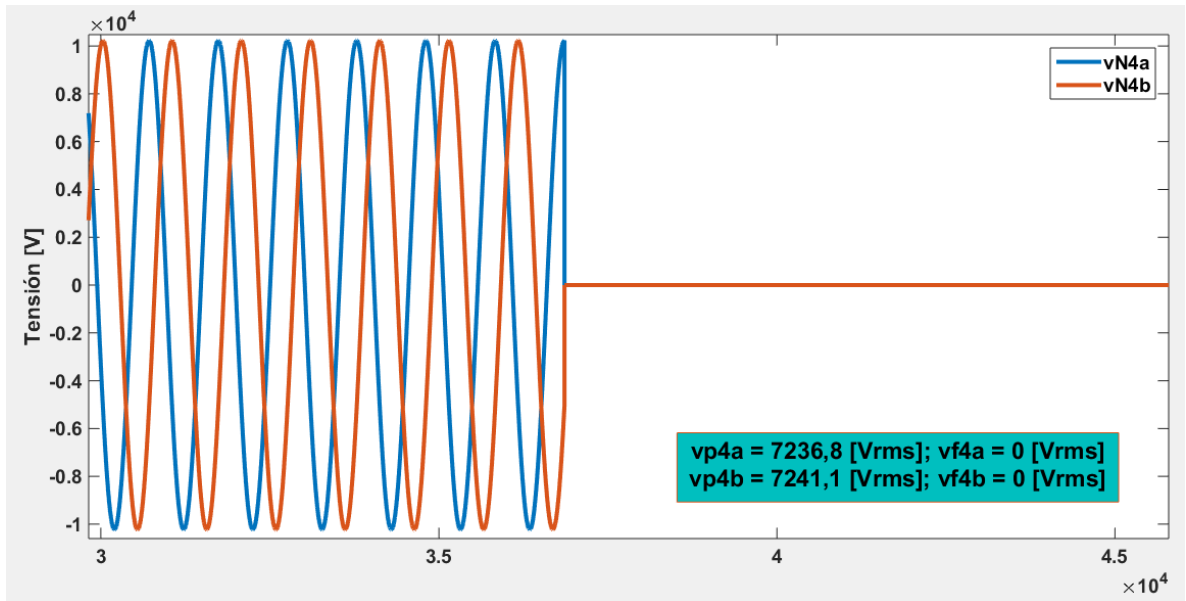
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
<b>A</b>	2440,4	2453,1	1425	2458,1	2,48513645	41,910236	99,3639348
<b>B</b>	2443,4	2456,1	1426,7	2461	2,60694453	41,9119743	99,3664107
<b>Resultado suma deltas</b>					<b>5,09208098</b>	83,8222103	198,730345

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 4

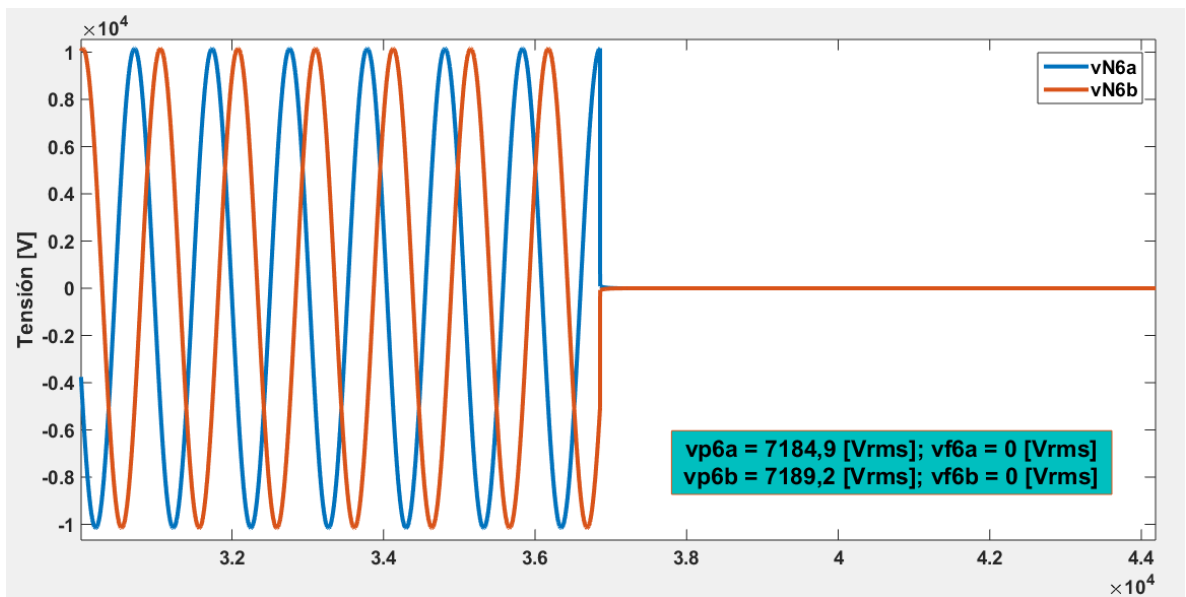
**Figura A49.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 4



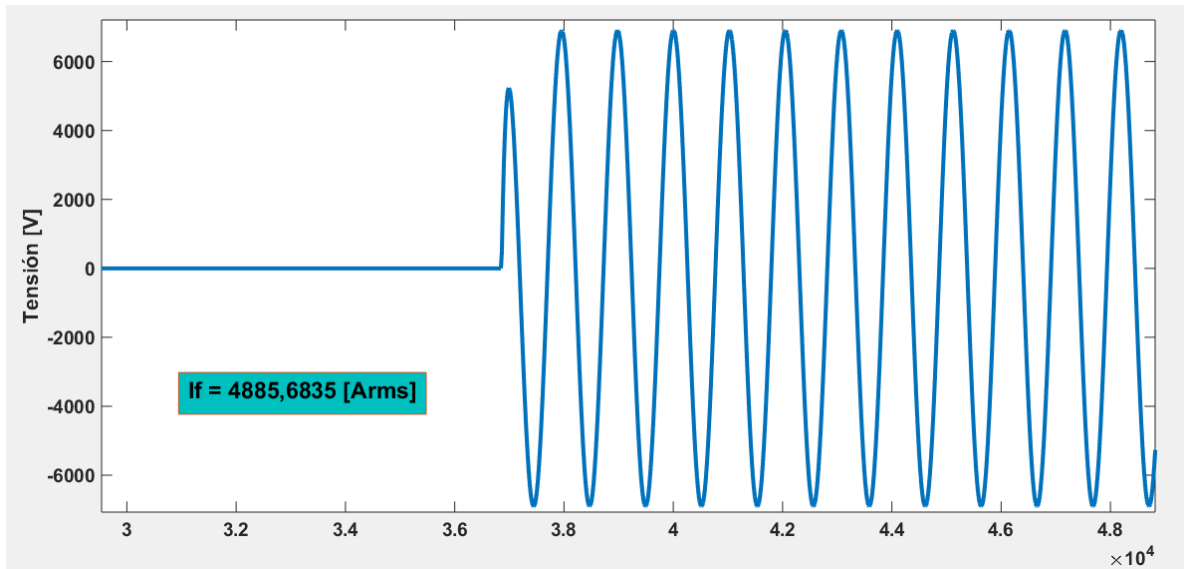
**Figura A50.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 4



**Figura A51.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 4



**Figura A52.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 4



**Tabla A16.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 4

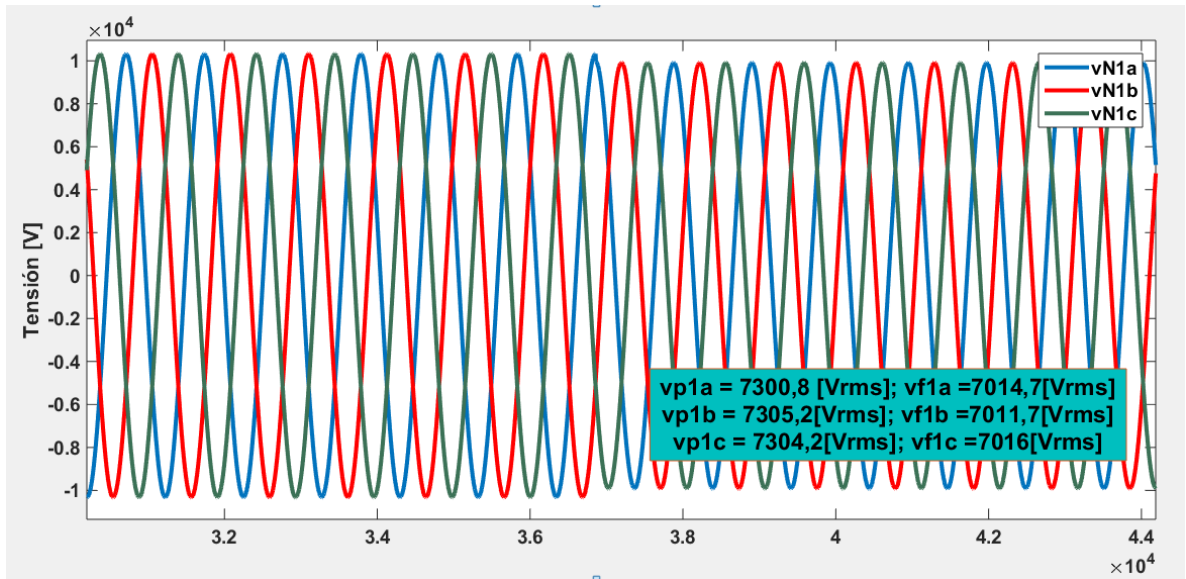
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	6802,579367	0	0	4888,315153	0
B	6802,579367	0	0	4888,315153	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	4909,3	2851,8	4919,2	0,090320549	41,91025197	100
B	4886,9	4912,3	2853,5	4922,2	0,028949711	41,91112106	100
Resultado suma deltas					0,11927026	83,82137303	200

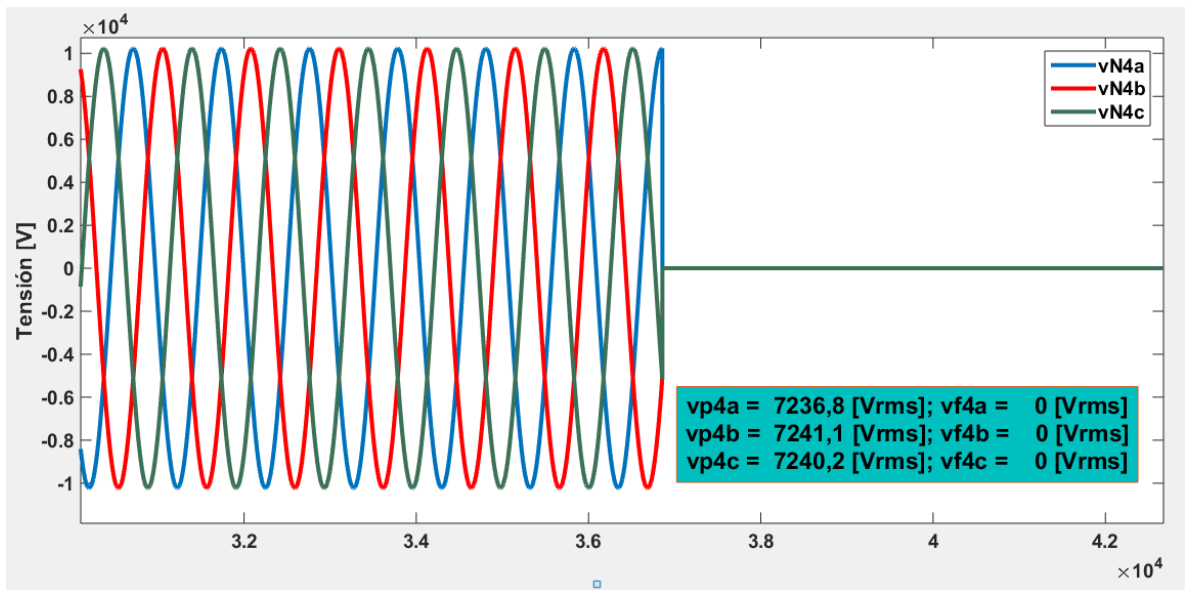
## A.2.2 Nodo eléctrico 5

### Falla trifásica en el nodo 5

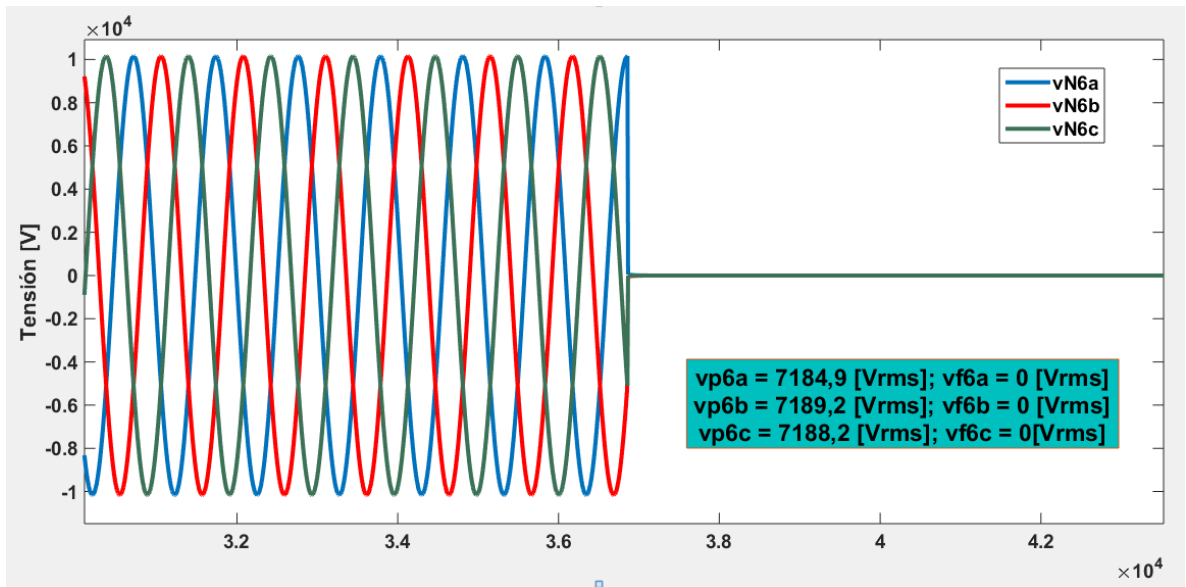
**Figura A53.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 5



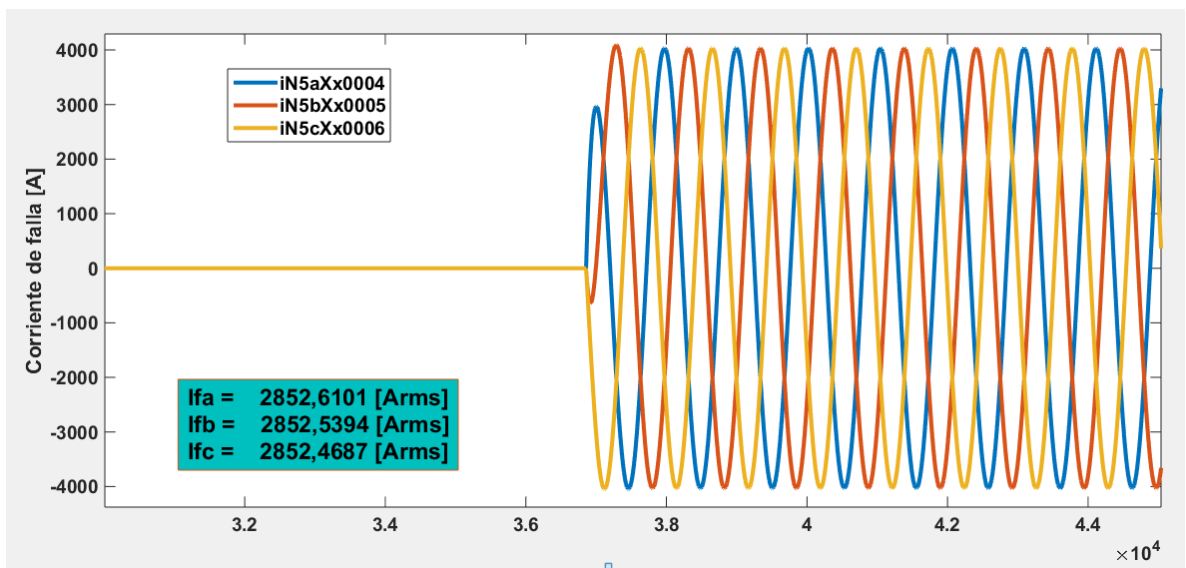
**Figura A54.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 5



**Figura A55.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 5



**Figura A56.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 5



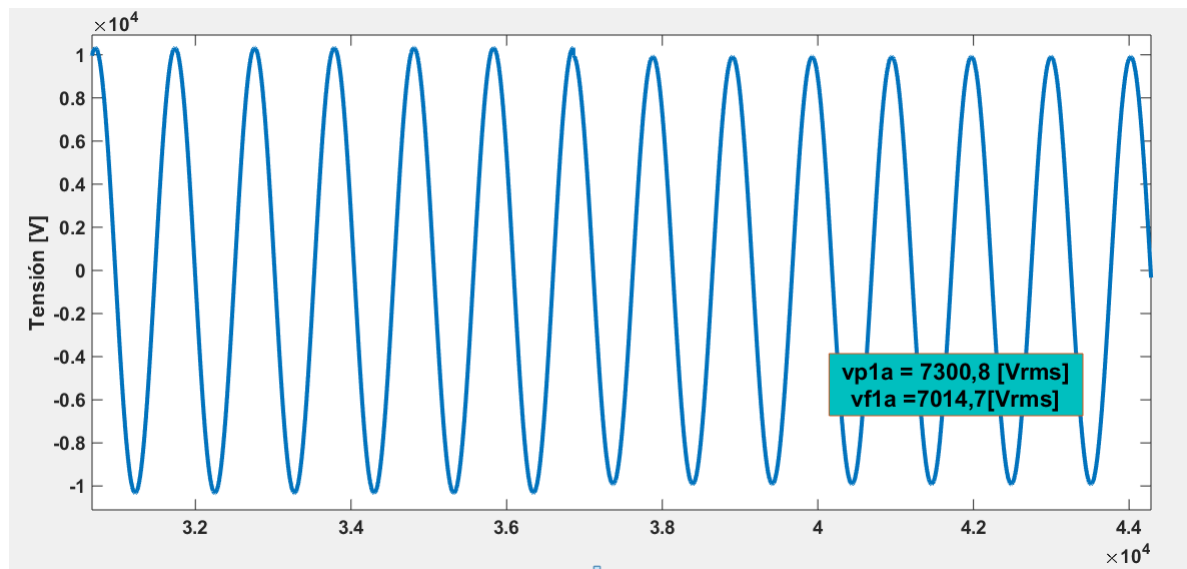
**Tabla A17.** Resultados falla trifásica en el nodo 5

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>6</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>6</sub>
A	7013,79216	3086,5211	0	2822,126374	1854,546115
B	7014,00429	3086,5211	0	2822,278812	1854,546115
C	7014,00429	3086,5211	0	2822,278812	1854,546115

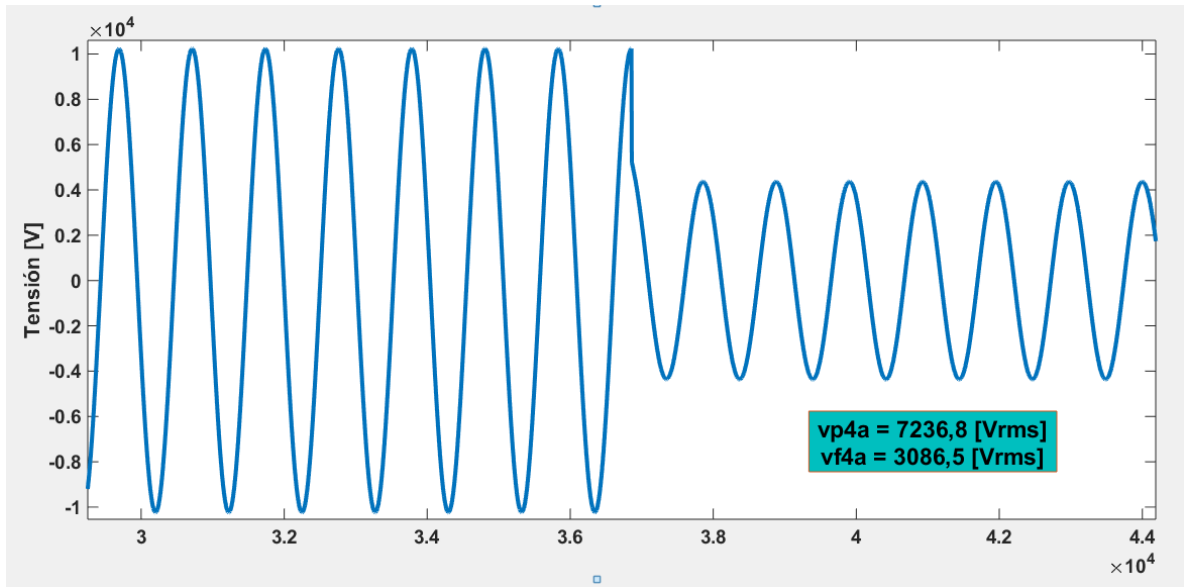
Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]				Deltas		
	I <sub>64</sub>	I <sub>45</sub>	I <sub>65</sub>	I <sub>46</sub>	δ <sub>4</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>6</sub>
A	4883,9	2815,5	2851,8	2821,2	42,2157216	1,27288029	34,2639262
B	4886,9	2819,1	2853,5	2824,7	42,2480752	1,20553706	34,3453777
C	4886,2	2817,1	2853,1	2822,7	42,2398016	1,26178543	34,2988587
Resultado suma deltas					126,703598	3,74020277	102,908163

### Falla monofásica en el nodo 5

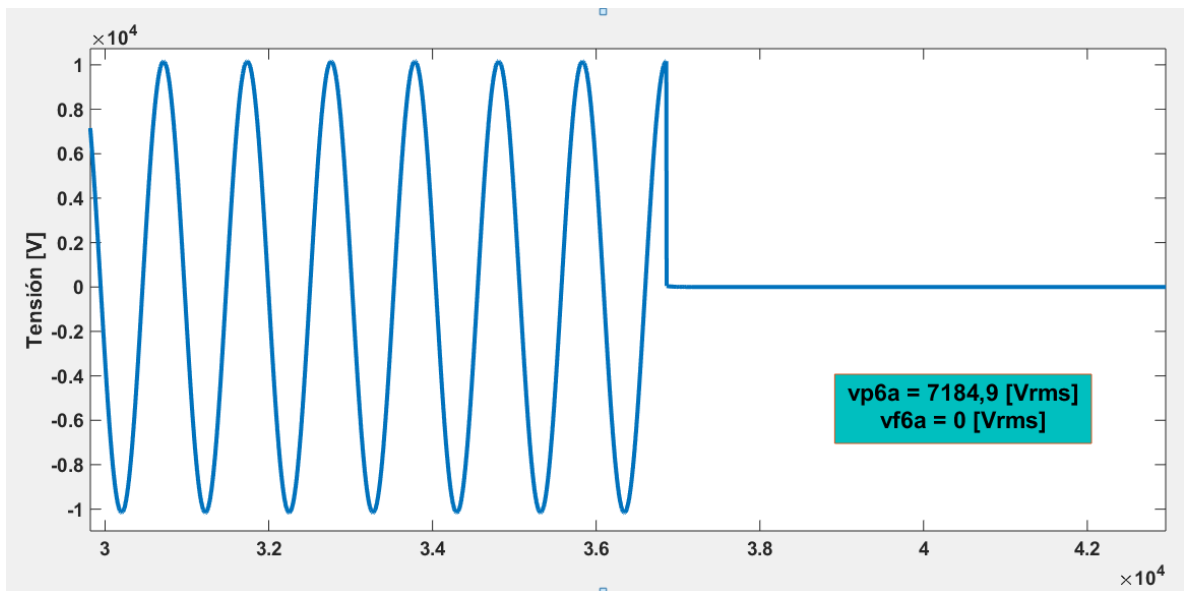
**Figura A57.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



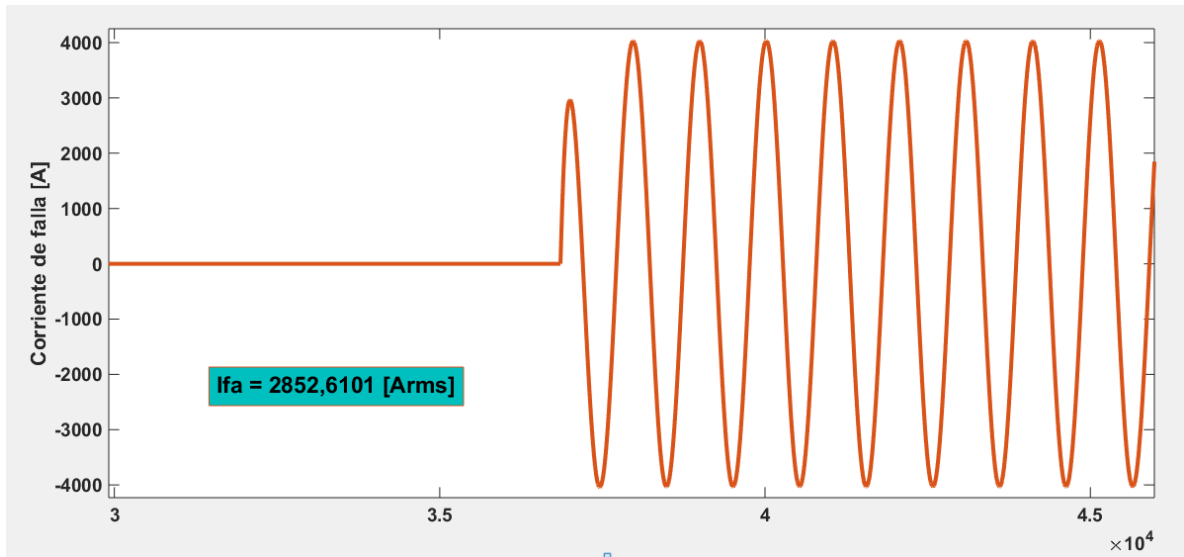
**Figura A58.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura A59.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura A60.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 5



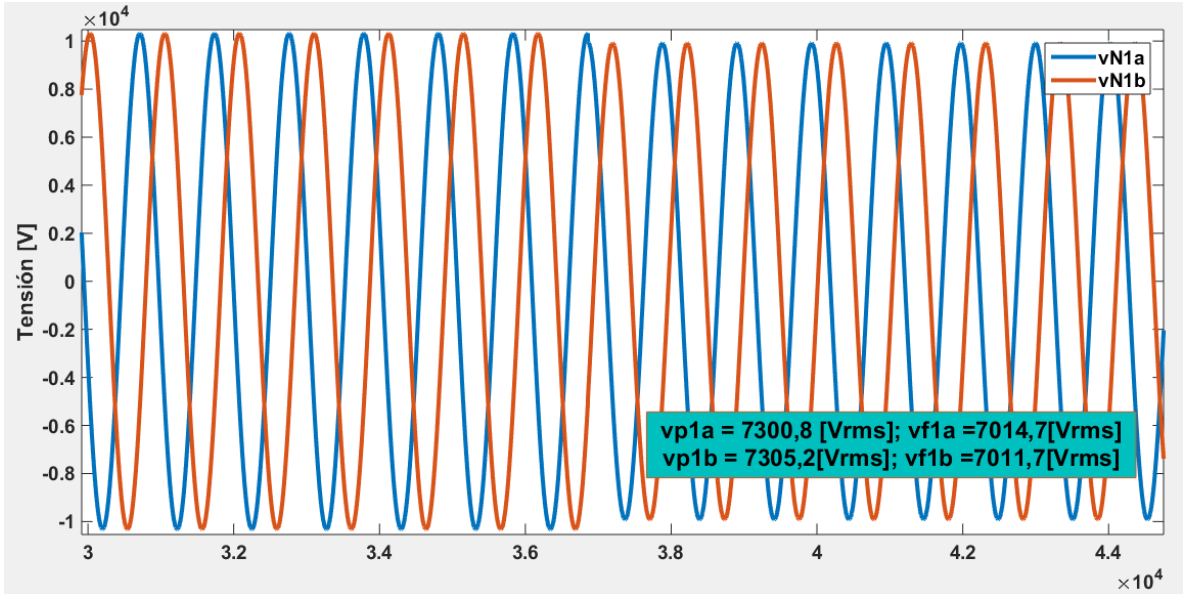
**Tabla A18.** Resultados falla monofásica en el nodo 5

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
<b>A</b>	7013,79216	3086,5211	0	2822,12637	1854,54612

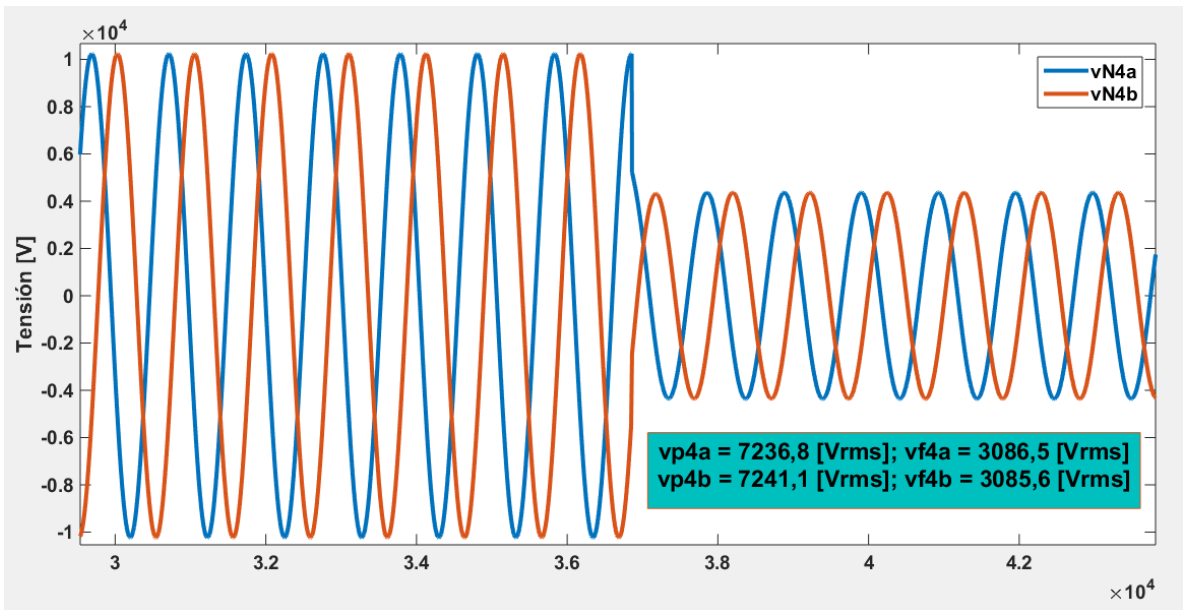
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
<b>A</b>	4883,9	2815,5	2851,8	2821,2	42,2157216	1,27288029	34,2639262

## Falla línea – línea en el nodo 5

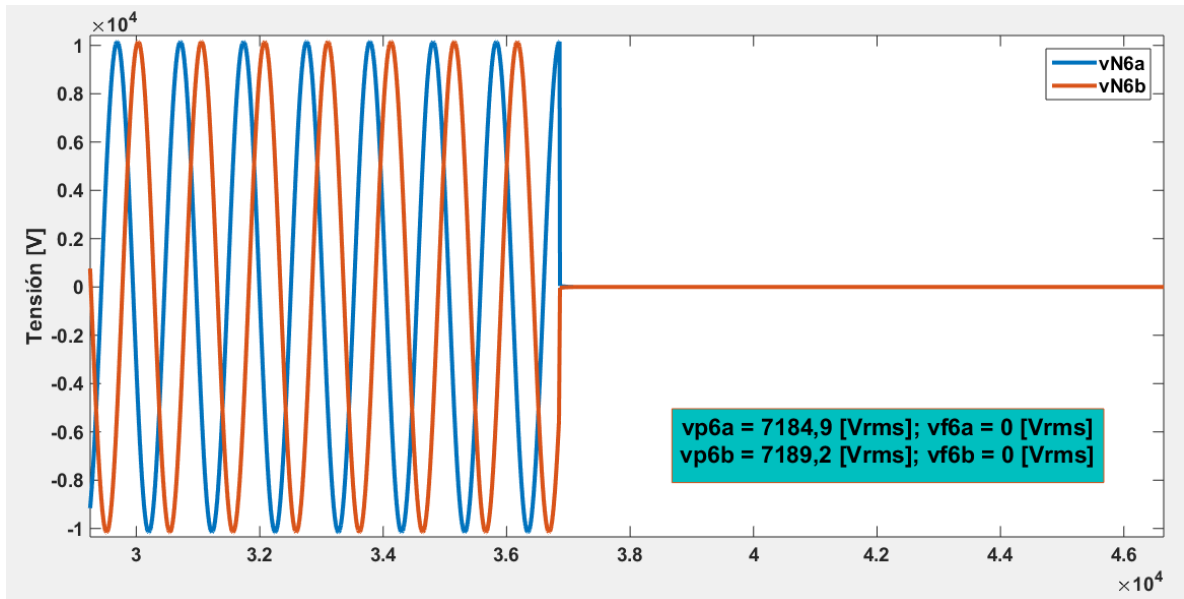
**Figura A61.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 5



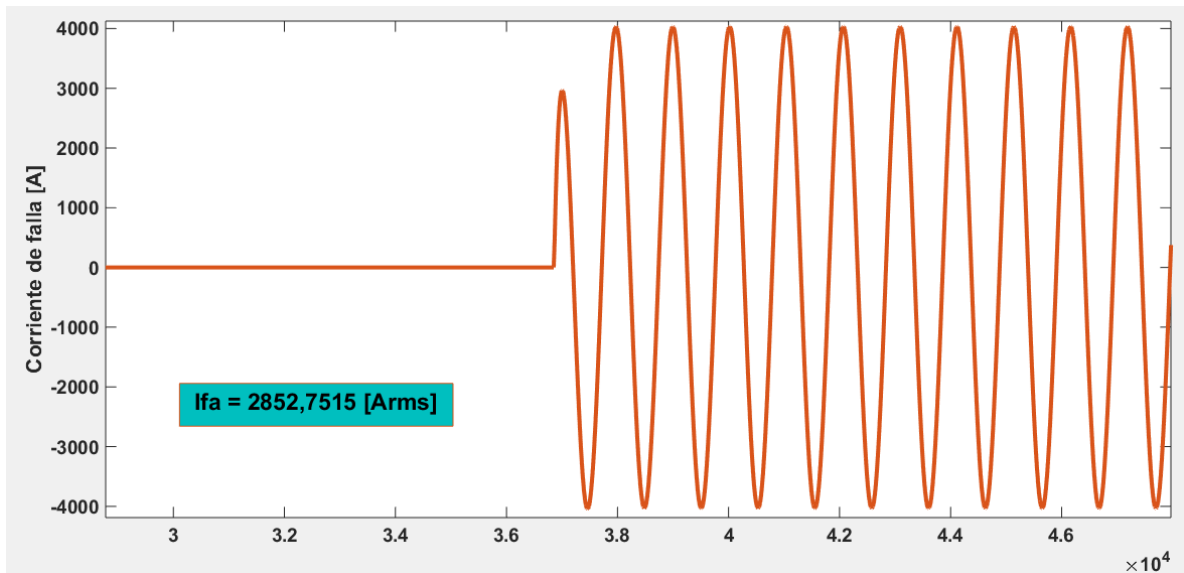
**Figura A62.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura A63.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 5



**Figura A64.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 5



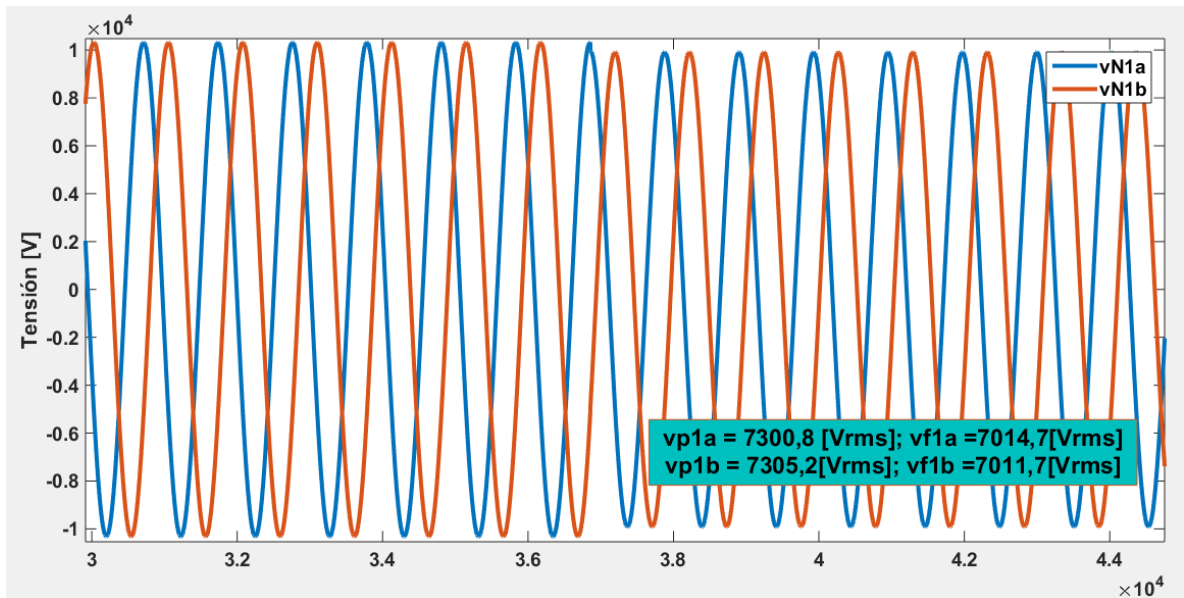
**Tabla A19.** Resultados falla bifásica en el nodo 5

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
<b>A</b>	7014,07501	3086,5211	0	2822,32962	1854,54612
<b>B</b>	7014,07501	3086,5211	0	2822,32962	1854,54612

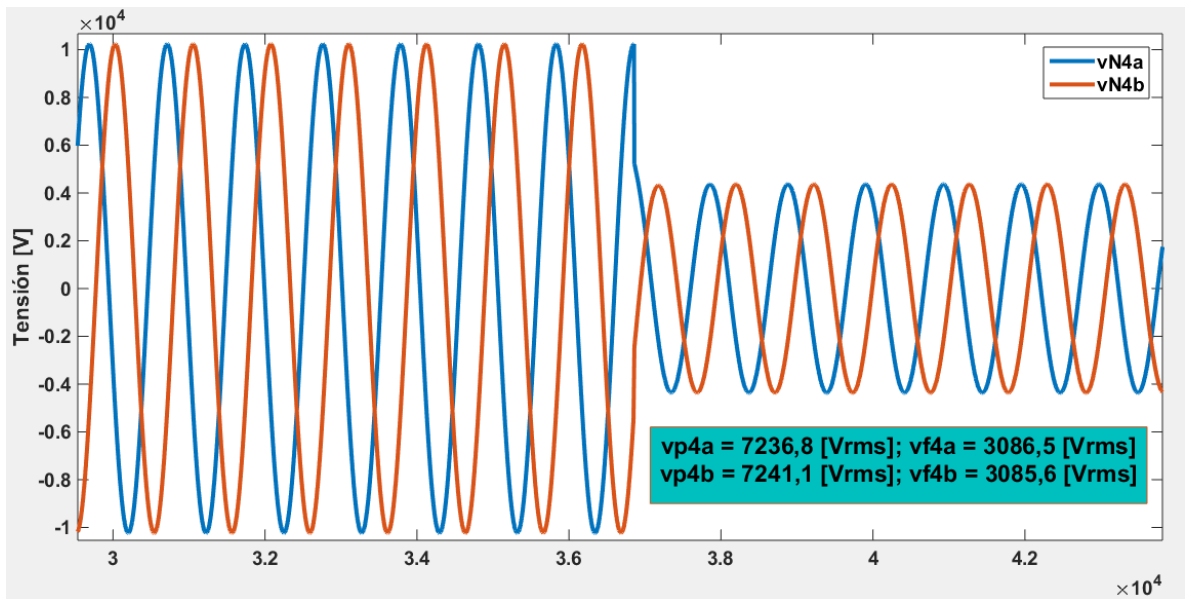
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
<b>A</b>	4883,9	2815,5	2851,8	2821,2	42,2115599	1,27288029	34,2639262
<b>B</b>	4886,9	2819,1	2853,5	2824,7	42,2470355	1,20553706	34,3453777
<b>Resultado suma deltas</b>					84,4585954	<b>2,47841735</b>	68,6093039

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 5

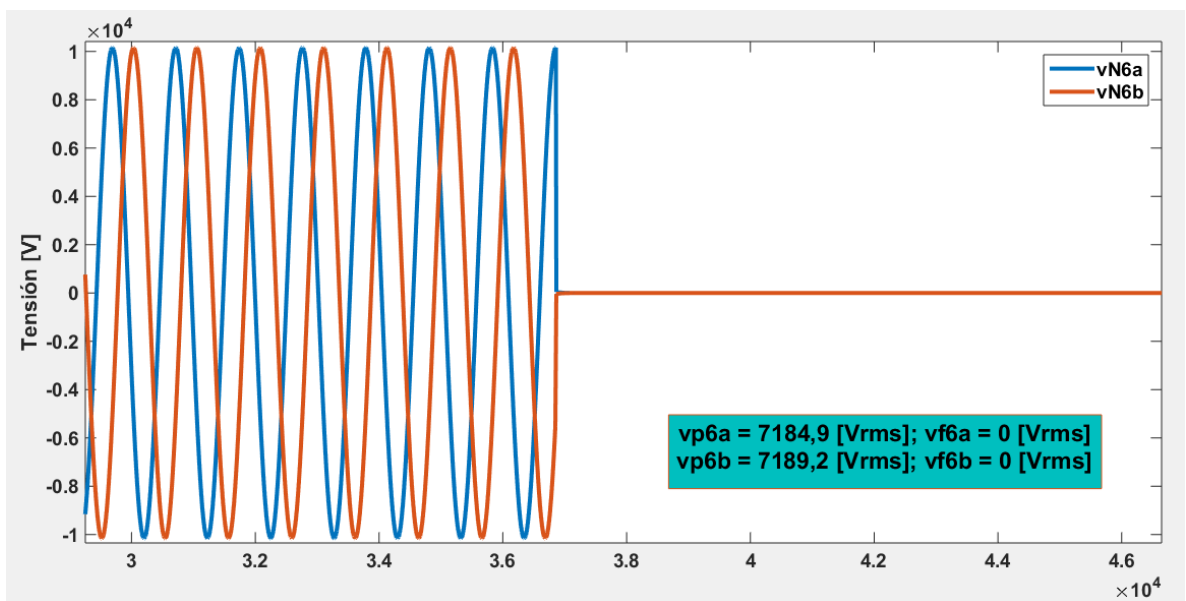
**Figura A65.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 5



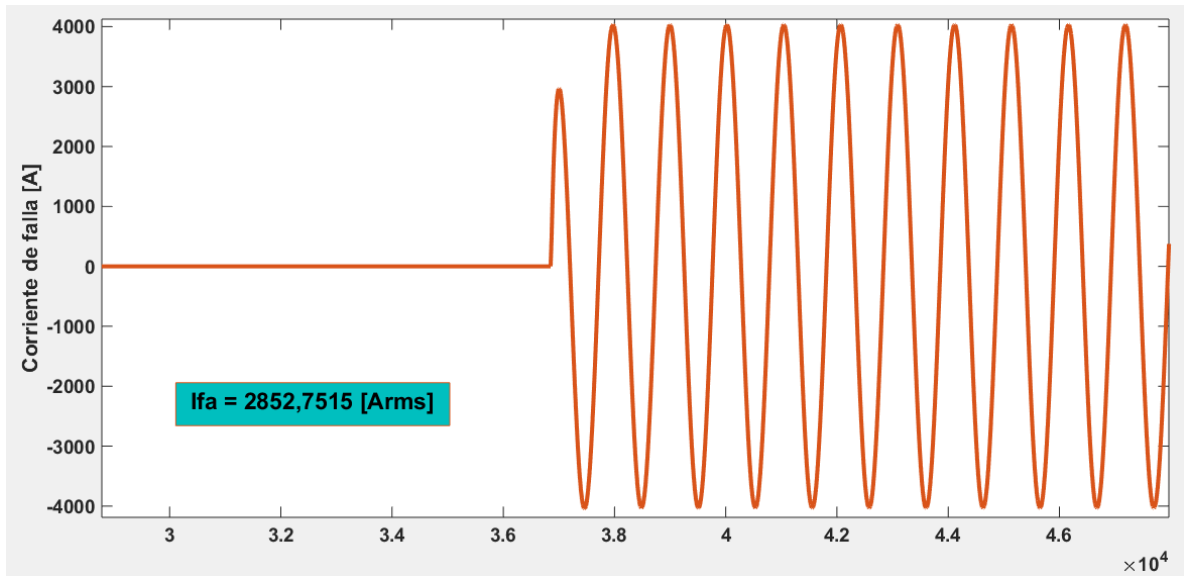
**Figura A66.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 5



**Figura A67.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 5



**Figura A68.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 5



**Tabla A20.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 5

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	7014,075005	3086,5211	0	2822,329624	1854,546115
B	7014,075005	3086,5211	0	2822,329624	1854,546115

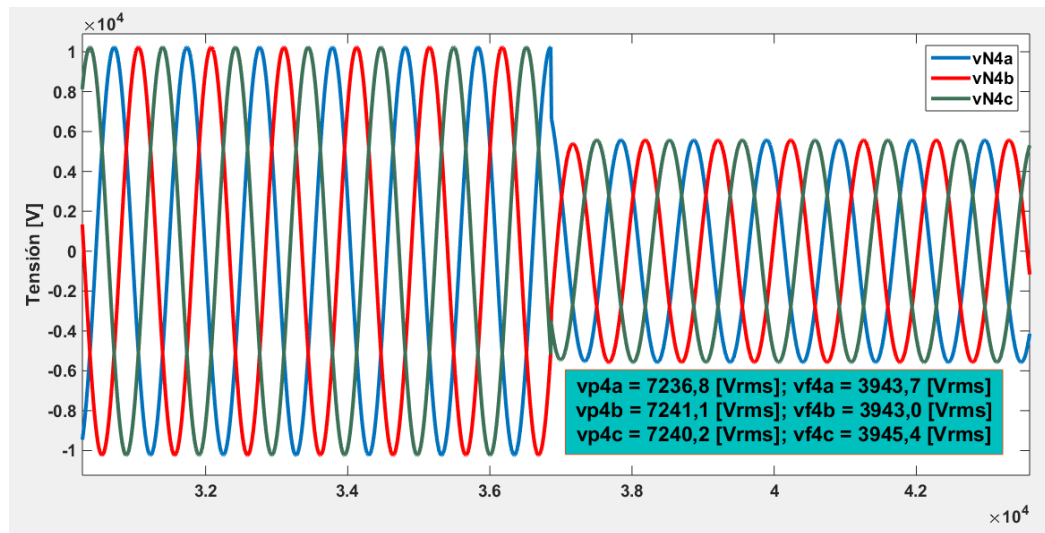
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	2815,5	2851,8	2821,2	42,21155993	1,272880286	34,26392615
B	4886,9	2819,1	2853,5	2824,7	42,24703545	1,20553706	34,34537772
<b>Resultado suma deltas</b>					84,45859538	2,478417346	68,60930388

### A.3 Simulación de cada tipo de falla en los nodos eléctricos de la zona 3

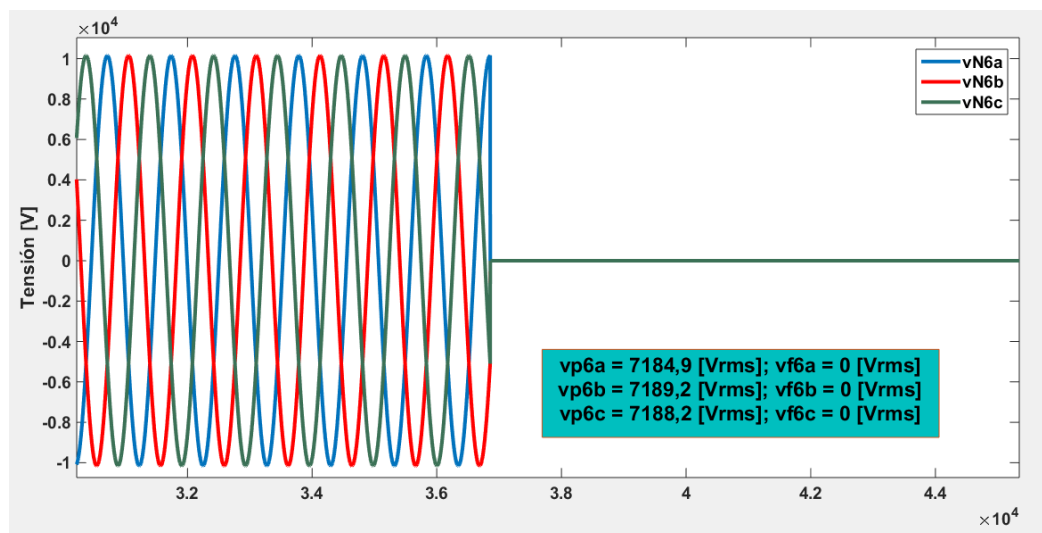
#### A.3.1 Nodo eléctrico 6

##### Falla trifásica en el nodo 6

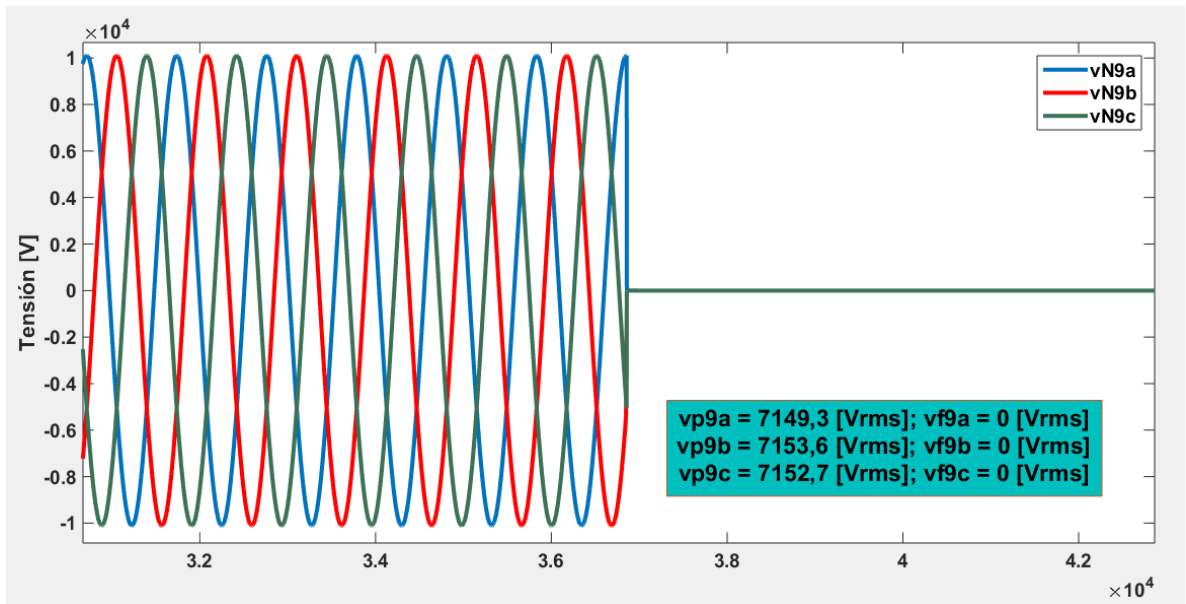
**Figura A69.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 6



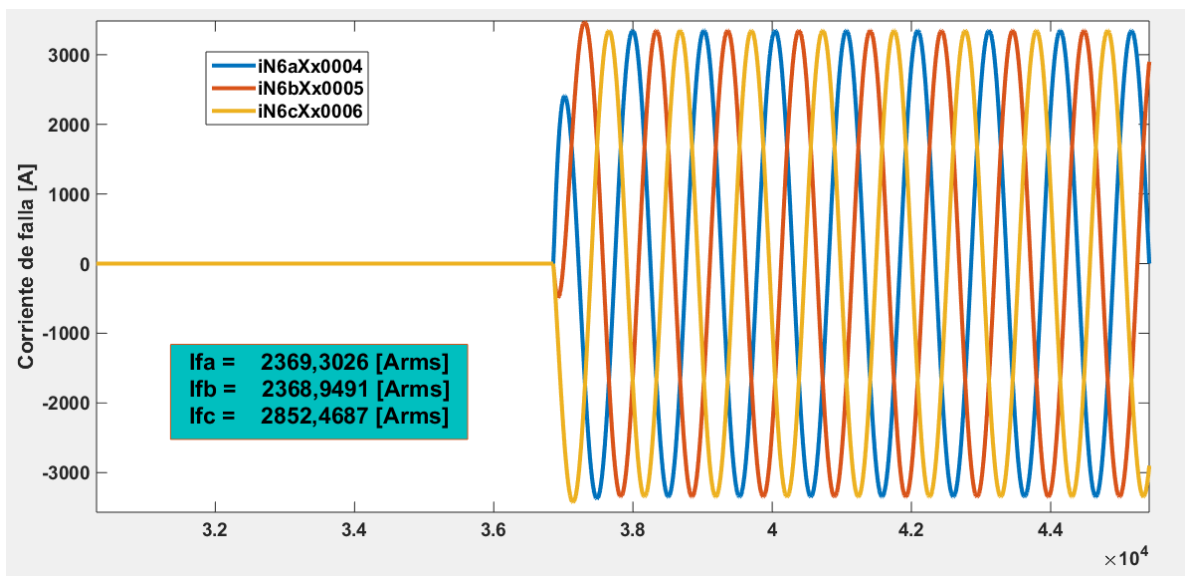
**Figura A70.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 6



**Figura A71.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 6



**Figura A72.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 6



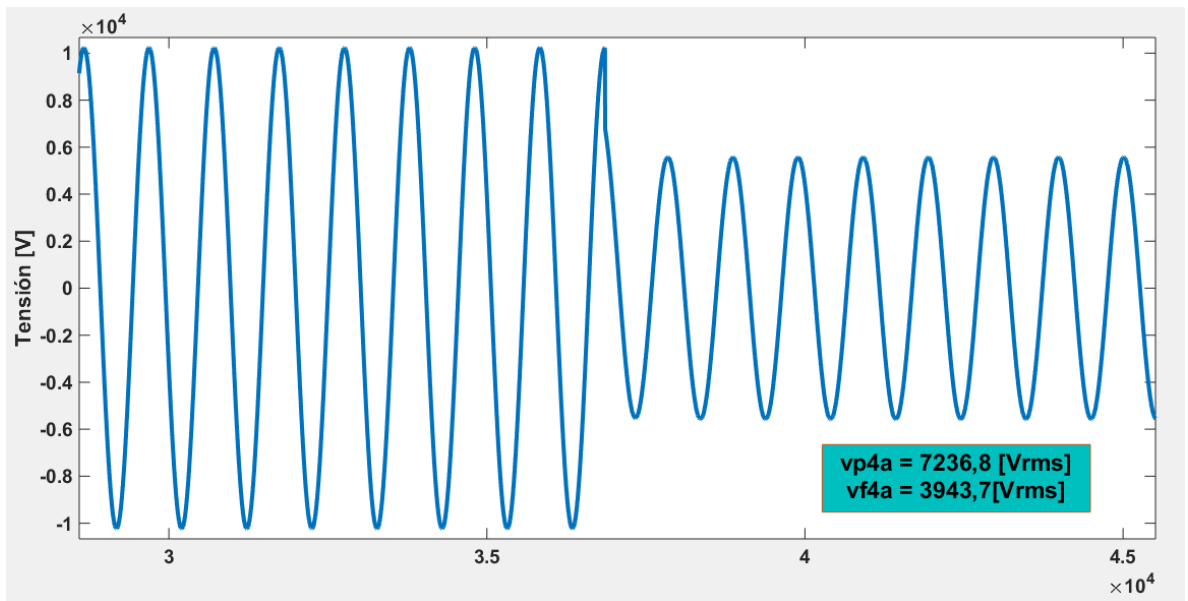
**Tabla A21.** Resultados falla trifásica en el nodo 6

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	3943,95878	0	0	2369,740301	0
B	3944,02949	0	0	2369,782788	0
C	3944,02949	0	0	2369,782788	0

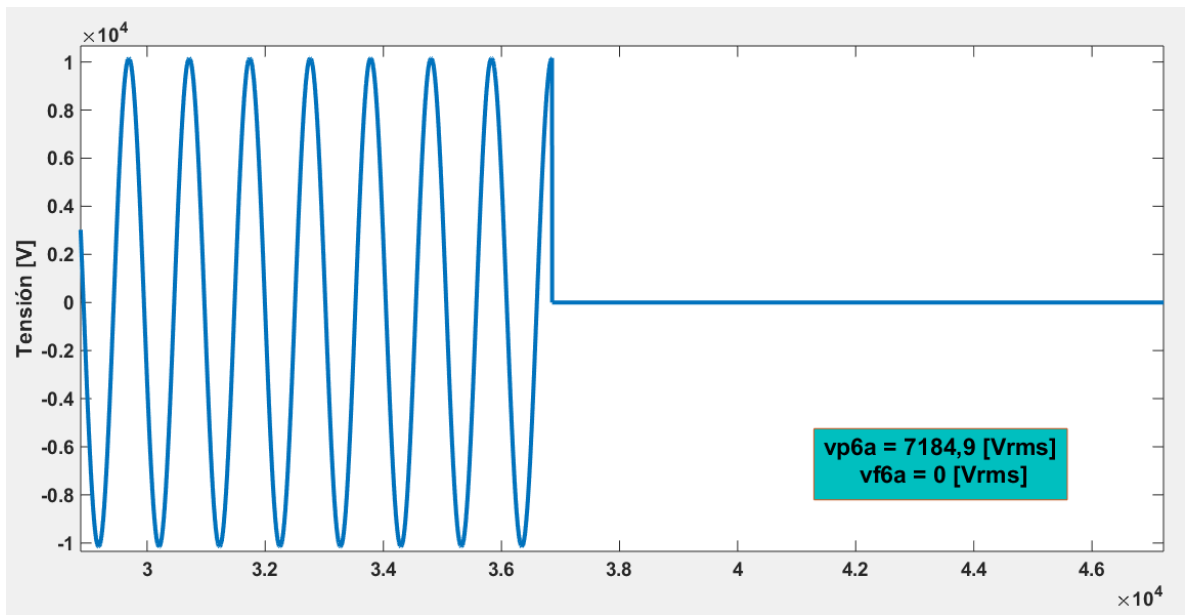
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2373,7	1925,4	2377,6	1438	2380,2	0,05233911	18,8861271	39,5188425	100
B	2369,9	2375,1	1926,6	2379	1438,9	2381,7	0,00494588	18,8834154	39,5166036	100
C	2369,6	2374,8	1926,3	2378,7	1438,7	2381,4	0,00771326	18,8858009	39,5173834	100
Resultado suma deltas							0,06499825	56,6553435	118,55283	300

## Falla monofásica en el nodo 6

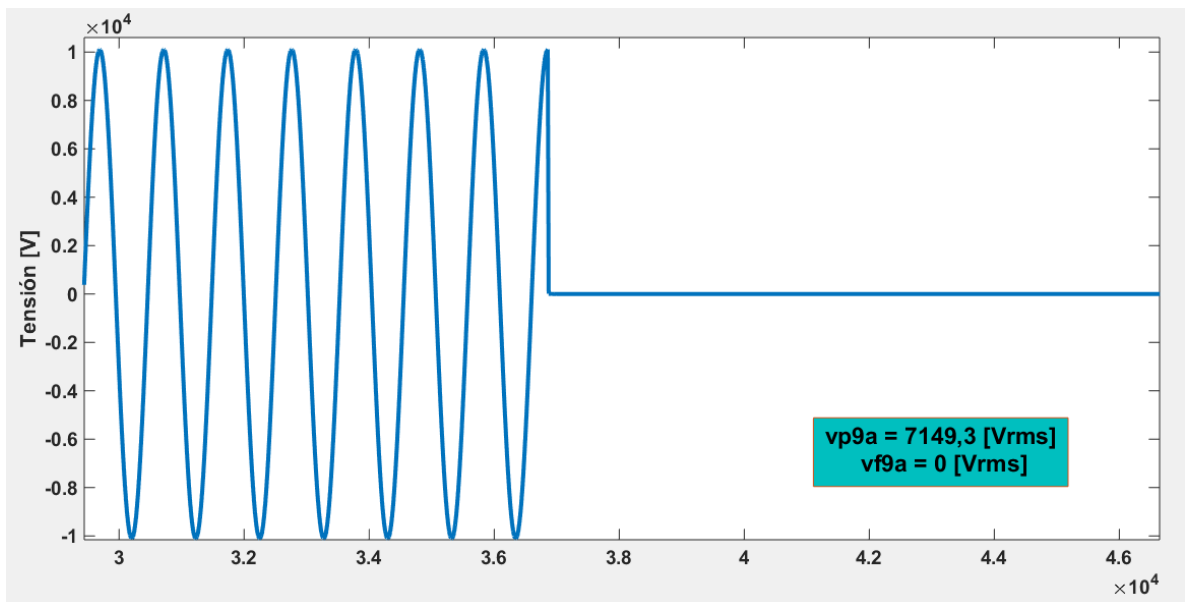
**Figura A73.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 6



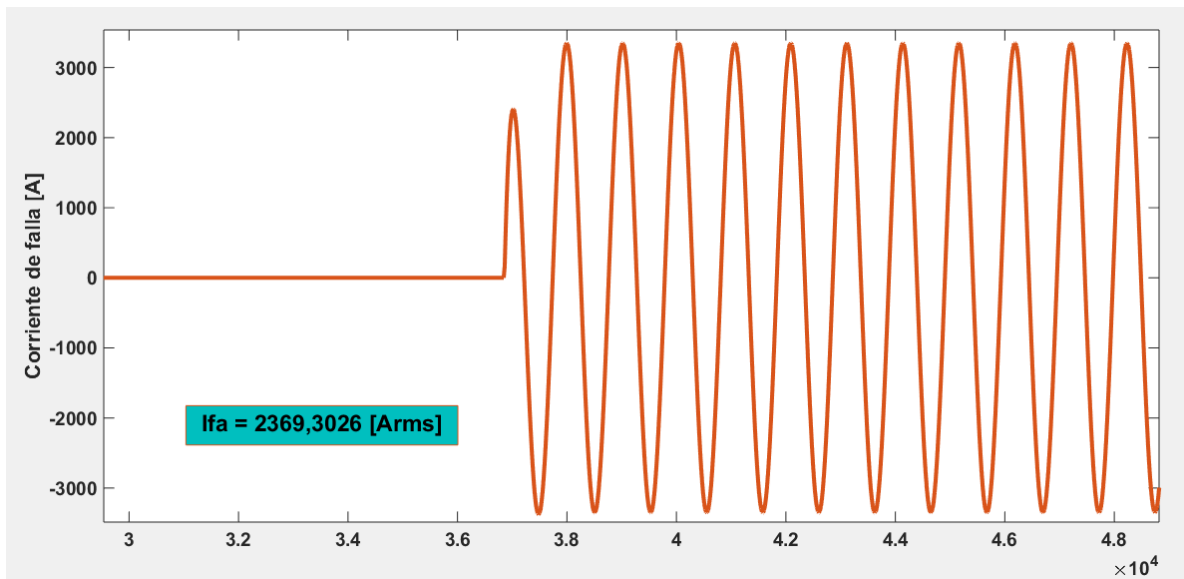
**Figura A74.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 6



**Figura A75.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 6



**Figura A76.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 6



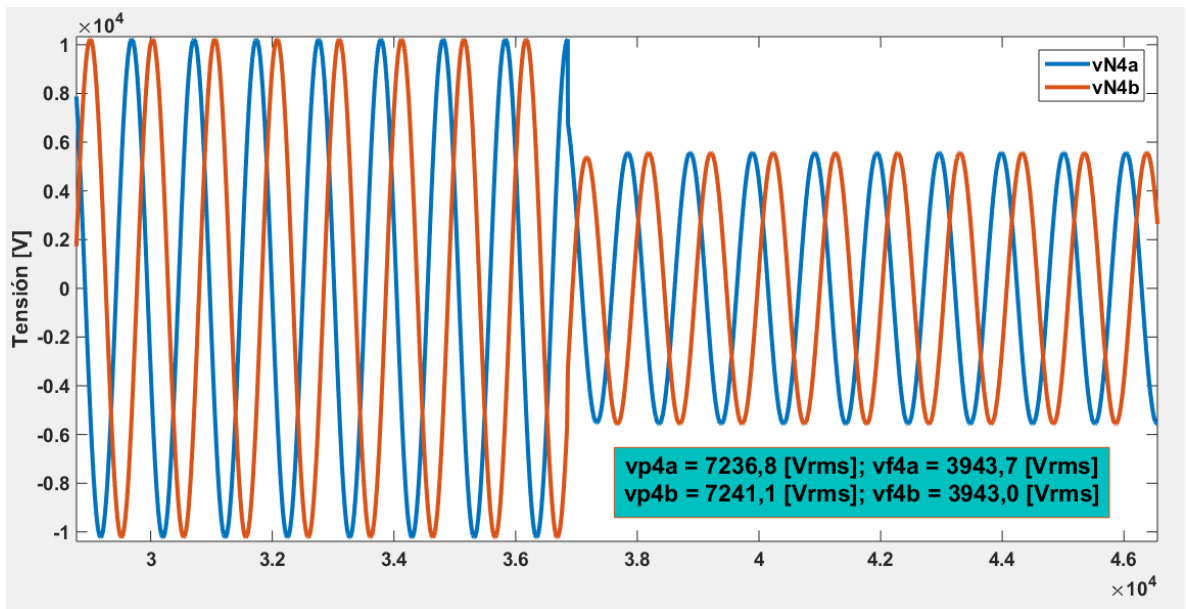
**Tabla A22.** Resultados falla monofásica en el nodo 6

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	3943,95878	0	0	2369,7403	0

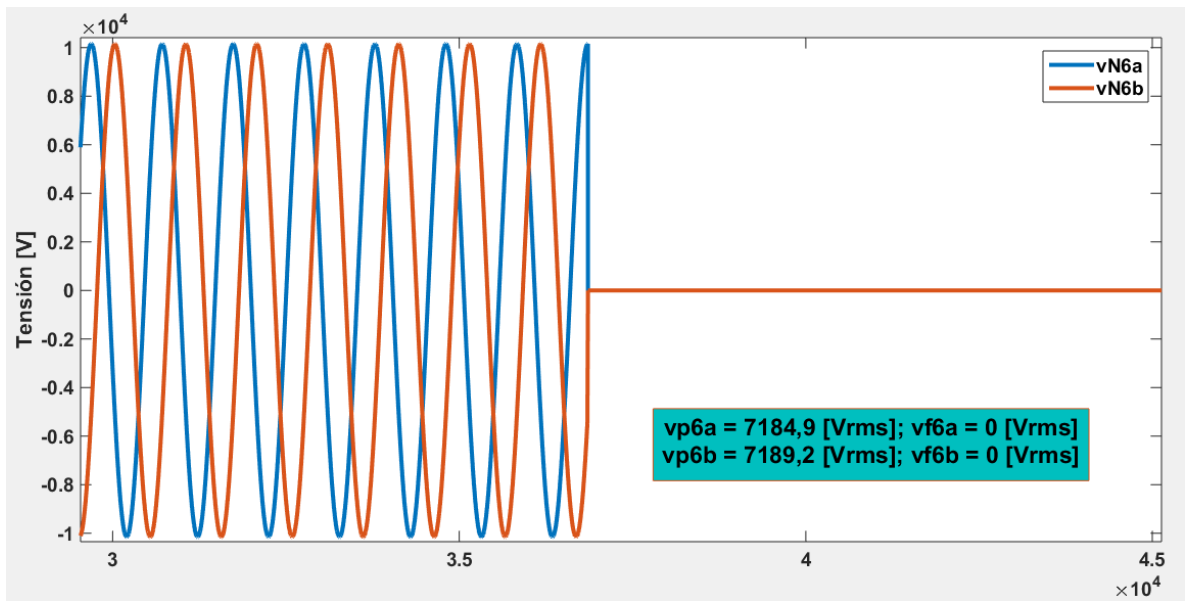
Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2373,7	1925,4	2377,6	1438	2380,2	0,05233911	18,8861271	39,5188425	100

### Falla línea – línea en el nodo 6

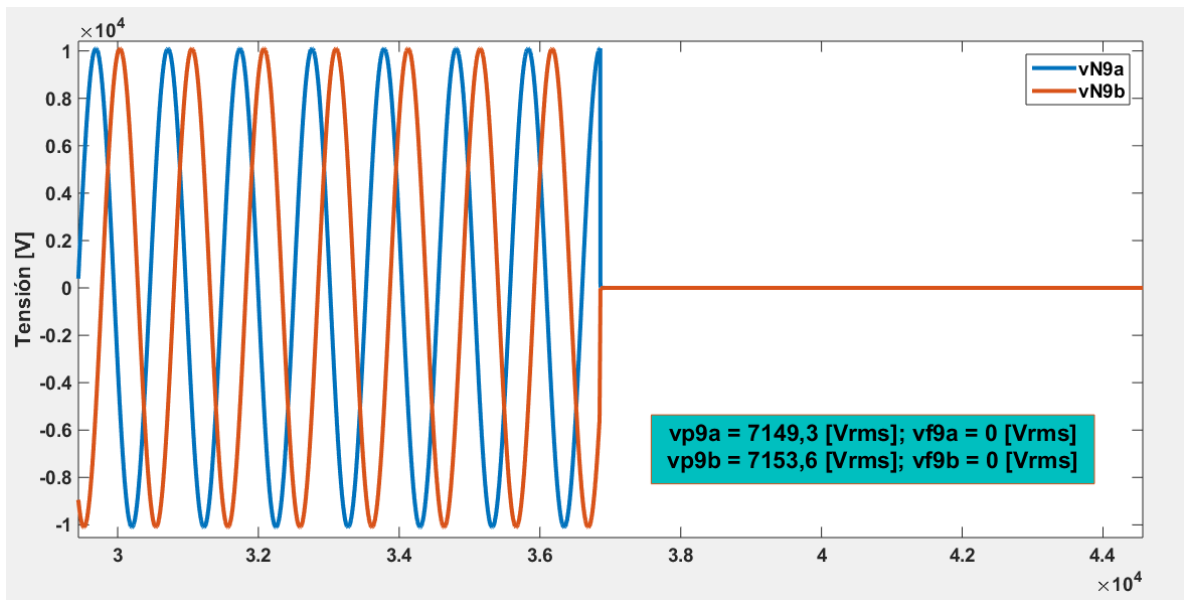
**Figura A77.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



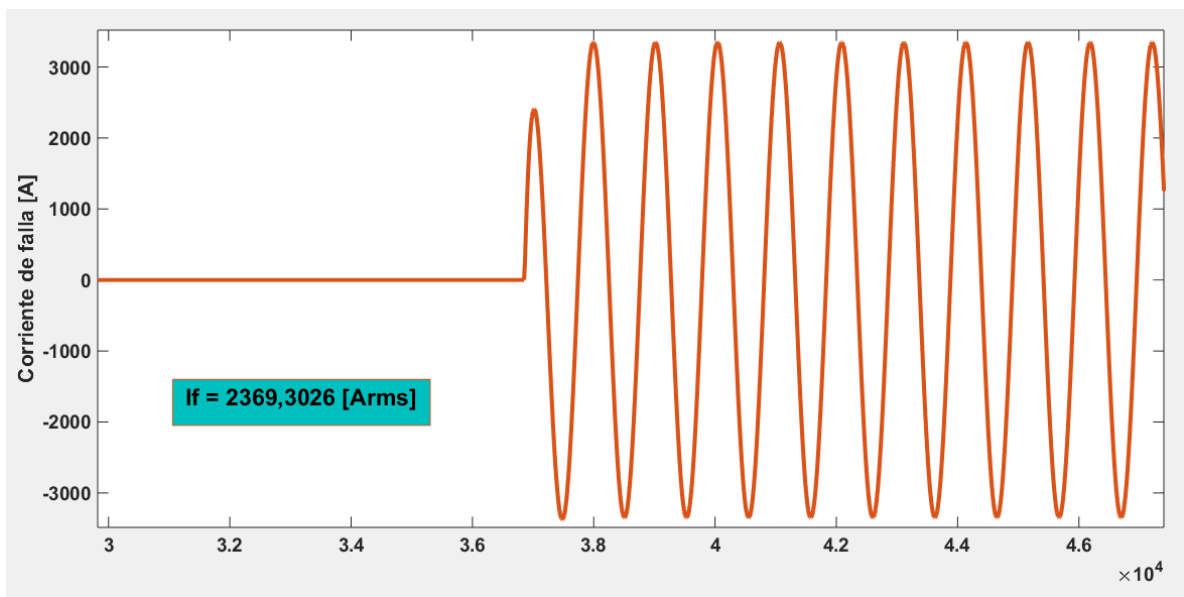
**Figura A78.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



**Figura A79.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



**Figura A80.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 6



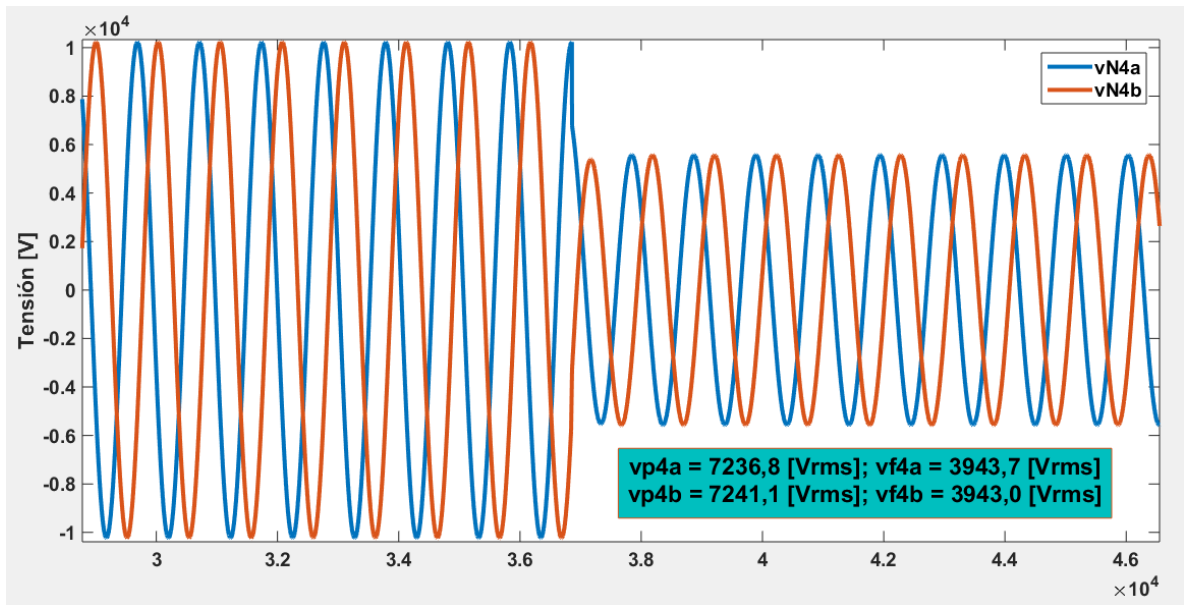
**Tabla A23.** Resultados falla bifásica en el nodo 6

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	3944,02949	0	0	2369,78279	0
B	3944,02949	0	0	2369,78279	0

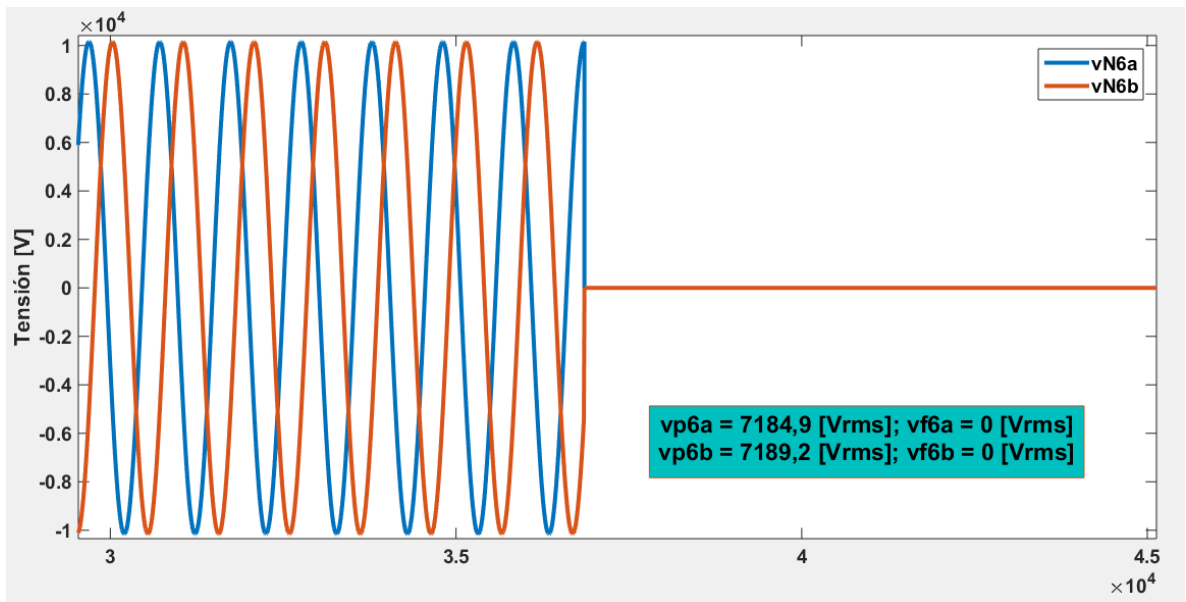
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2373,7	1925,4	2377,6	1438	2380,2	0,05413102	18,8861271	39,5188425	100
B	2369,9	2375,1	1926,6	2379	1438,9	2381,7	0,00494588	18,8834154	39,5166036	100
Resultado suma deltas							0,0590769	37,7695426	79,0354461	200

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 6

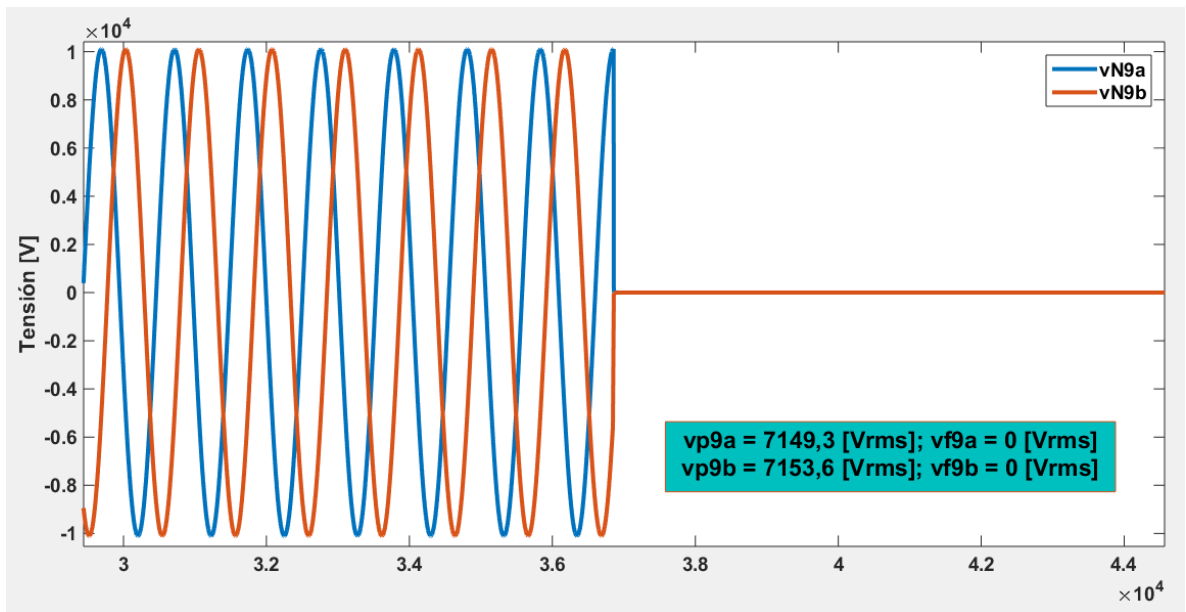
**Figura A81.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 6



**Figura A82.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 6



**Figura A83.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 6



**Figura A84.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 6

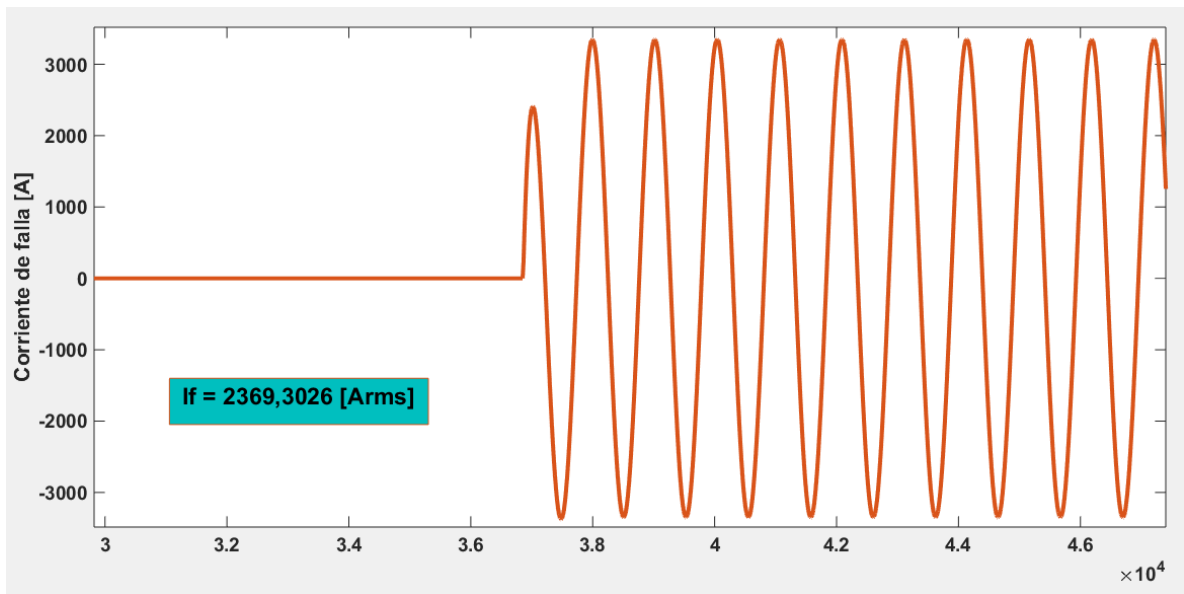


Tabla A24. Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 6

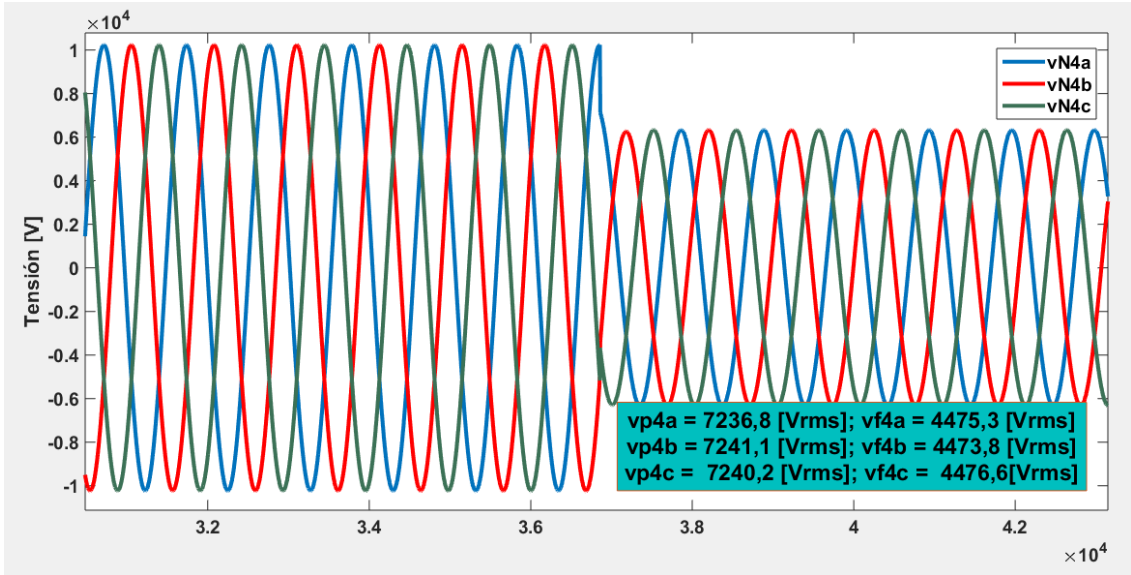
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	3944,029493	0	0	2369,782788	0
B	3944,029493	0	0	2369,782788	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2373,7	1925,4	2377,6	1438	2380,2	0,054131021	18,88612714	39,51884253	100
B	2369,9	2375,1	1926,6	2379	1438,9	2381,7	0,004945879	18,88341544	39,51660361	100
Resultado suma deltas							0,0590769	37,76954258	79,03544615	200

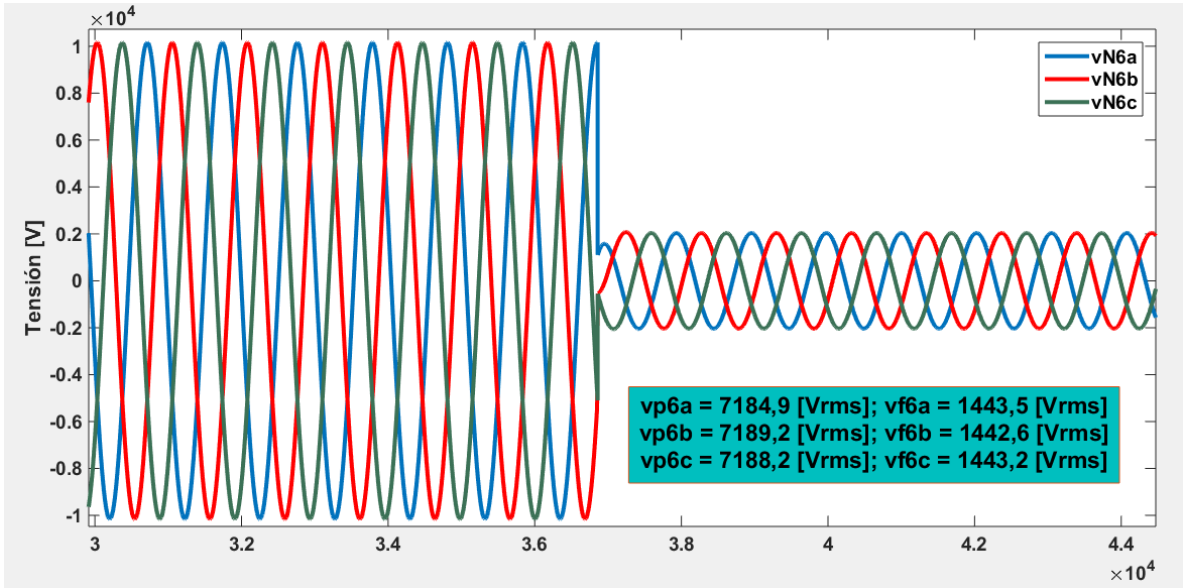
### A.3.2 Nodo eléctrico 7

## Falla trifásica en el nodo 7

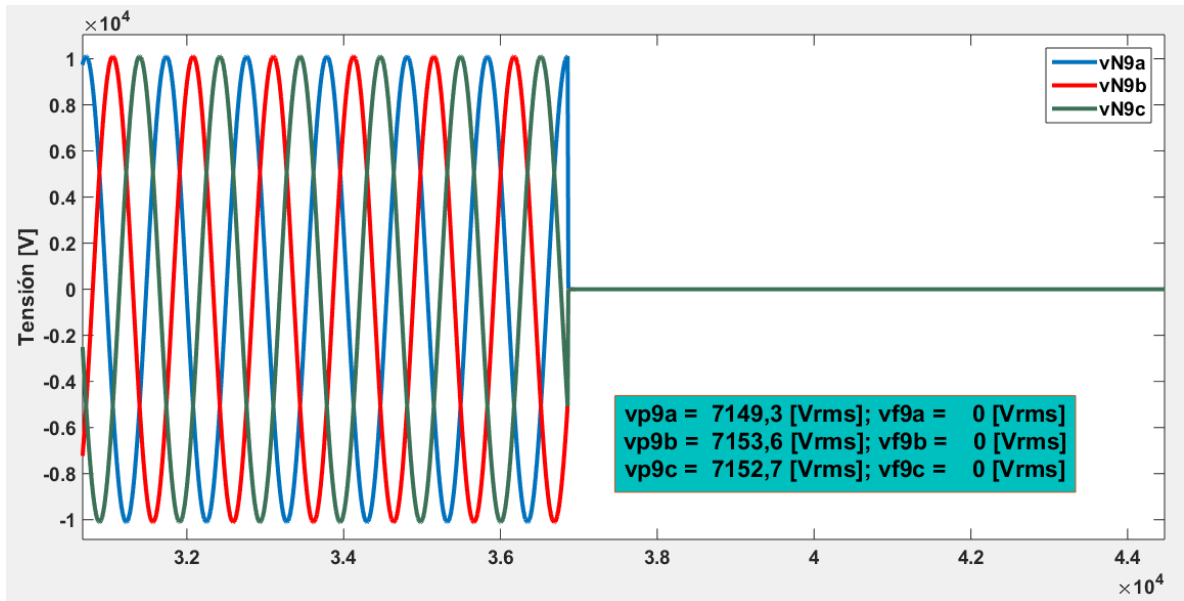
**Figura A85.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 7



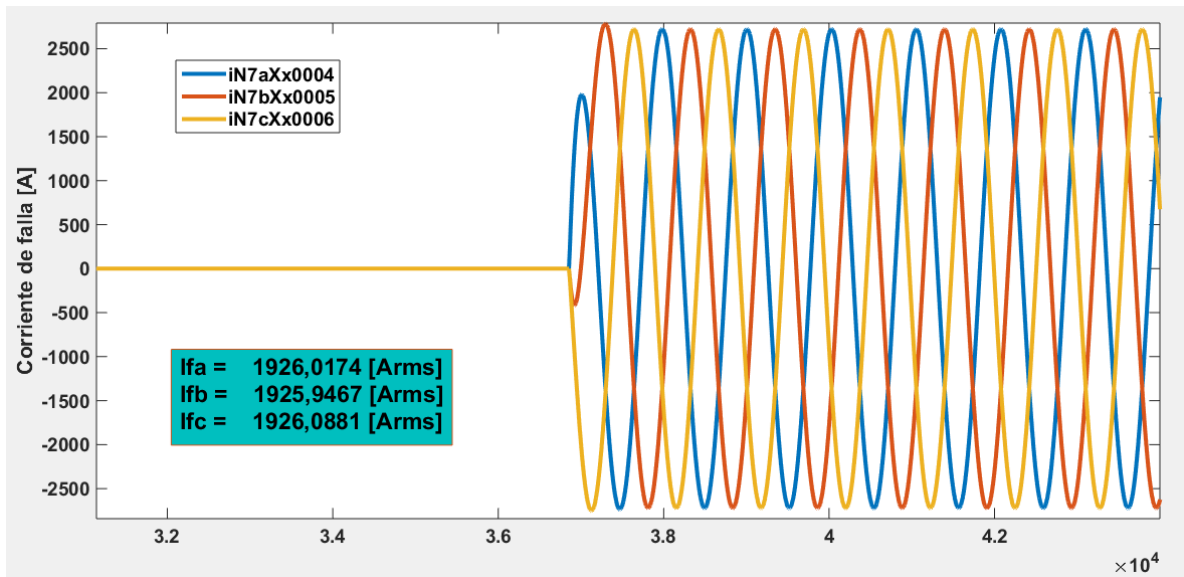
**Figura A86.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 7



**Figura A87.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 7



**Figura A88.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 7



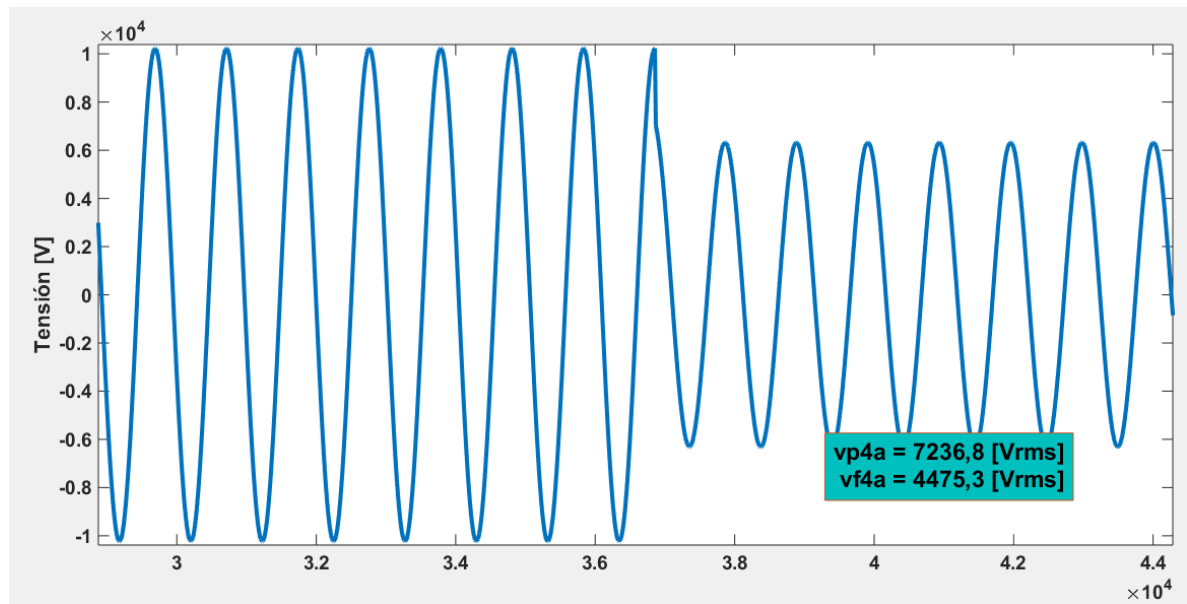
**Tabla A25.** Resultados falla trifásica en el nodo 7

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>4</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>9</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>9</sub>
A	4475,20811	1443,13423	0	1821,831327	441,1905319
B	4475,20811	1443,13423	0	1821,831327	441,1905319
C	4475,1374	1443,13423	0	1821,78884	441,1905319

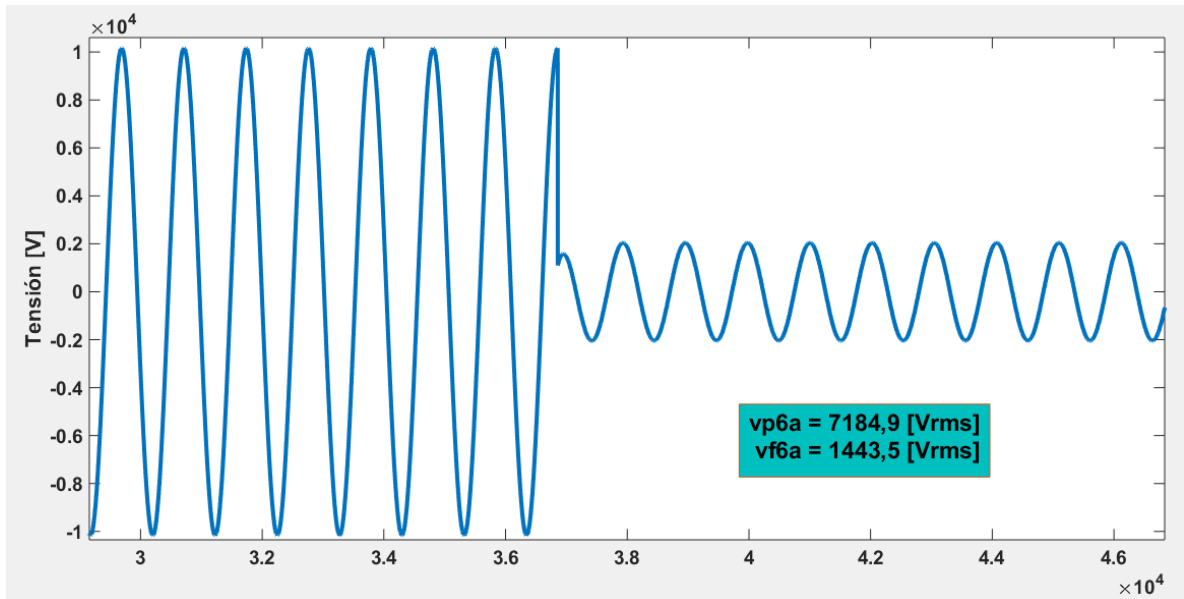
Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>96</sub>	I <sub>67</sub>	I <sub>97</sub>	I <sub>68</sub>	I <sub>98</sub>	I <sub>69</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>
A	2368,5	1896,8	1925,4	1899,9	1438	1902	23,0807968	1,48540563	24,3118059	76,8038627
B	2369,9	1898,5	1926,6	1901,6	1438,9	1903,8	23,1262362	1,45852798	24,3321414	76,8257941
C	2369,6	1898	1926,3	1901,1	1438,7	1903,2	23,1182967	1,46913773	24,3227605	76,8184882
Resultado suma deltas							69,3253298	4,41307133	72,9667077	230,448145

### Falla monofásica en el nodo 7

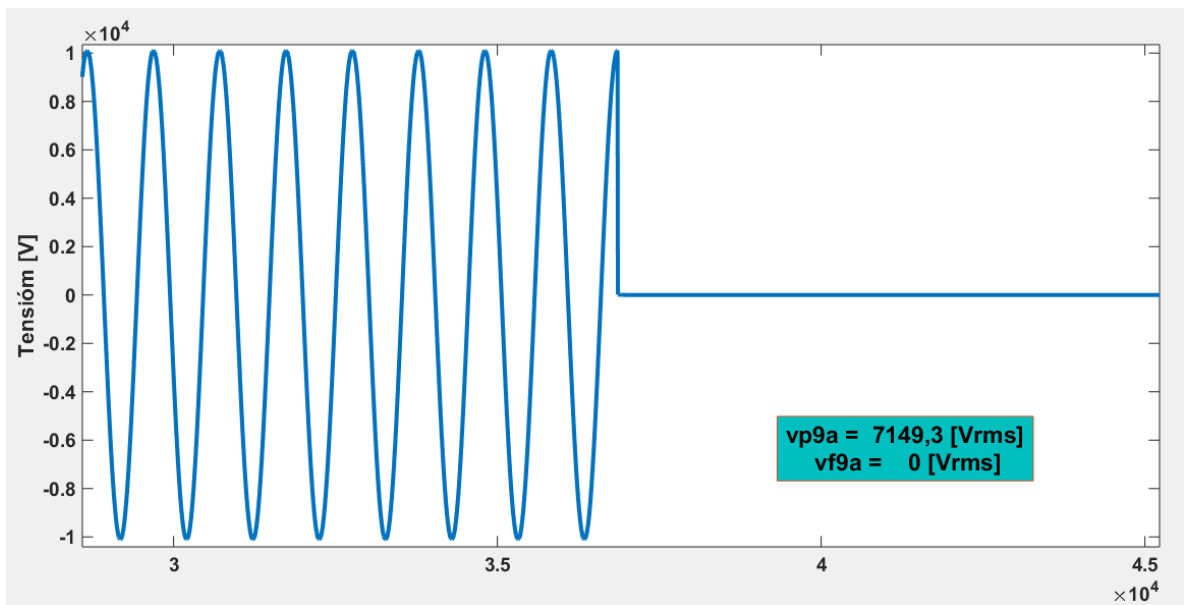
**Figura A89.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 7



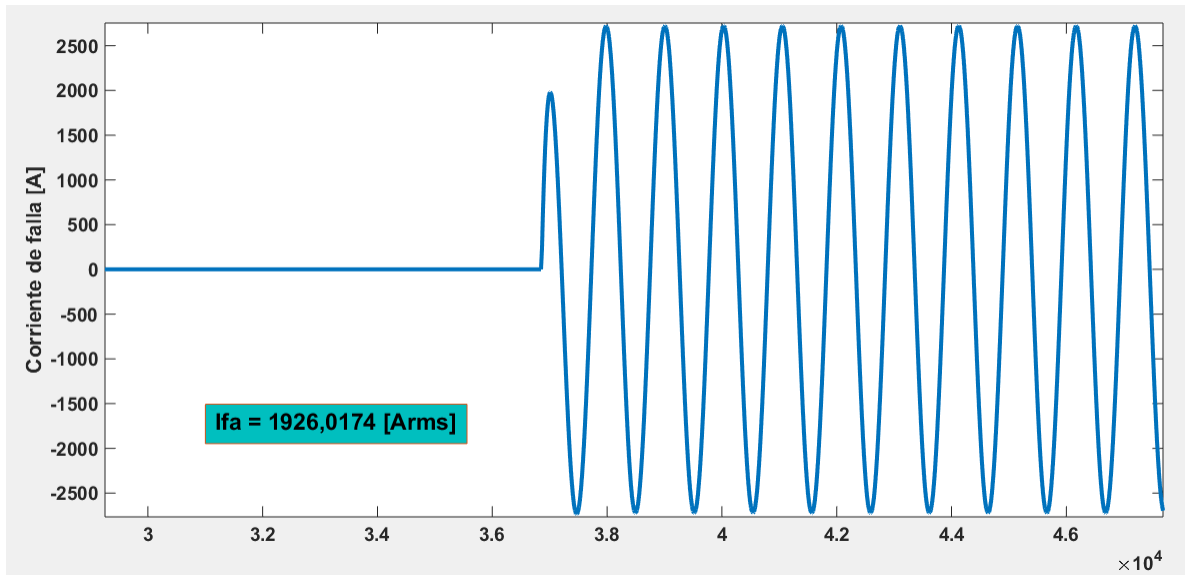
**Figura A90.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 7



**Figura A91.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 7



**Figura A92.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 7



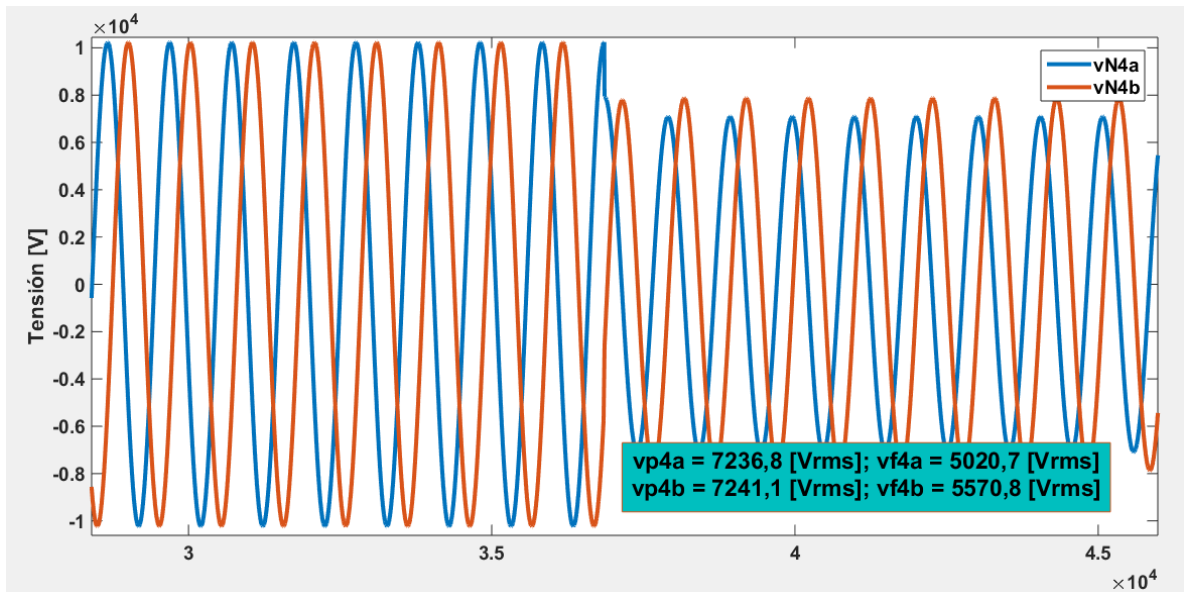
**Tabla A26.** Resultados falla monofásica en el nodo 7

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	4475,20811	1443,13423	0	1821,83133	441,190532

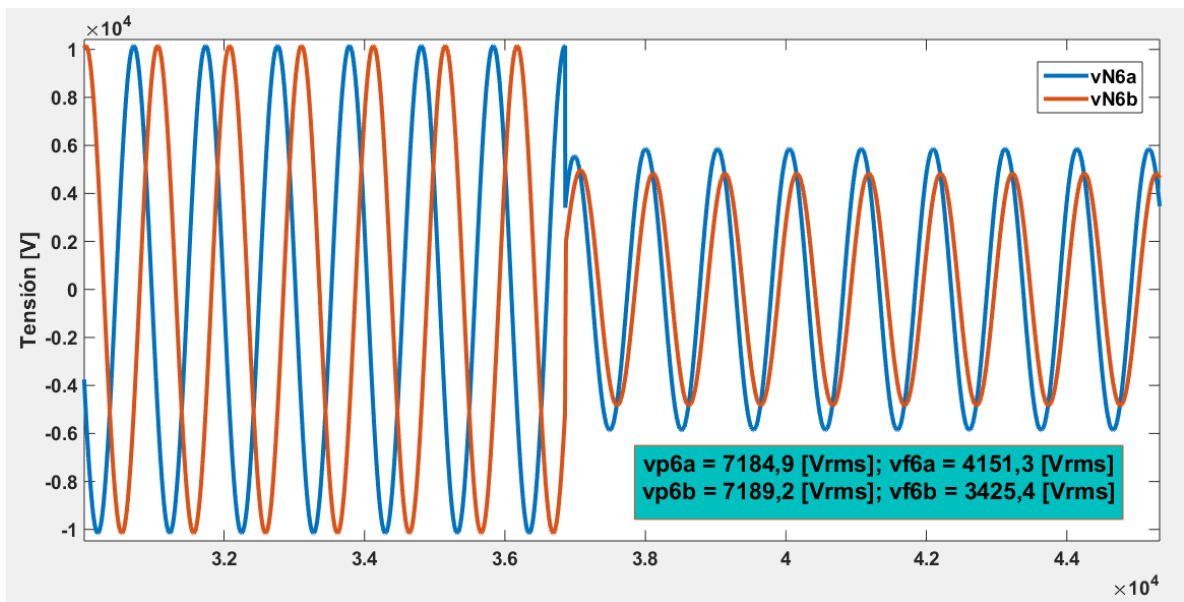
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1896,8	1925,4	1899,9	1438	1902	23,0807968	1,48540563	24,3118059	76,8038627

## Falla línea – línea en el nodo 7

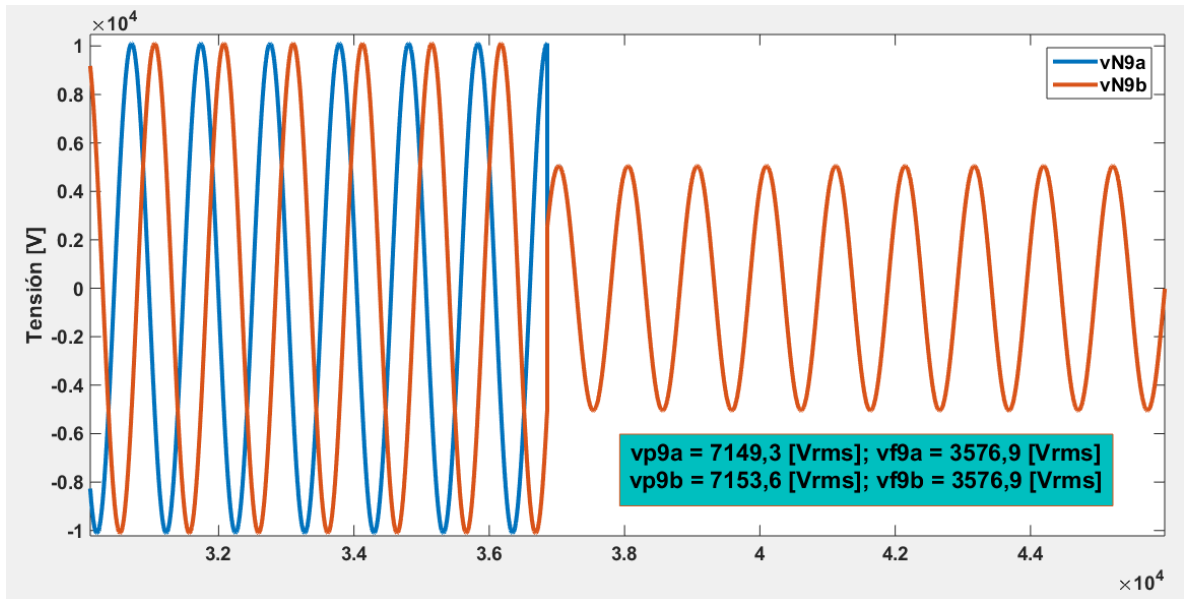
**Figura A93.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 4



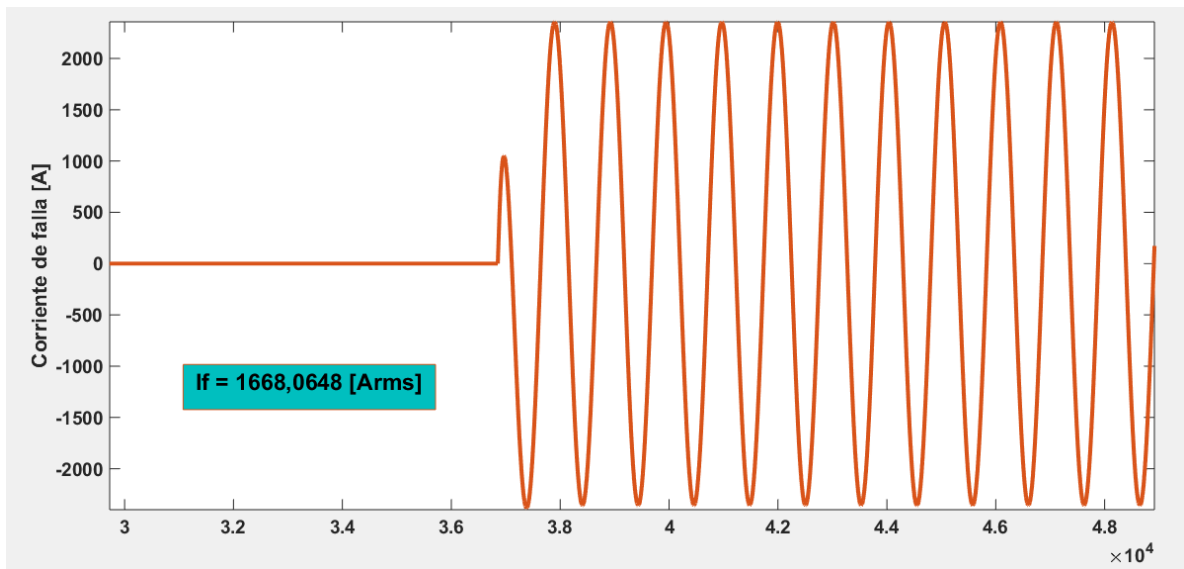
**Figura A94.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 7



**Figura A95.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica en el nodo 7



**Figura A96.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 7



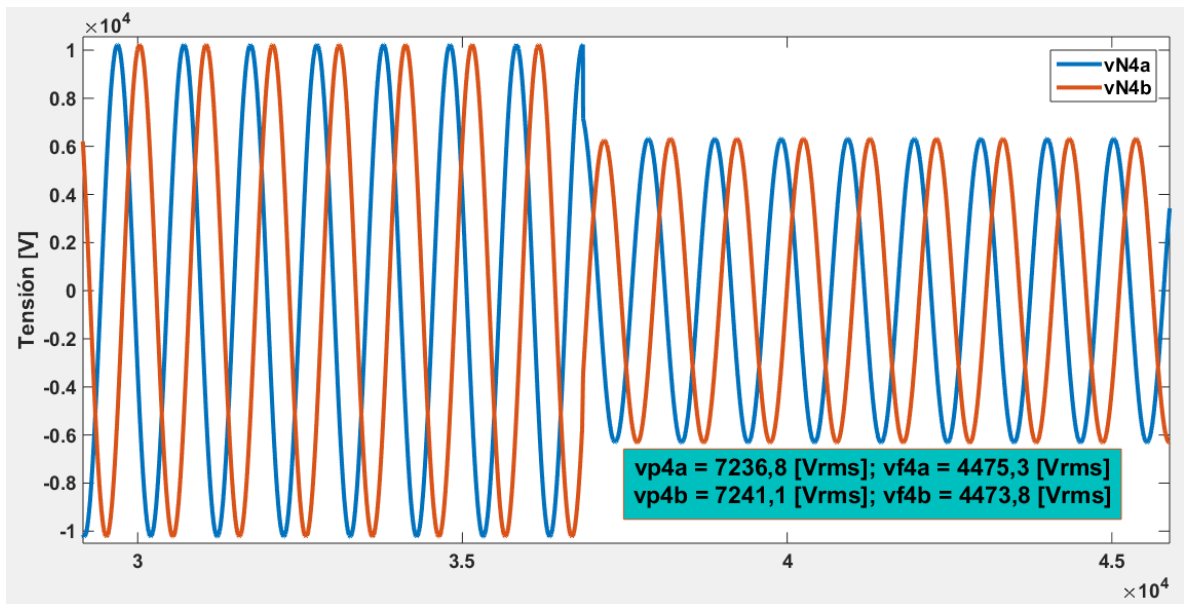
**Tabla A27.** Resultados falla bifásica en el nodo 7

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
<b>A</b>	5019,68033	4149,86828	3575,9097	522,629365	175,46884
<b>B</b>	5572,07215	3425,22525	3575,9097	1289,93985	46,0667854

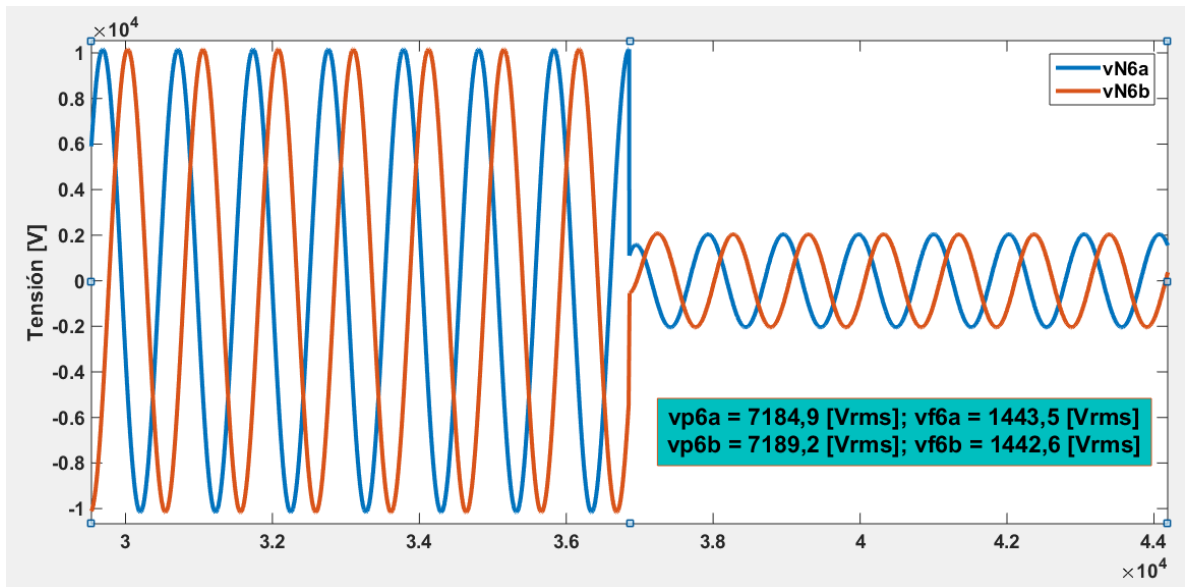
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
<b>A</b>	1183,5	1002,2	962,101	1003,8	718,5507	1005	55,8403579	4,00109759	28,4169456	82,540414
<b>B</b>	1184,9	1243,5	963,2634	1245,5	719,4188	1246,9	8,14300398	22,5361158	42,2385548	96,3054948
<b>Resultado suma deltas</b>							63,9833618	26,5372134	70,6555004	178,845909

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 7

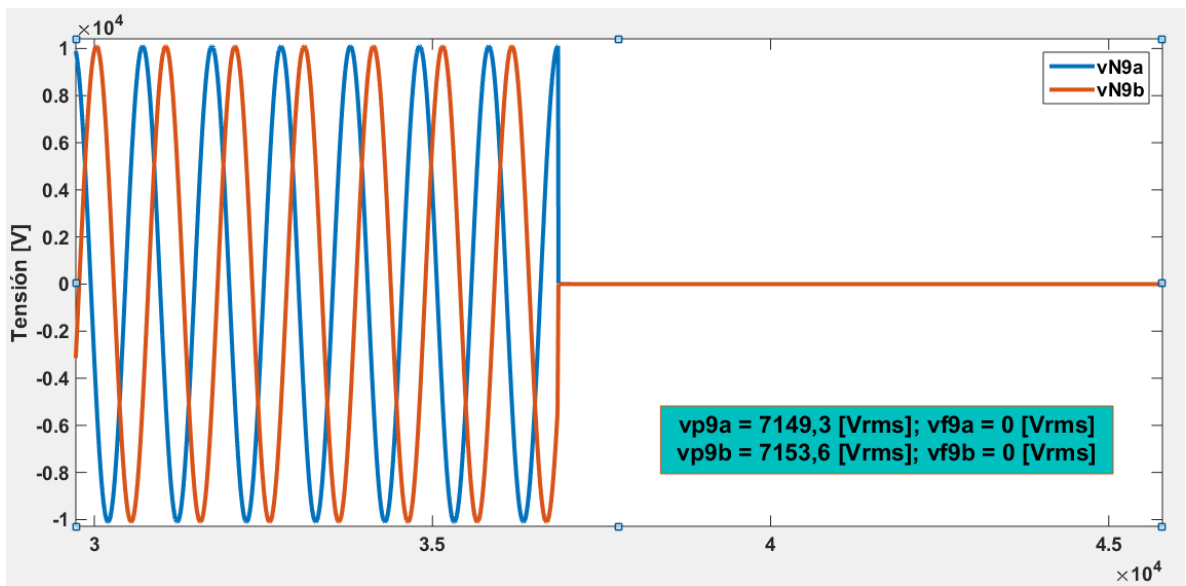
**Figura A97.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



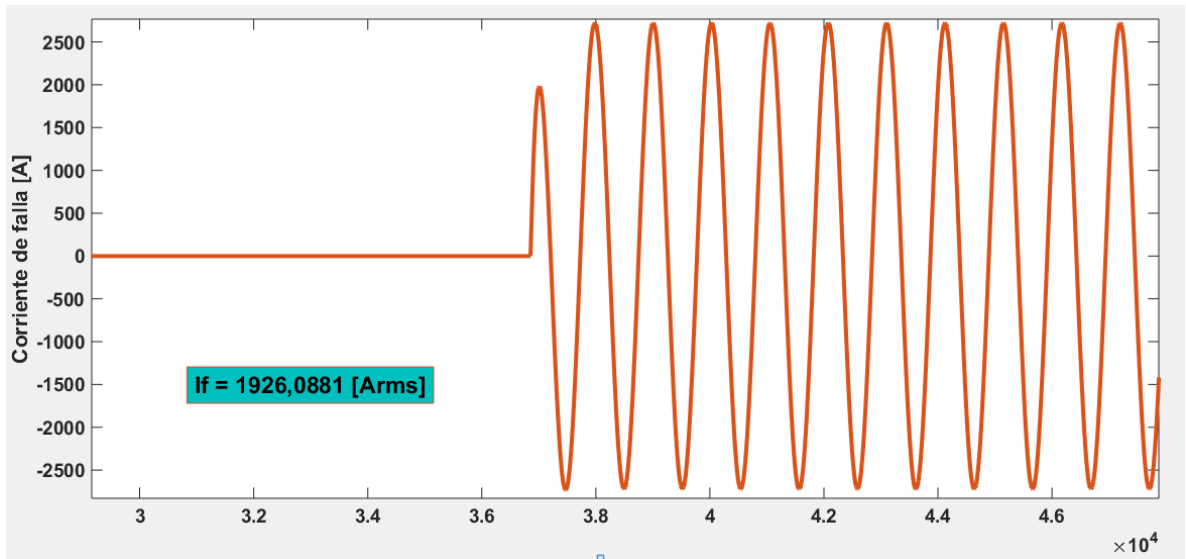
**Figura A98.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



**Figura A99.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



**Figura A100.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 7



**Tabla A28.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 7

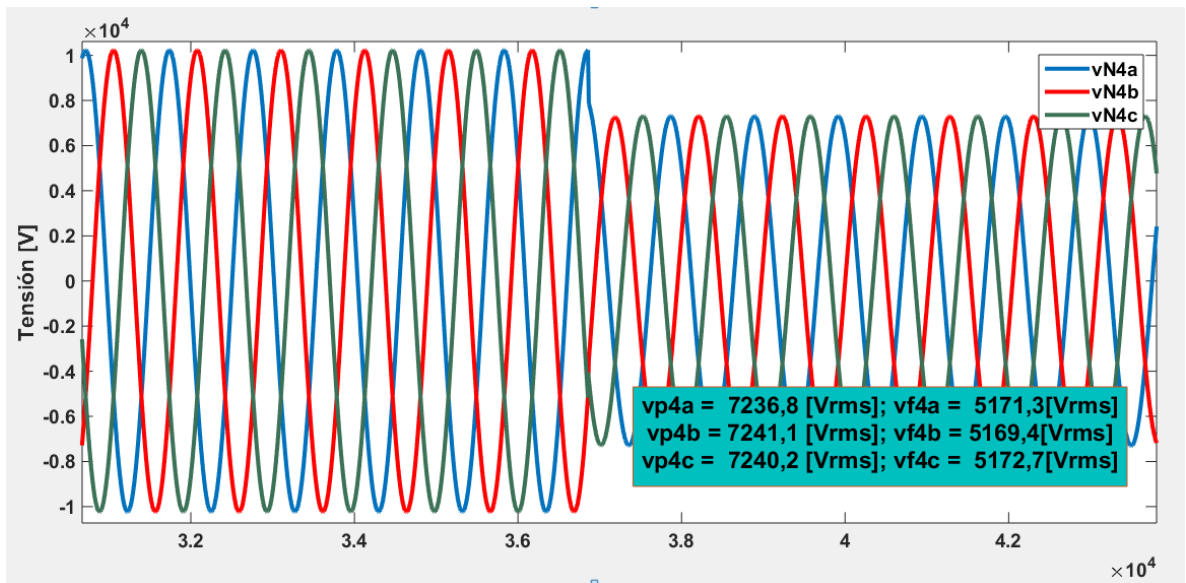
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	4475,208107	1443,13423	0	1821,831327	441,1905319
B	4475,208107	1443,13423	0	1821,831327	441,1905319

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1896,8	1925,4	1899,9	1438	1902	23,08079683	1,48540563	24,31180588	76,80386268
B	2369,9	1898,5	1926,6	1901,6	1438,9	1903,8	23,12623625	1,458527977	24,33214135	76,8257941
Resultado suma deltas							46,20703308	2,943933607	48,64394724	153,6296568

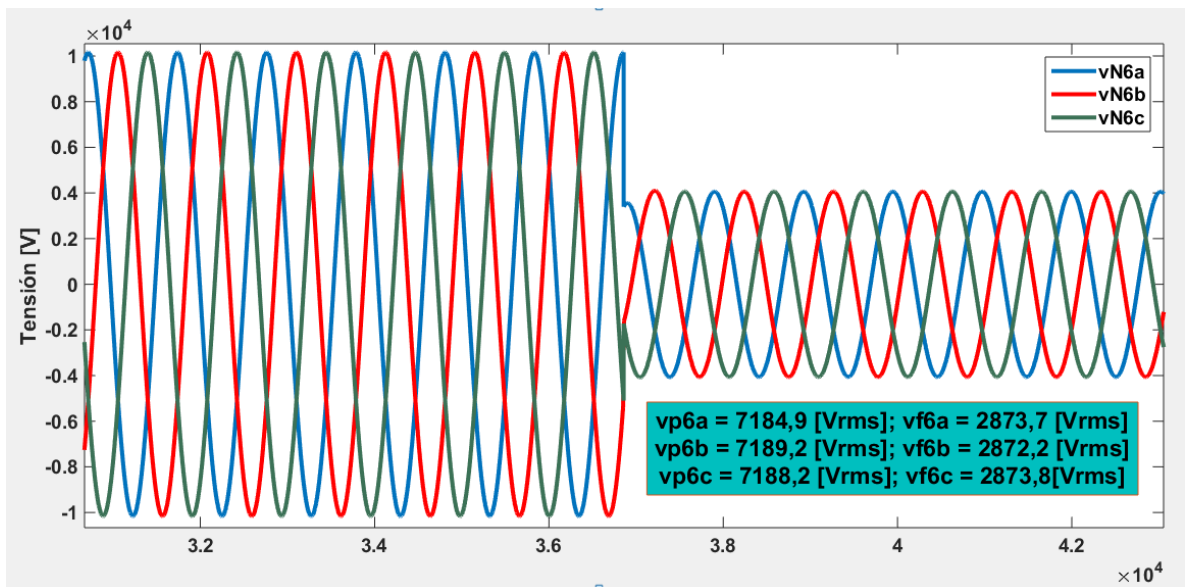
### A.3.3 Nodo eléctrico 8

#### Falla trifásica en el nodo 8

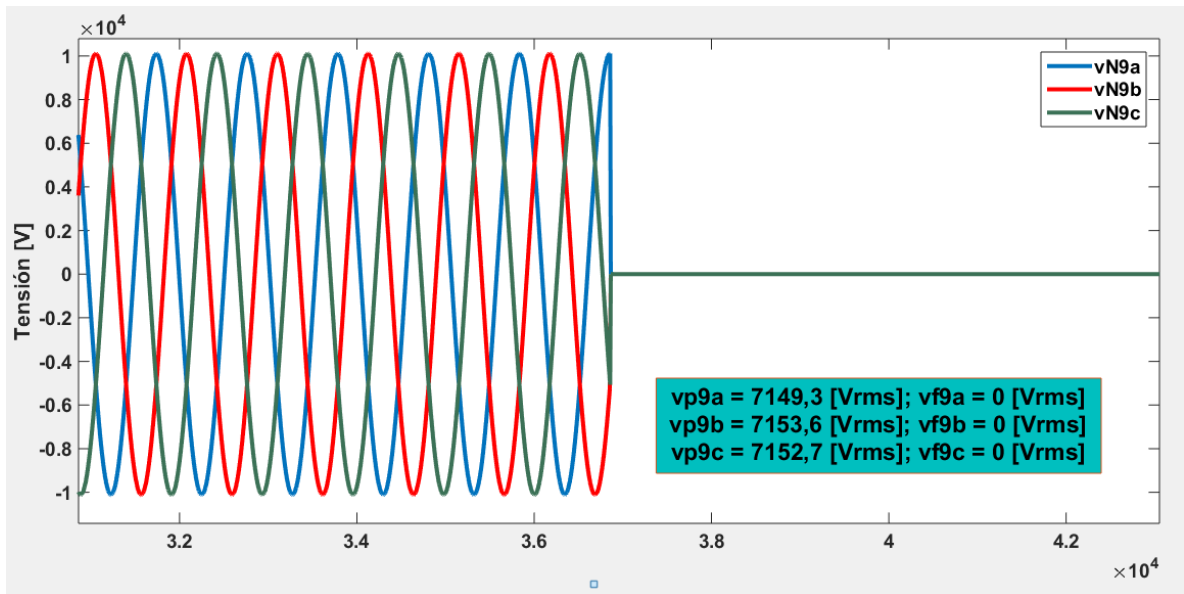
**Figura A101.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica en el nodo 8



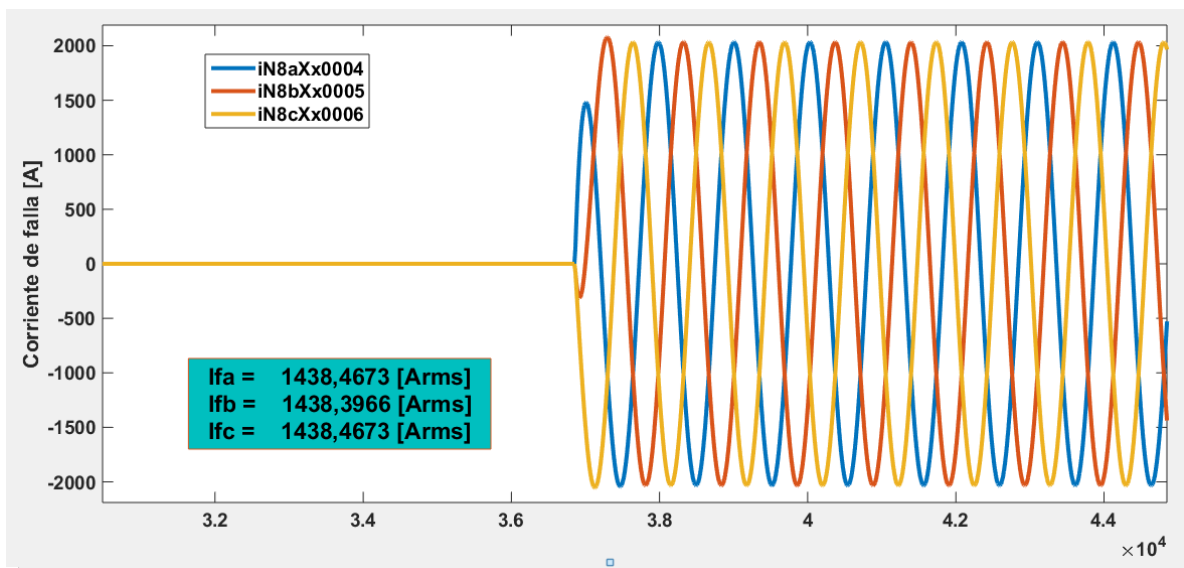
**Figura A102.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 8



**Figura A103.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 8



**Figura A104.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 8



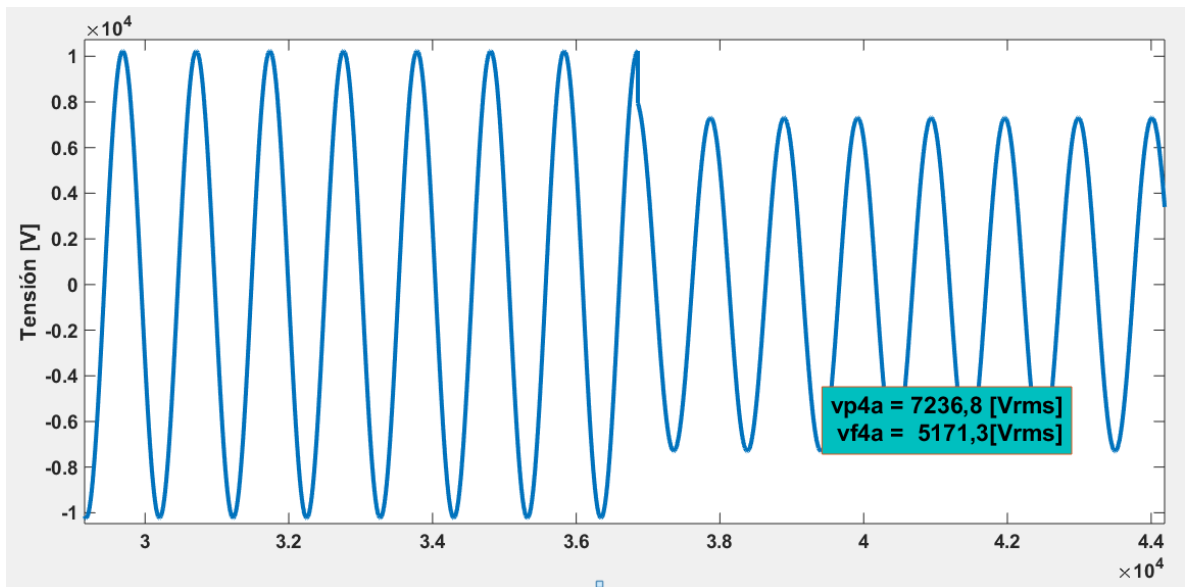
**Tabla A29.** Resultados falla trifásica en el nodo 8

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>4</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>9</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>9</sub>
<b>A</b>	5171,07189	2873,18698	0	1380,691526	878,3818355
<b>B</b>	5171,07189	2873,18698	0	1380,691526	878,3818355
<b>C</b>	5171,07189	2873,18698	0	1380,691526	878,3818355

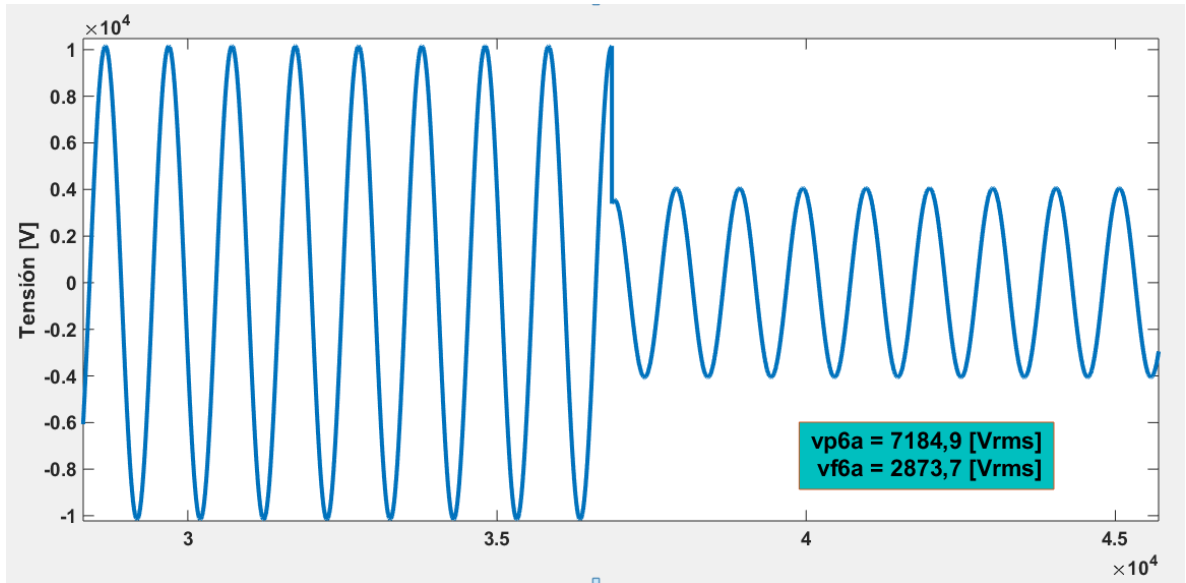
Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>96</sub>	I <sub>67</sub>	I <sub>97</sub>	I <sub>68</sub>	I <sub>98</sub>	I <sub>69</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>a</sub>
<b>A</b>	2368,5	1424,3	1925,4	1426,6	1438	1428,2	41,7060787	26,0257609	0,79276773	38,4972808
<b>B</b>	2369,9	1426,2	1926,6	1428,6	1438,9	1430,2	41,7405154	25,9732171	0,71582459	38,5832866
<b>C</b>	2369,6	1425,4	1926,3	1427,7	1438,7	1429,3	41,7331395	26,0032186	0,76457913	38,5446138
<b>Resultado suma deltas</b>							125,179734	78,0021966	<b>2,27317146</b>	115,625181

## Falla monofásica en el nodo 8

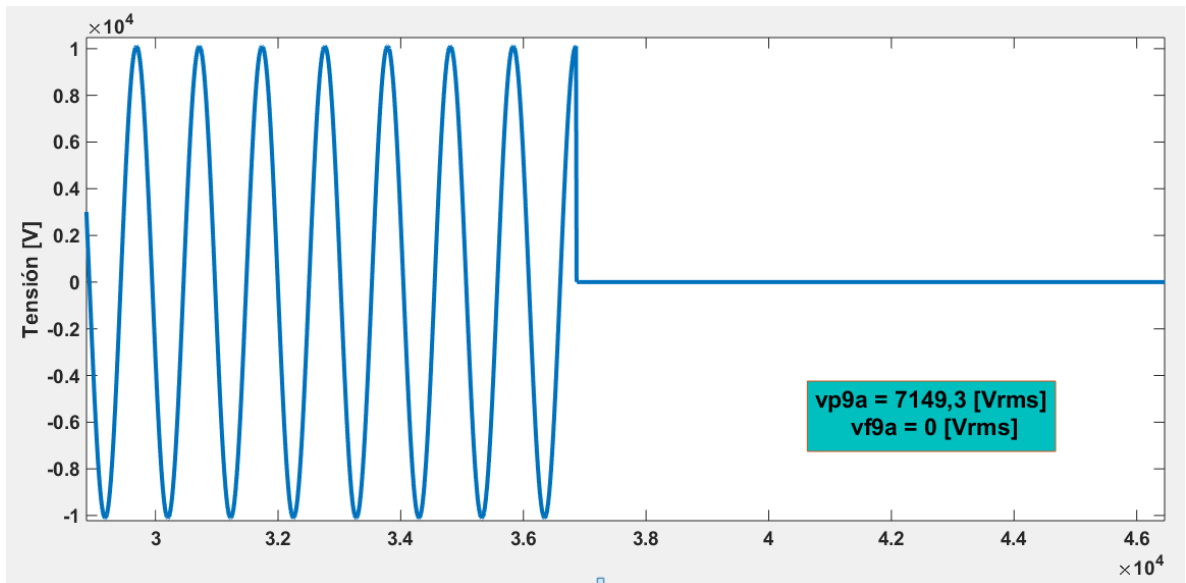
**Figura A105.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es monofásica en el nodo 8



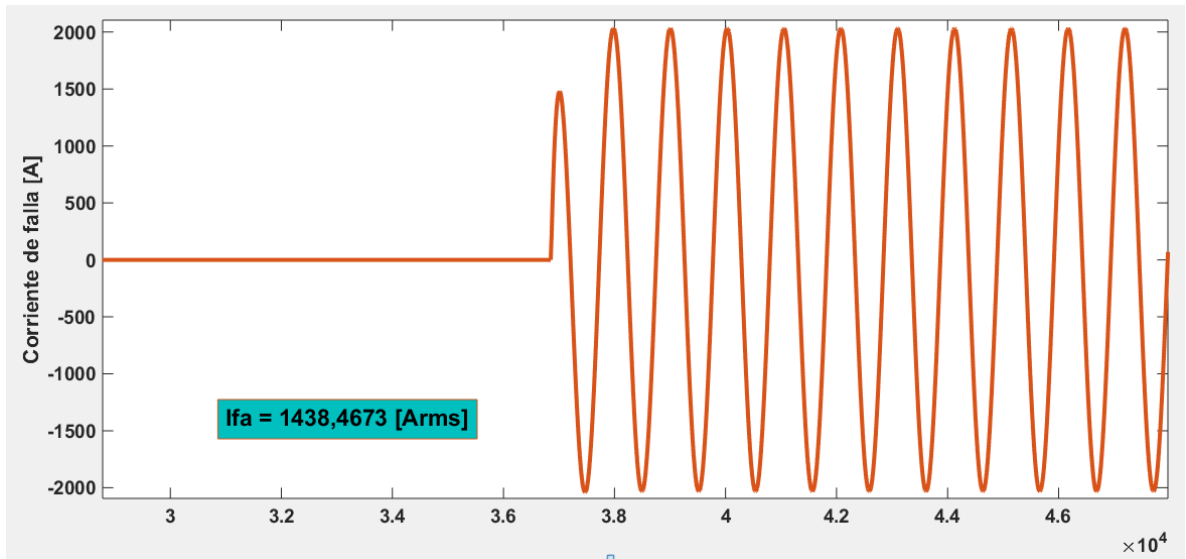
**Figura A106.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 8



**Figura A107.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 8



**Figura A108.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 8



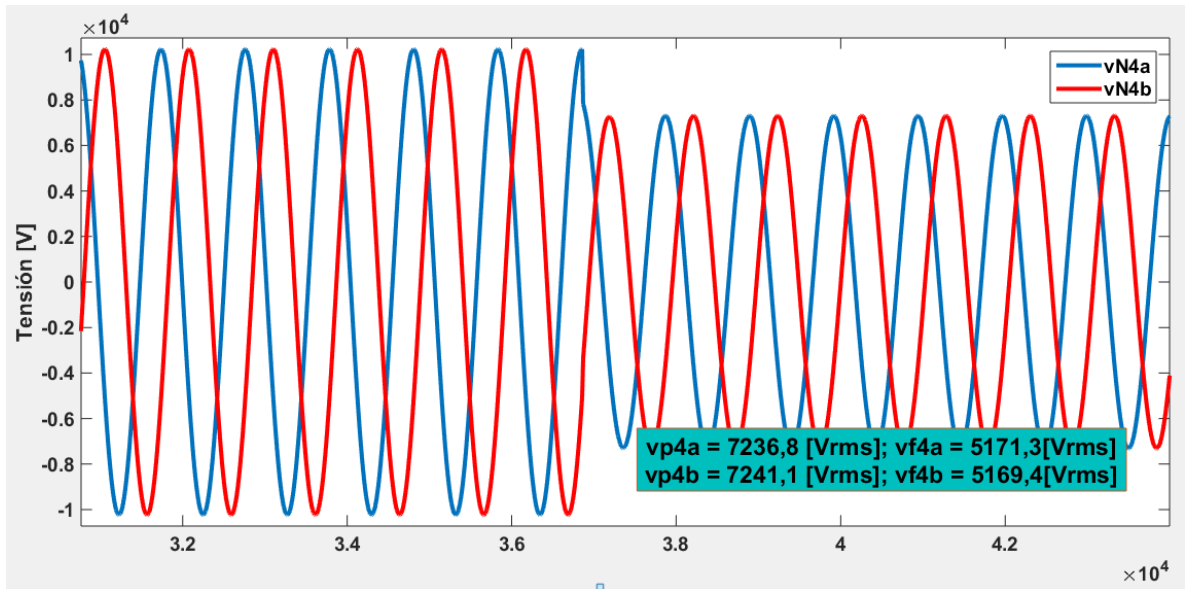
**Tabla A30.** Resultados falla monofásica en el nodo 8

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	5171,07189	2873,18698	0	1380,69153	878,381836

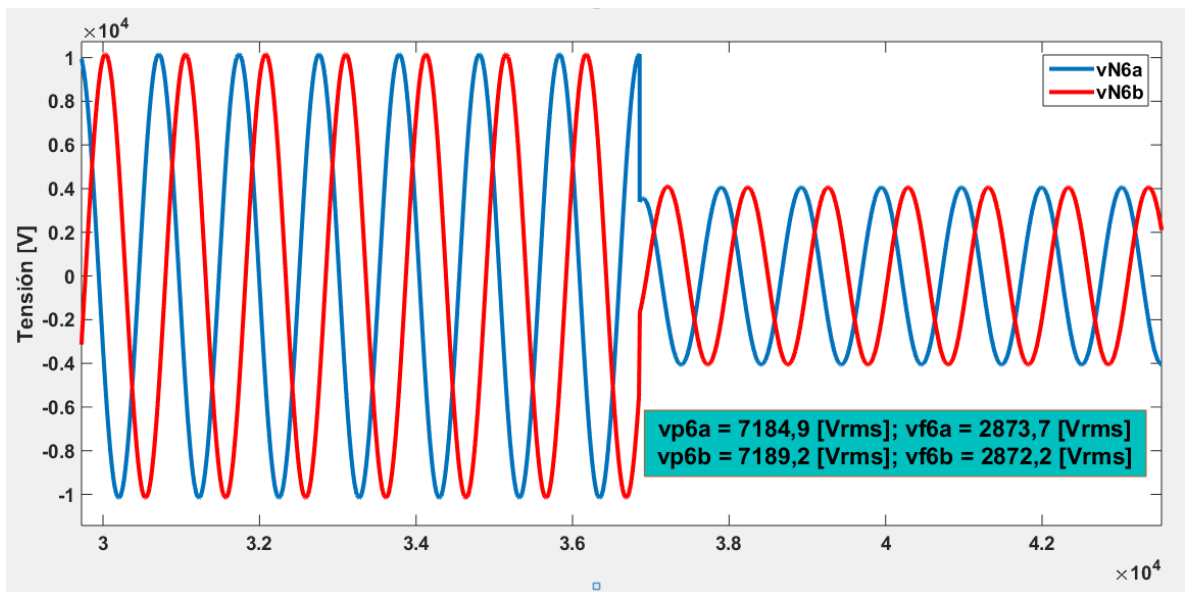
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1424,3	1925,4	1426,6	1438	1428,2	41,7060787	26,0257609	0,79276773	38,4972808

**Falla línea – línea en el nodo 8**

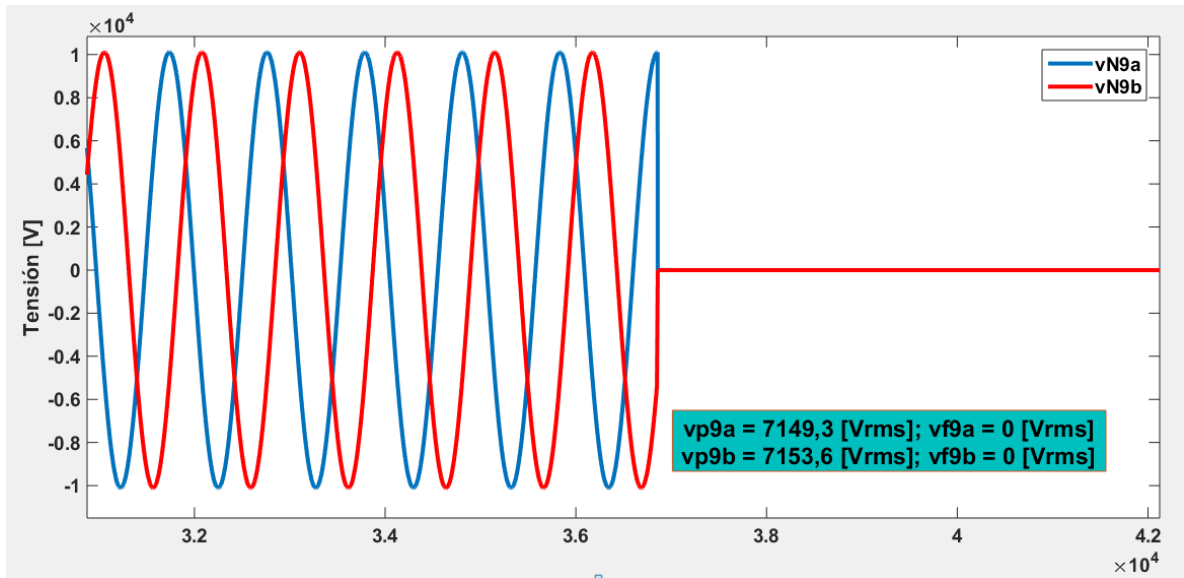
**Figura A109.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica en el nodo 8



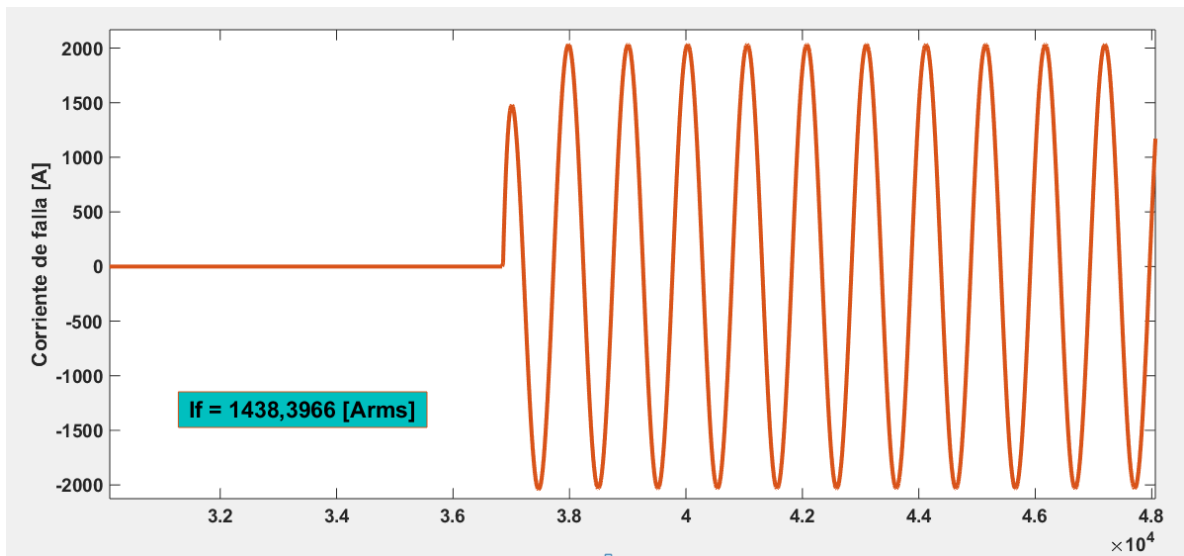
**Figura A110.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 8



**Figura A111.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica en el nodo 8



**Figura A112.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 8



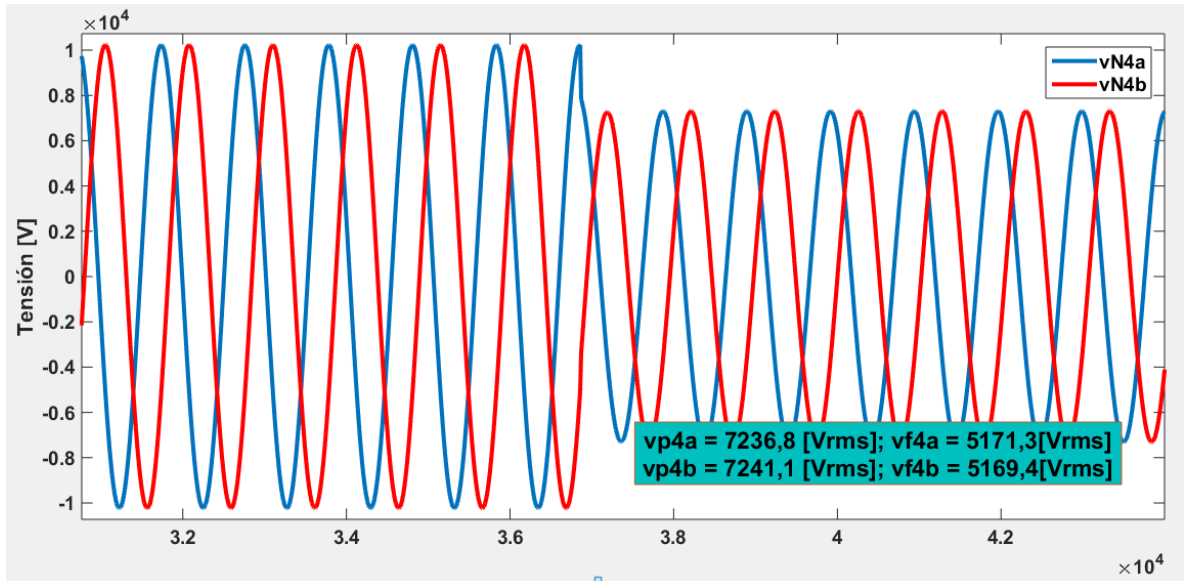
**Tabla A31.** Resultados falla bifásica en el nodo 8

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
<b>A</b>	5171,07189	2873,18698	0	1380,69153	878,381836
<b>B</b>	5171,07189	2873,18698	0	1380,69153	878,381836

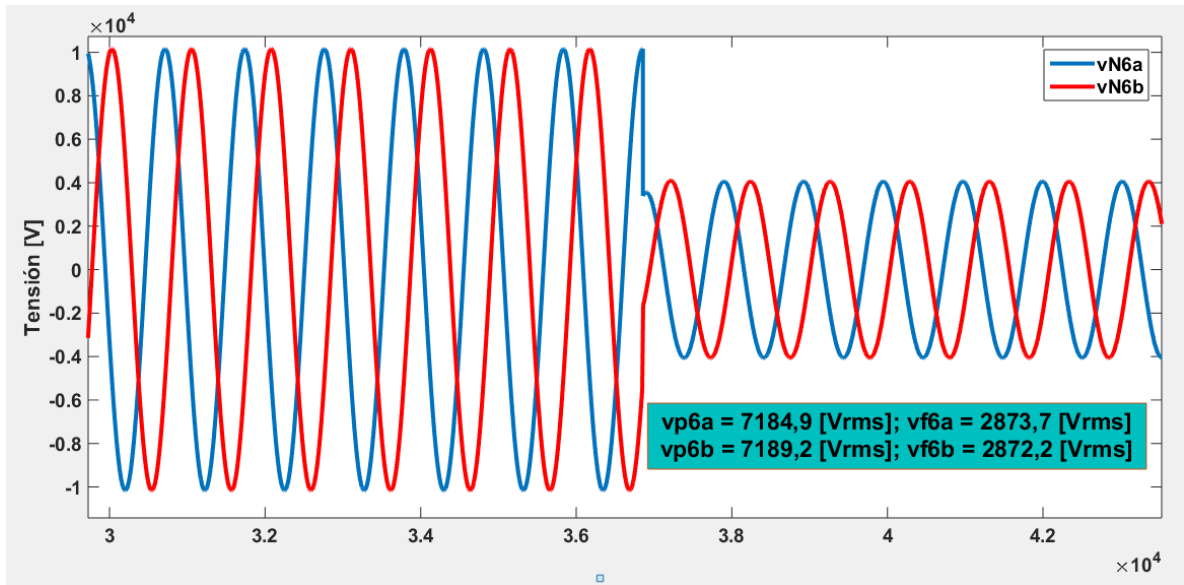
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
<b>A</b>	2368,5	1424,3	1925,4	1426,6	1438	1428,2	41,7060787	26,0257609	0,79276773	38,4972808
<b>B</b>	2369,9	1426,2	1926,6	1428,6	1438,9	1430,2	41,7405154	25,9732171	0,71582459	38,5832866
<b>Resultado suma deltas</b>							83,4465941	51,9989779	<b>1,50859232</b>	77,0805674

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 8

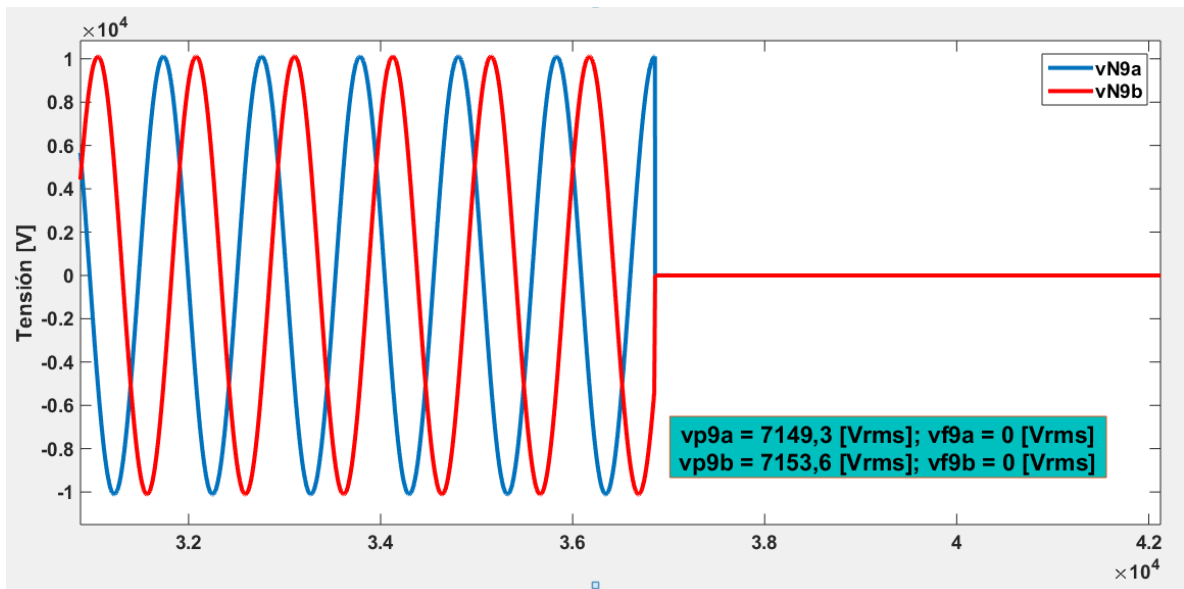
**Figura A113.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



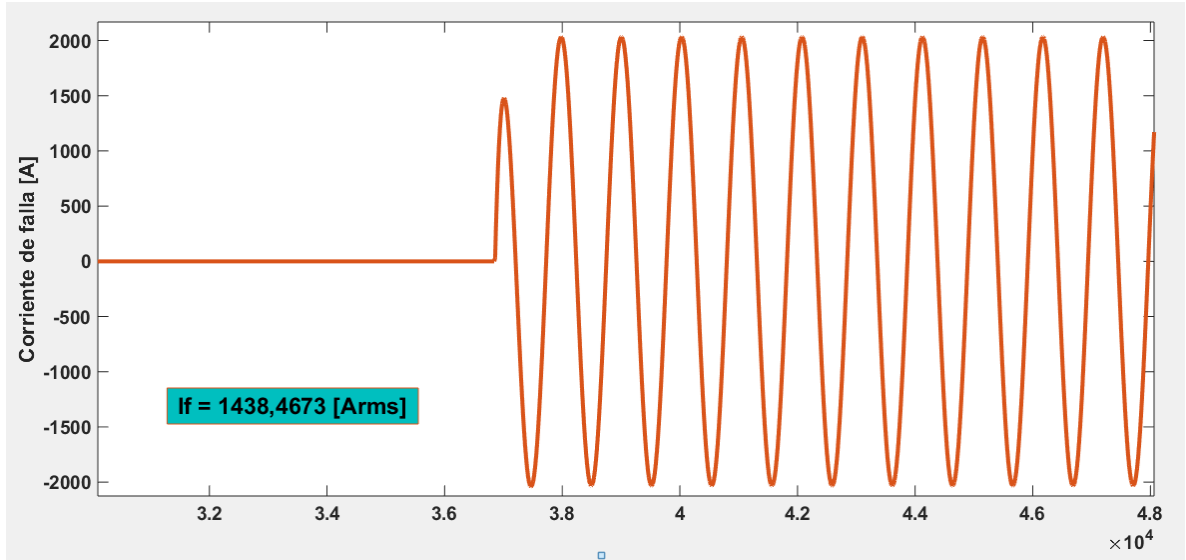
**Figura A114.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



**Figura A115.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



**Figura A116.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 8



**Tabla A32.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 8

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
<b>A</b>	5171,071891	2873,186984	0	1380,691526	878,3818355
<b>B</b>	5171,071891	2873,186984	0	1380,691526	878,3818355

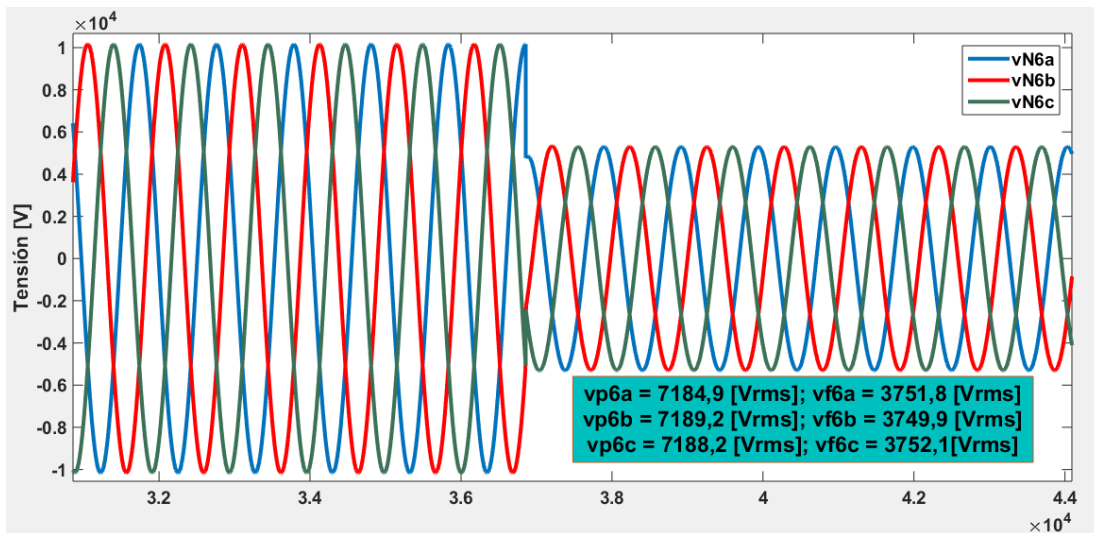
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
<b>A</b>	2368,5	1424,3	1925,4	1426,6	1438	1428,2	41,7060787	26,02576088	0,792767733	38,49728081
<b>B</b>	2369,9	1426,2	1926,6	1428,6	1438,9	1430,2	41,74051538	25,97321707	0,715824588	38,58328657
<b>Resultado suma deltas</b>							83,44659407	51,99897795	<b>1,508592321</b>	77,08056737

## A.4 Simulación de cada tipo de falla en los nodos eléctricos de la zona 4

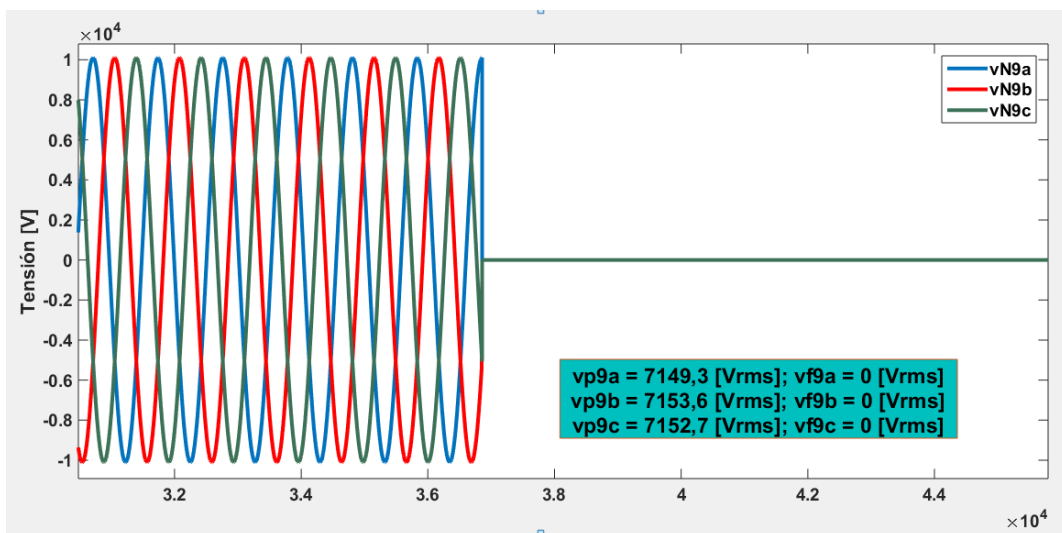
### A.4.1 Nodo eléctrico 9

#### Falla trifásica en el nodo 9

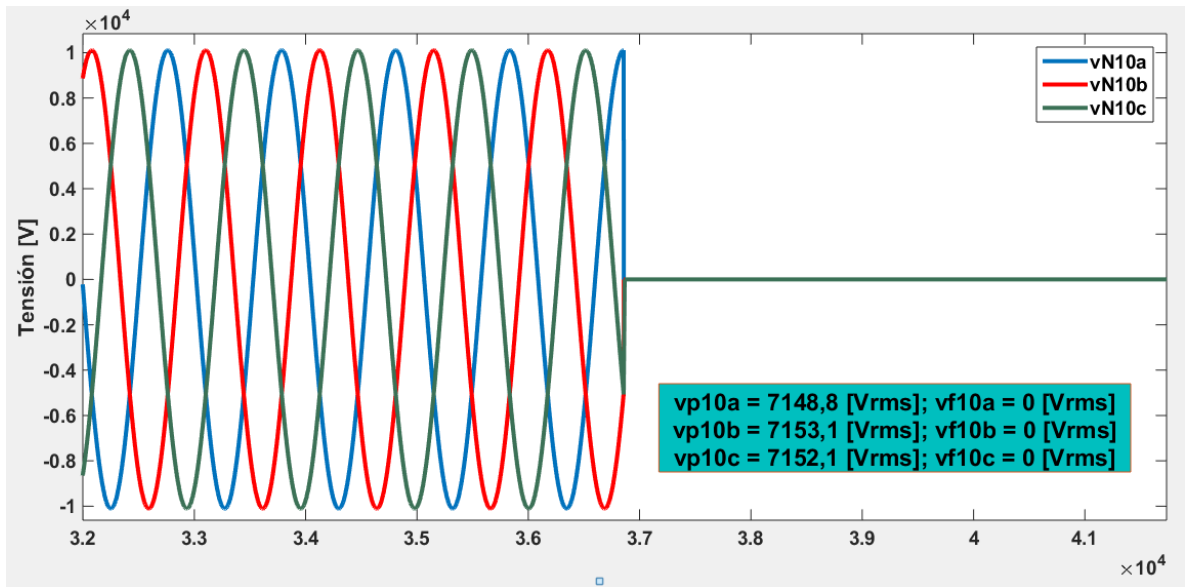
**Figura A117.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



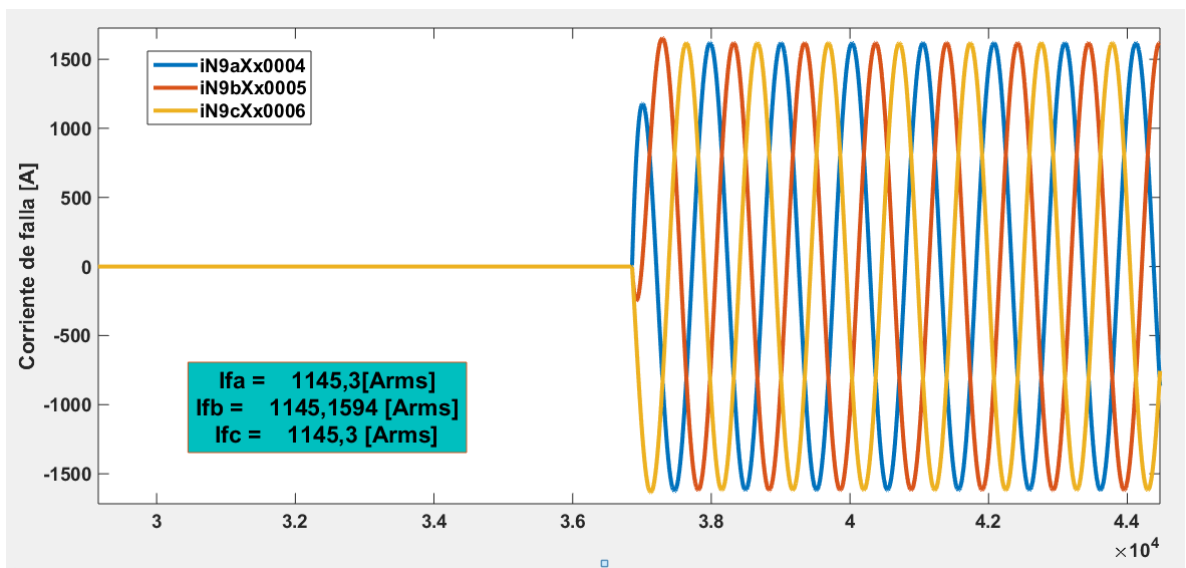
**Figura A118.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



**Figura A119.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



**Figura A120.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 9



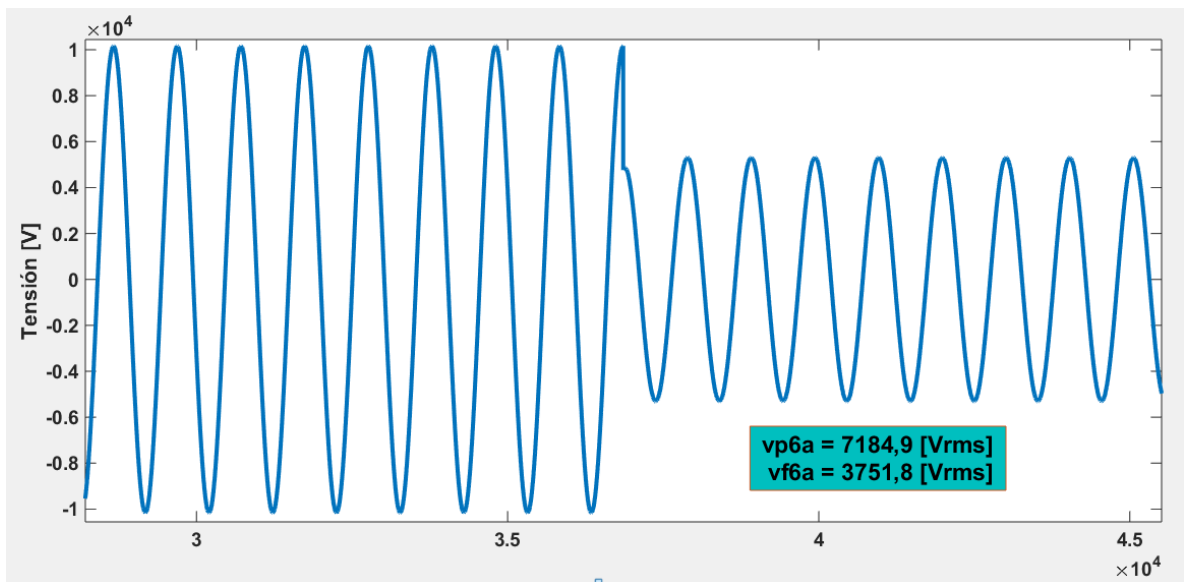
**Tabla A33.** Resultados falla trifásica en el nodo 9

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>6</sub>	V <sub>9</sub>	V <sub>10</sub>	I <sub>9</sub>	I <sub>10</sub>
A	3751,20147	0	0	1146,805709	0
B	3751,27218	0	0	1146,827326	0
C	3751,27218	0	0	1146,827326	0

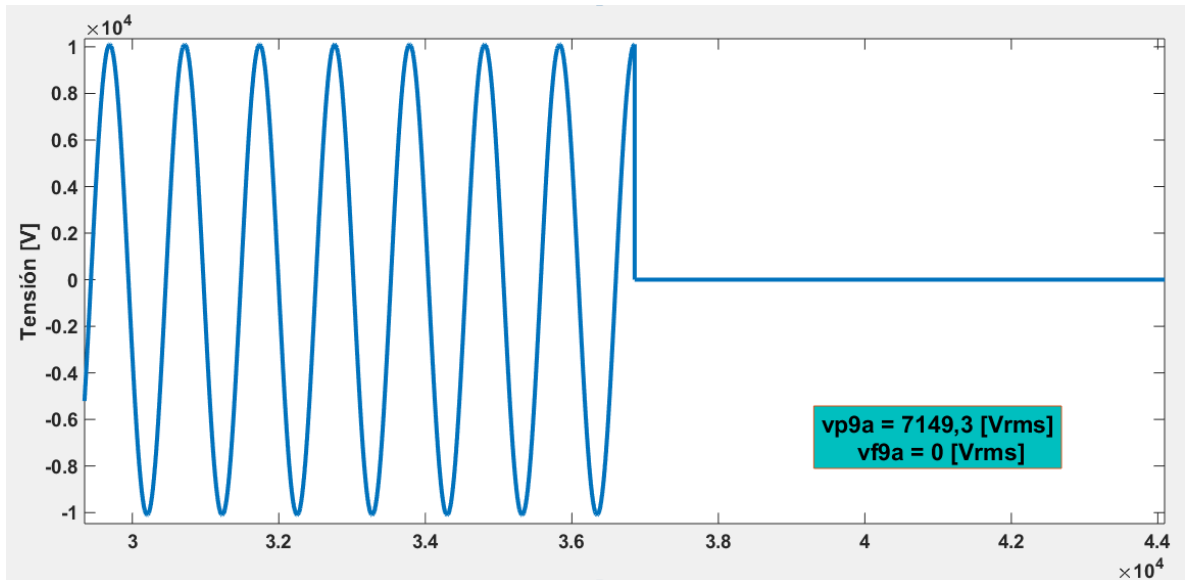
Fase	Corrientes de falla calculadas [A <sub>rms</sub> ]		Deltas	
	I <sub>109</sub>	I <sub>910</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>
A	1144,9	1145	0,1661754	100
B	1145,6	1145,7	0,10701929	100
C	1145,4	1145,5	0,12445871	100
Resultado suma deltas			0,3976534	300

### Falla monofásica en el nodo 9

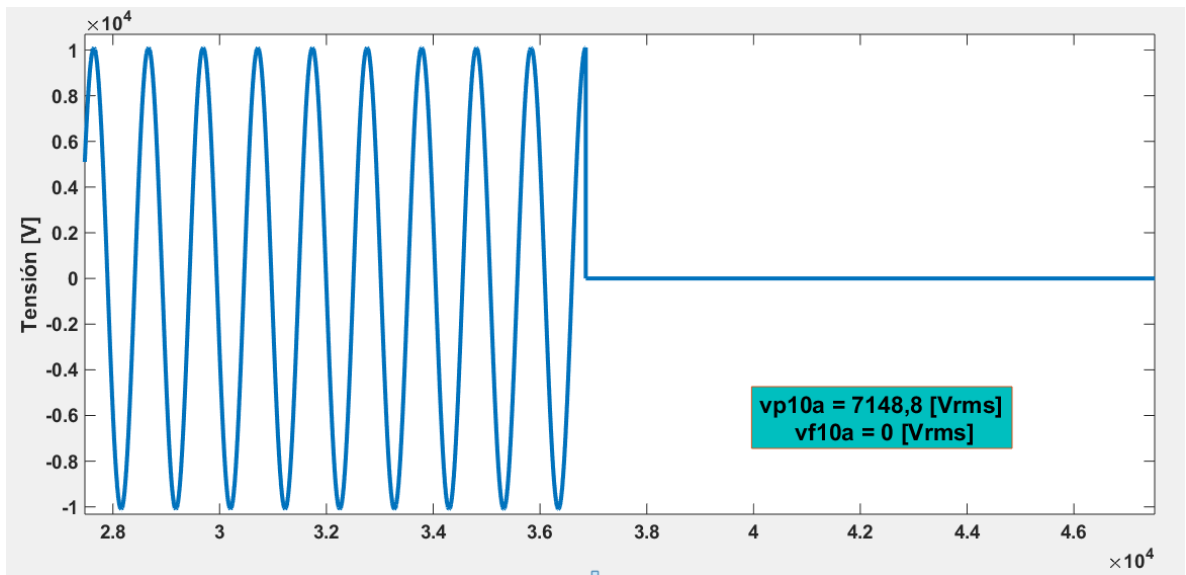
**Figura A121.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 9



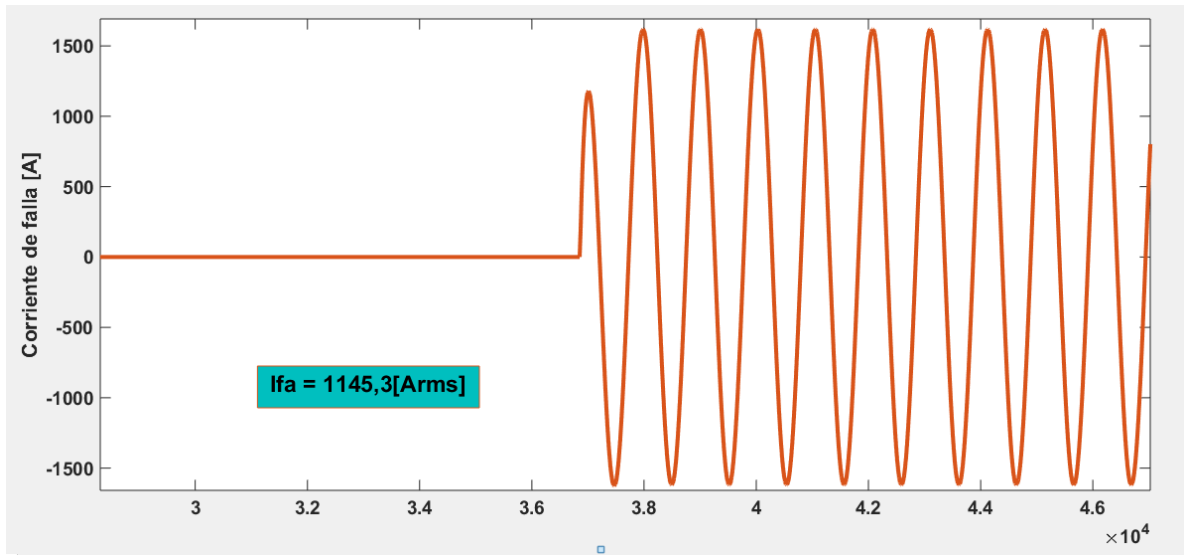
**Figura A122.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 9



**Figura A123.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es monofásica en el nodo 9



**Figura A124.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 9



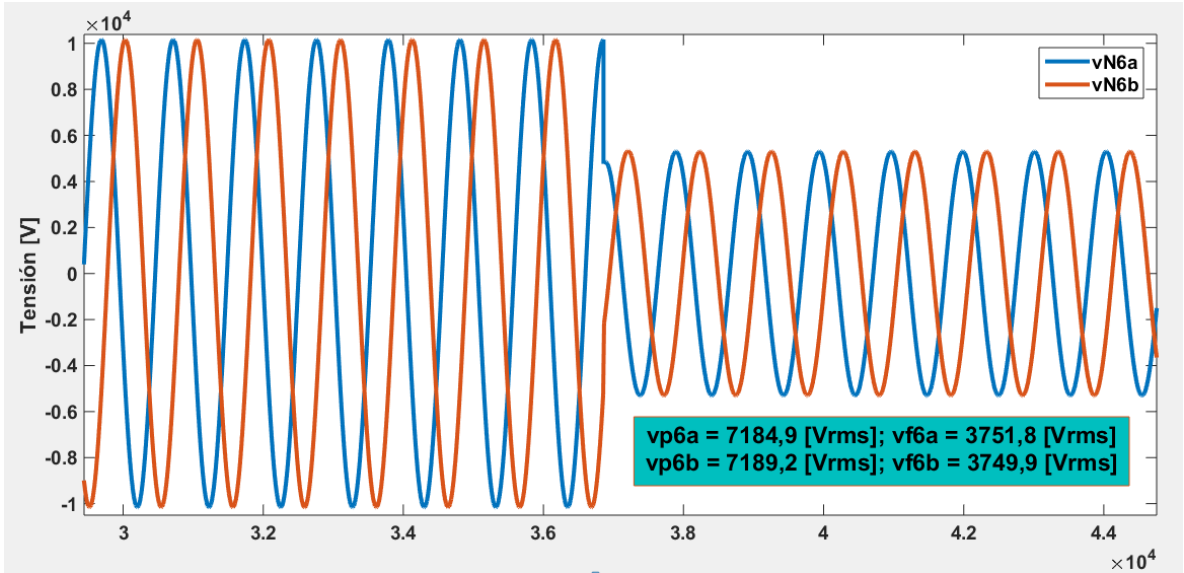
**Tabla A34.** Resultados falla monofásica en el nodo 9

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
<b>A</b>	3751,20147	0	0	1146,80571	0

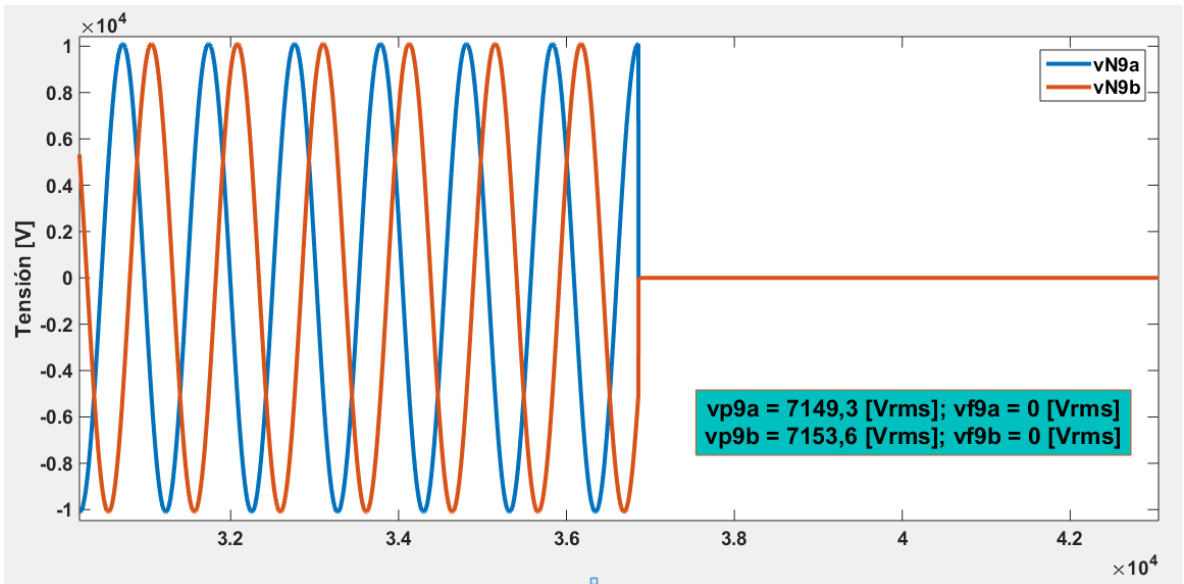
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
<b>A</b>	1144,9	1145	0,1661754	100

## Falla línea – línea en el nodo 9

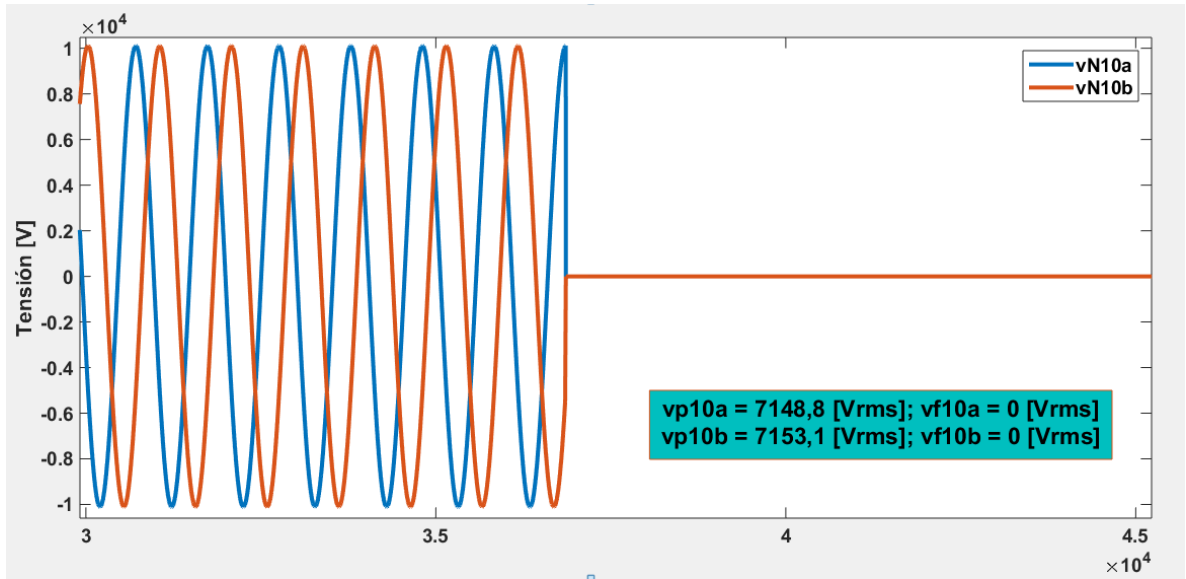
**Figura A125.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 9



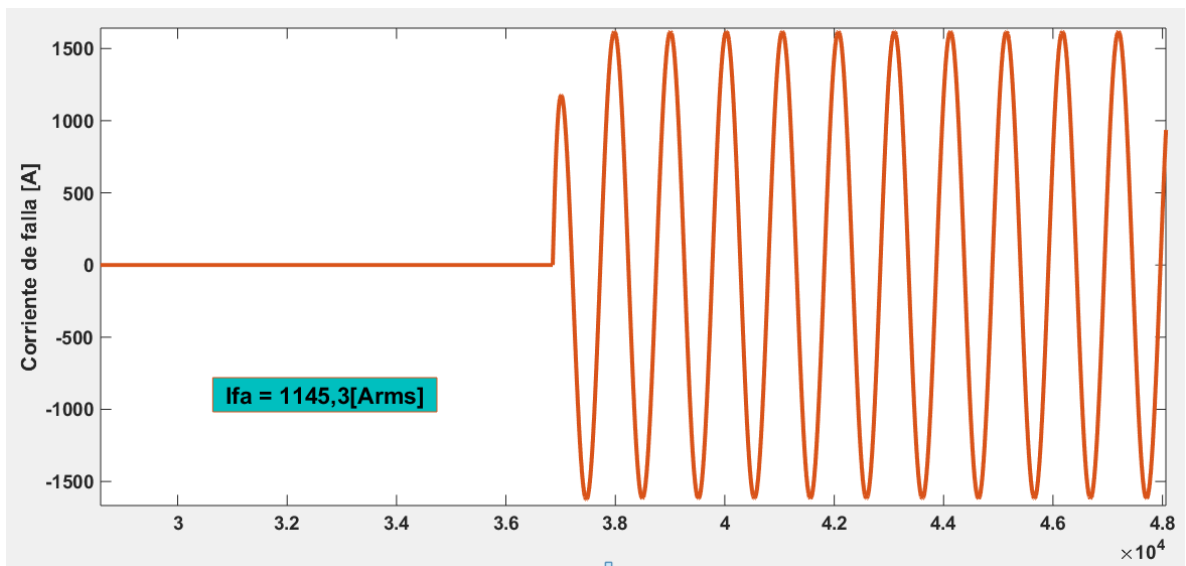
**Figura A126.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica en el nodo 9



**Figura A127.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es bifásica en el nodo 9



**Figura A128.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 9



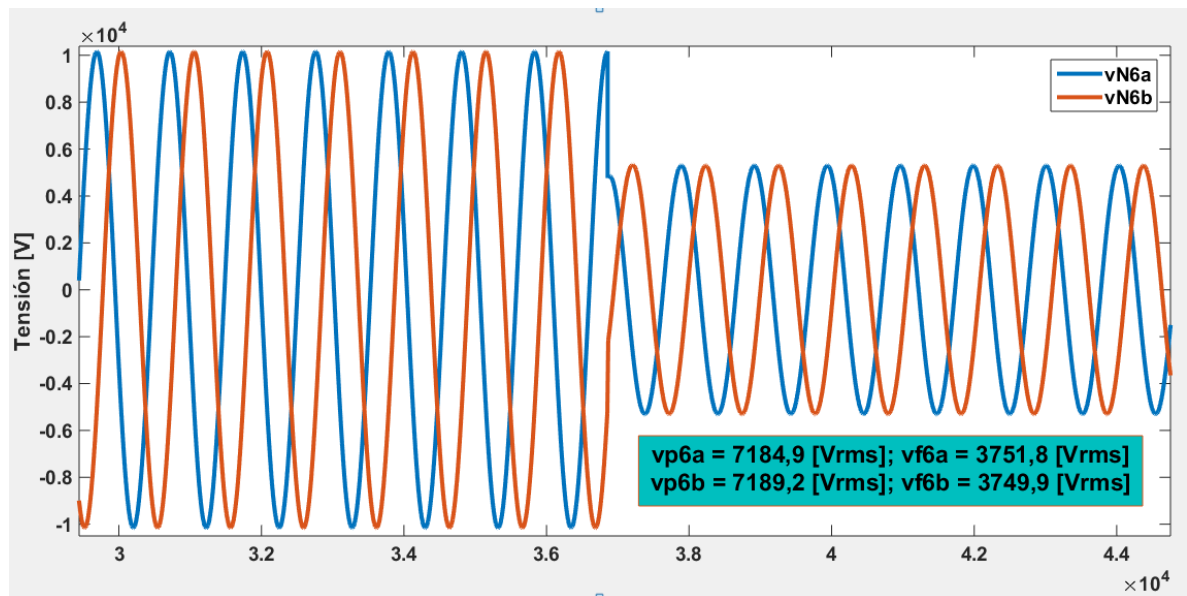
**Tabla A35.** Resultados falla bifásica en el nodo 9

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
<b>A</b>	3751,27218	0	0	1146,82733	0
<b>B</b>	3751,27218	0	0	1146,82733	0

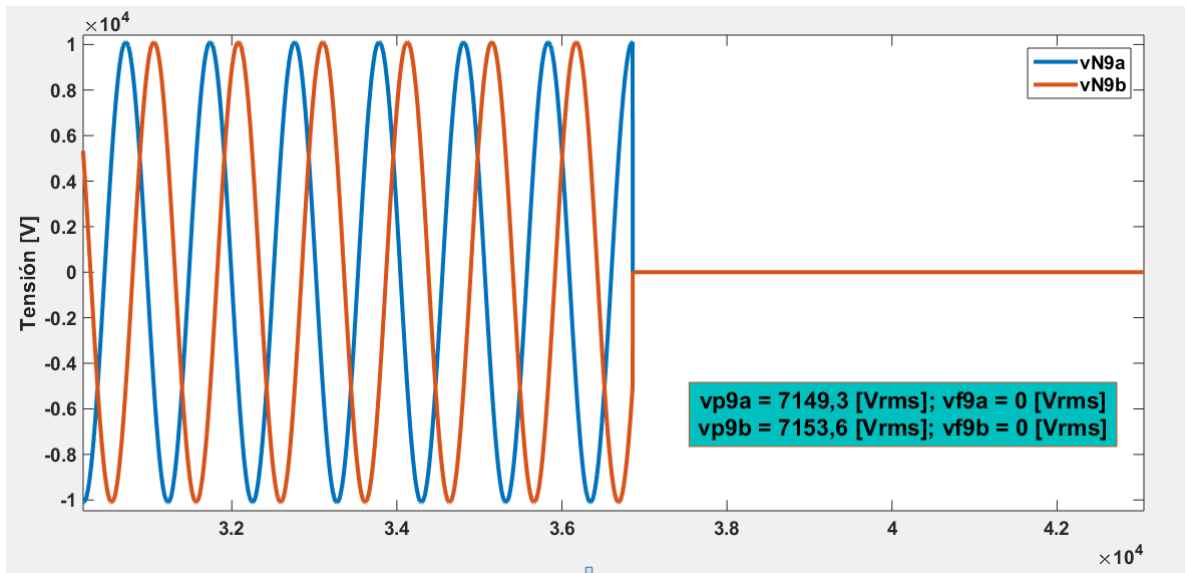
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
<b>A</b>	1144,9	1145	0,16805725	100
<b>B</b>	1145,6	1145,7	0,10701929	100
<b>Resultado suma deltas</b>			<b>0,27507654</b>	<b>200</b>

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 9

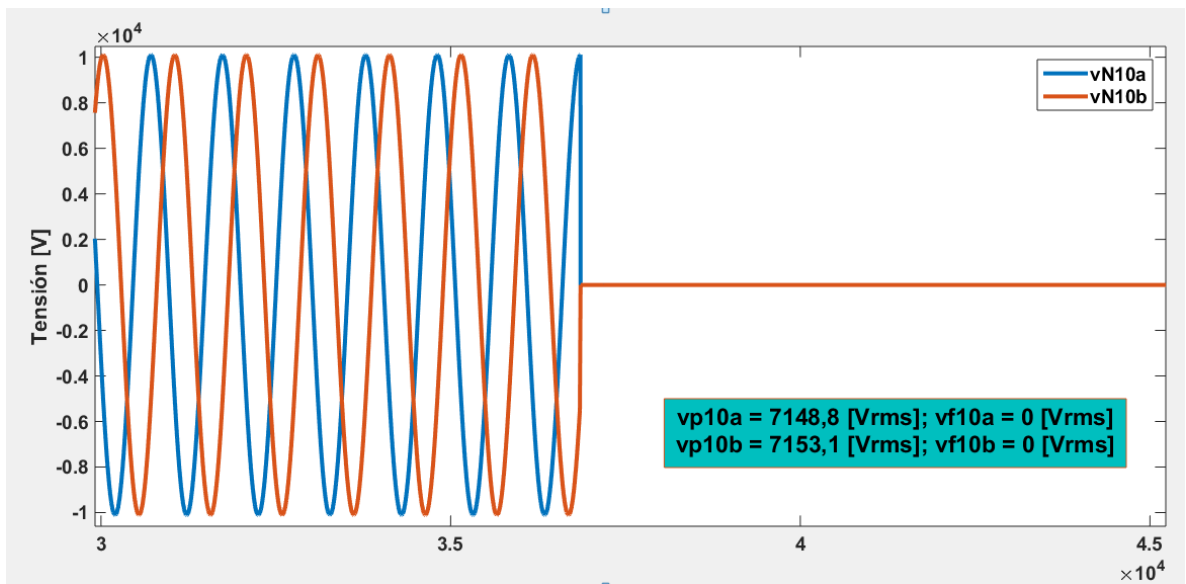
**Figura A129.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 9



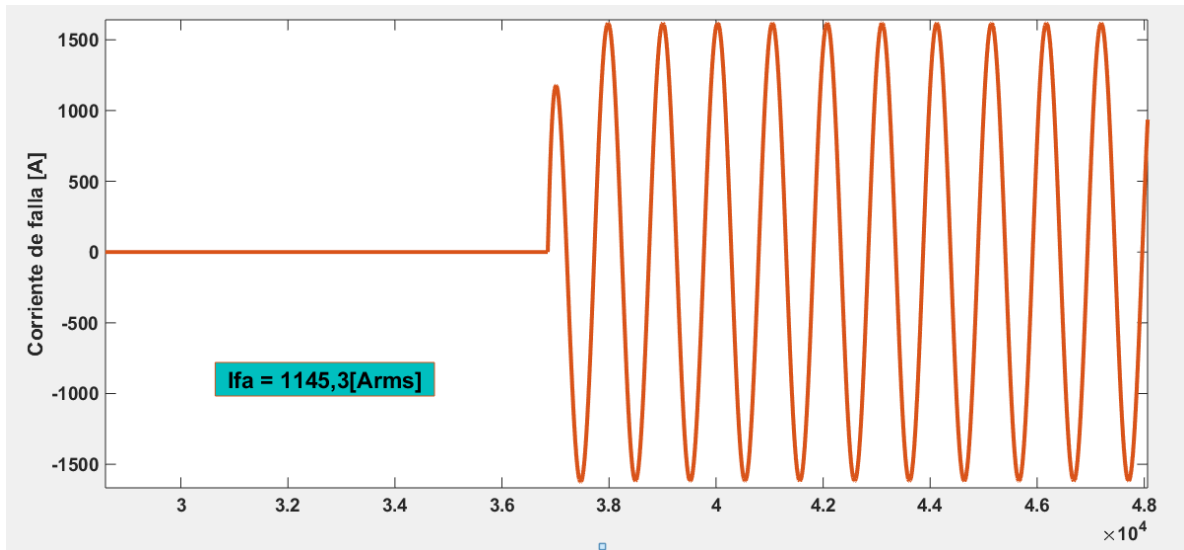
**Figura A130.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 9



**Figura A131.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 9



**Figura A132.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 9



**Tabla A36.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 9

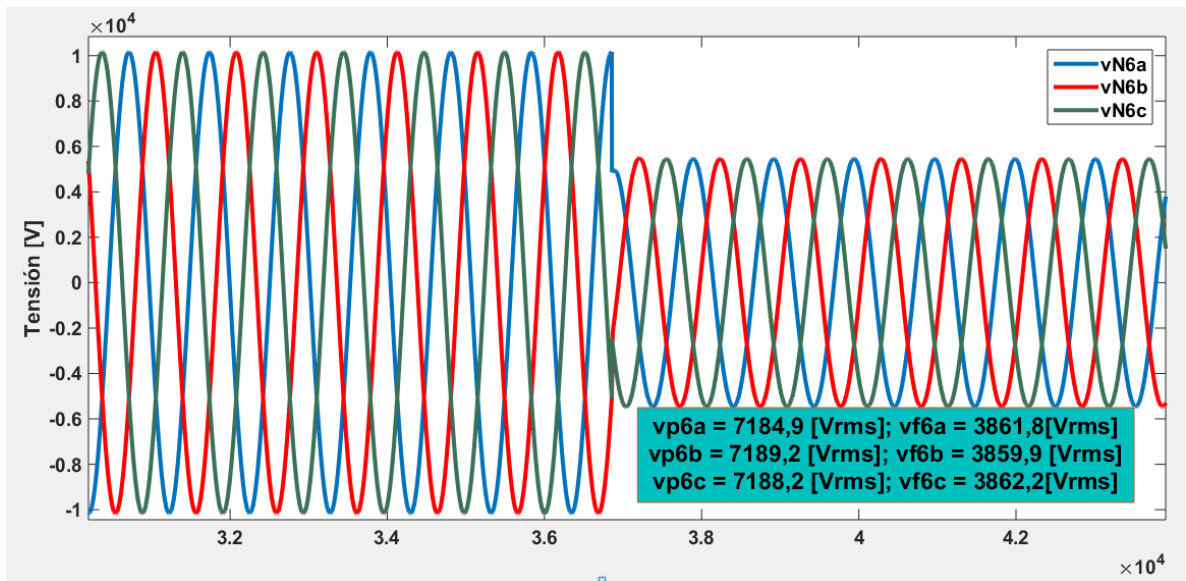
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3751,272185	0	0	1146,827326	0
B	3751,272185	0	0	1146,827326	0

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1145	0,16805725	100
B	1145,6	1145,7	0,10701929	100
Resultado suma deltas			0,27507654	200

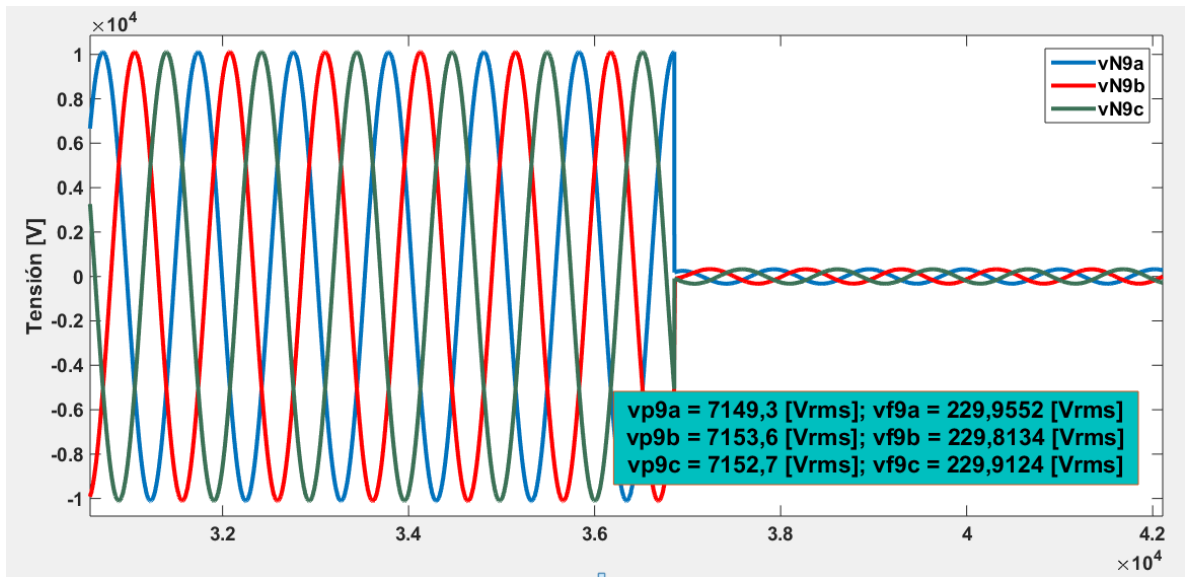
## A.4.2 Nodo eléctrico 10

### Falla trifásica en el nodo 10

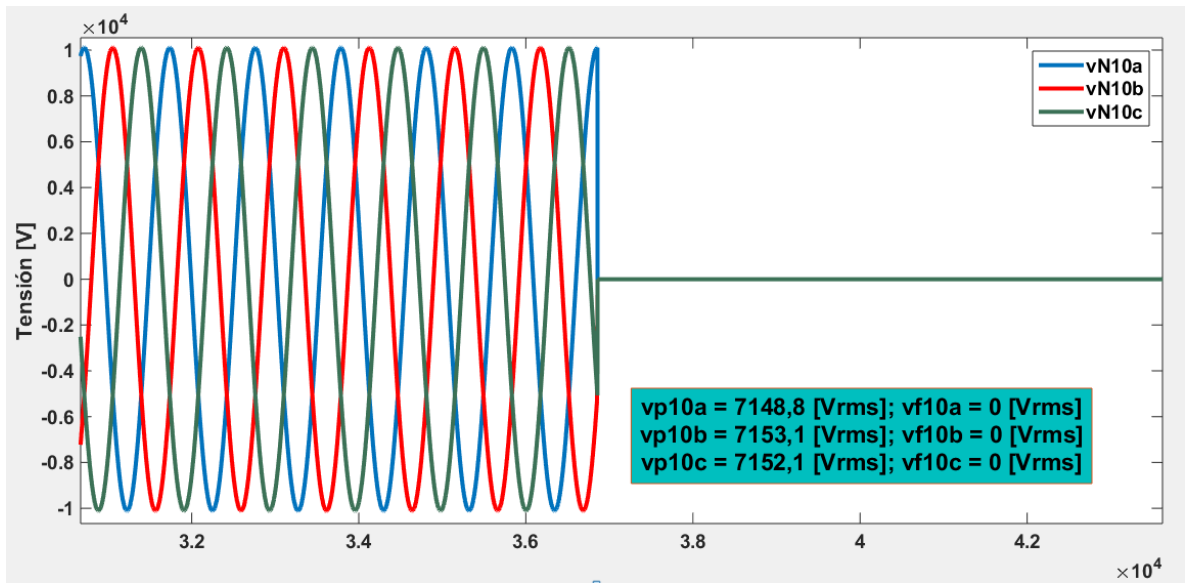
**Figura A133.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica en el nodo 10



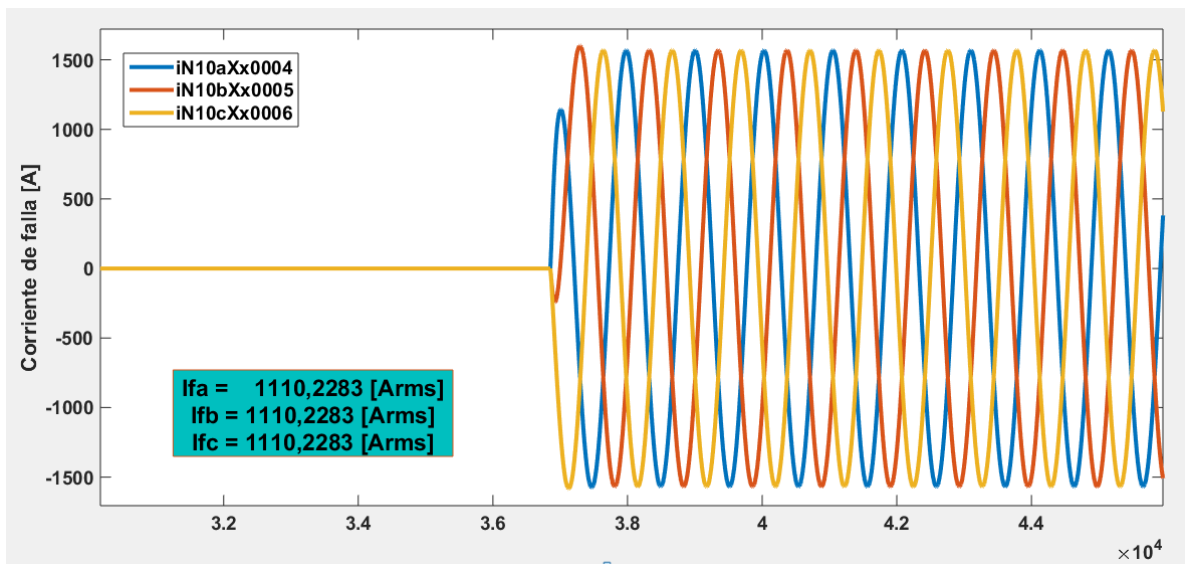
**Figura A134.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica en el nodo 10



**Figura A135.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es trifásica en el nodo 10



**Figura A136.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 10



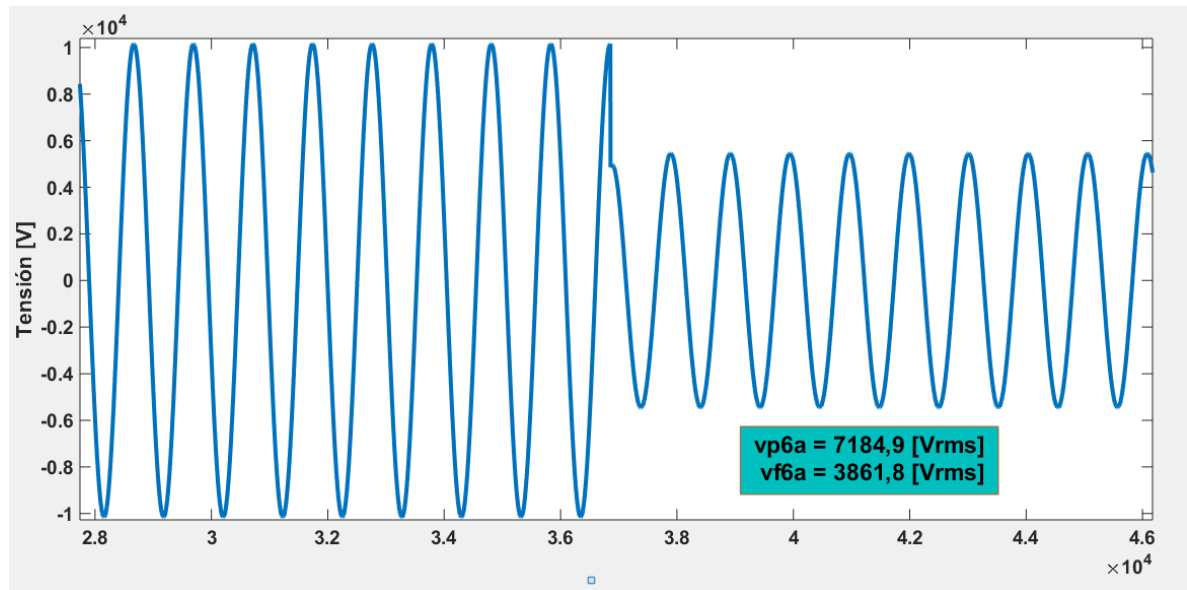
**Tabla A37.** Resultados falla trifásica en el nodo 10

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3861,298	229,894557	0	1110,181426	1110,601723
B	3861,298	229,894557	0	1110,181426	1110,601723
C	3861,298	229,894557	0	1110,181426	1110,601723

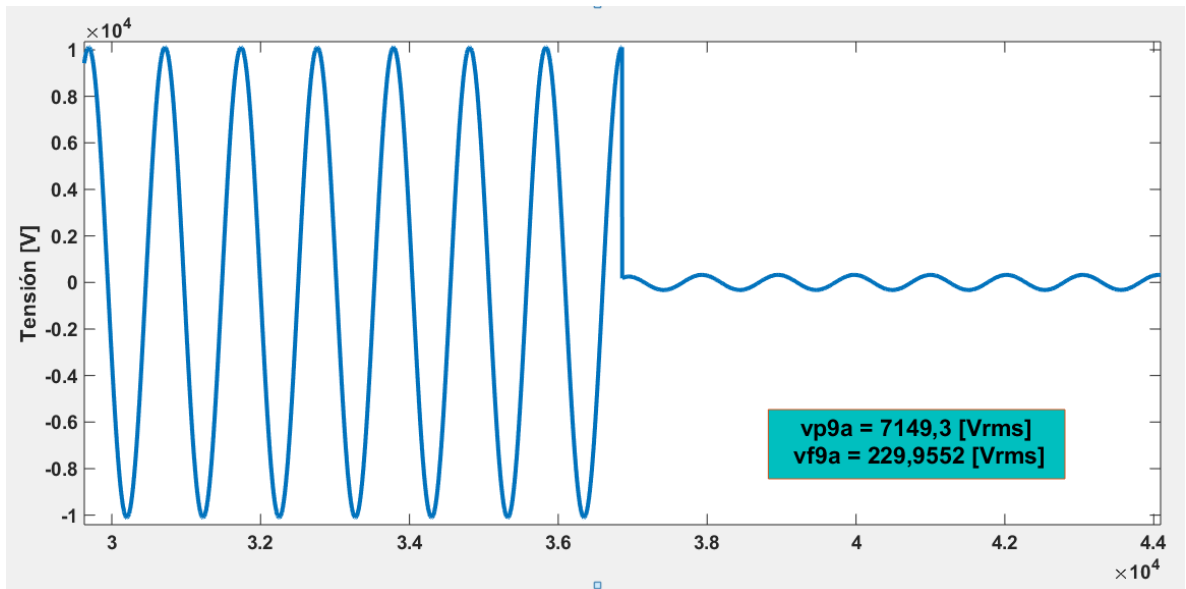
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1108,2	3,03245474	0,21625423
B	1145,6	1108,9	3,09170516	0,15322533
C	1145,4	1108,7	3,07478386	0,17123359
Resultado suma deltas			9,19894377	0,54071315

### Falla monofásica en el nodo 10

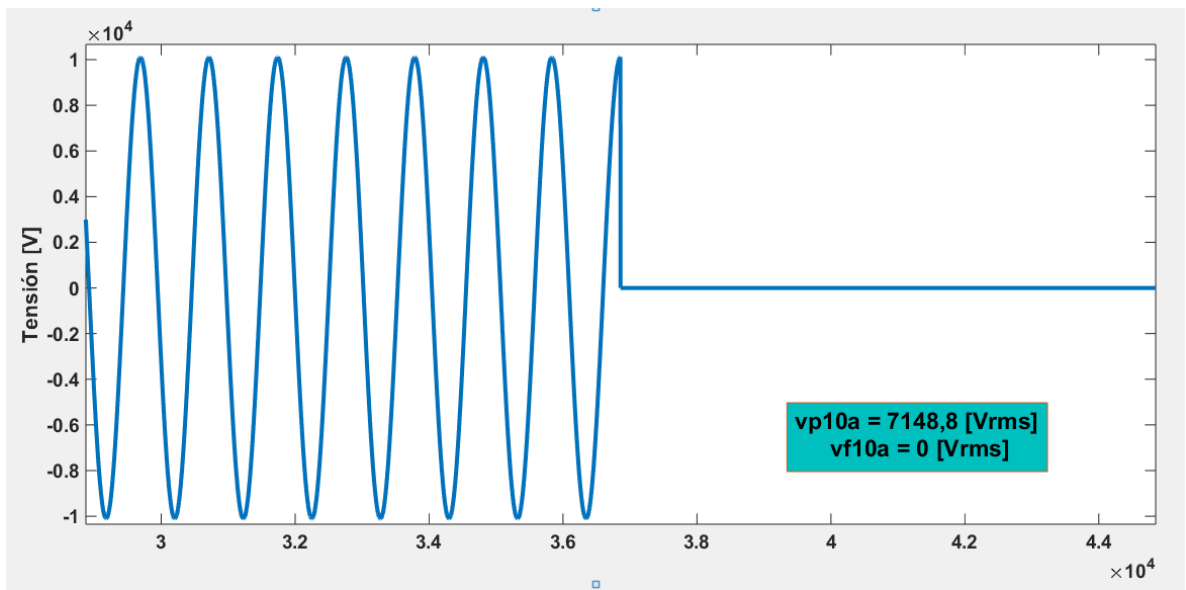
**Figura A137.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



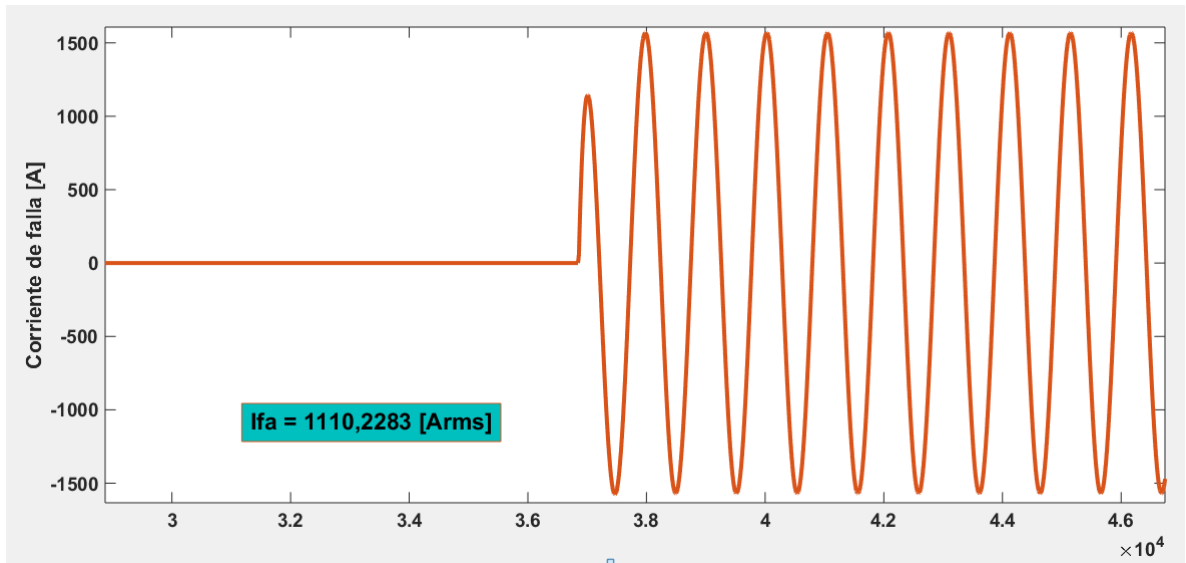
**Figura A138.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



**Figura A139.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



**Figura A140.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 10



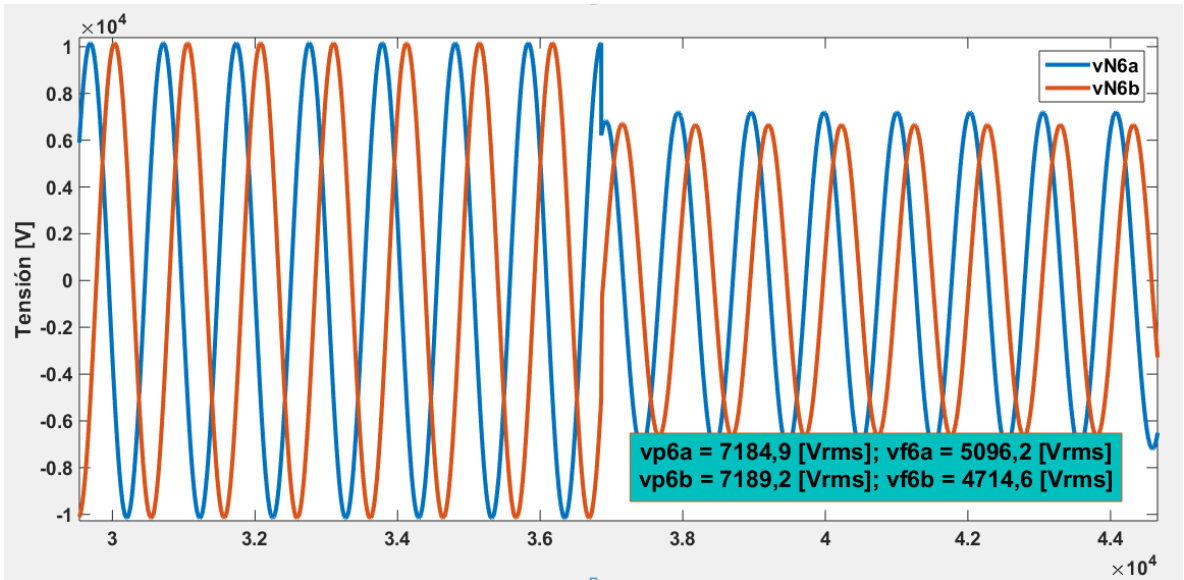
**Tabla A38.** Resultados falla monofásica en el nodo 10

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3861,298	229,894557	0	1110,18143	1110,60172

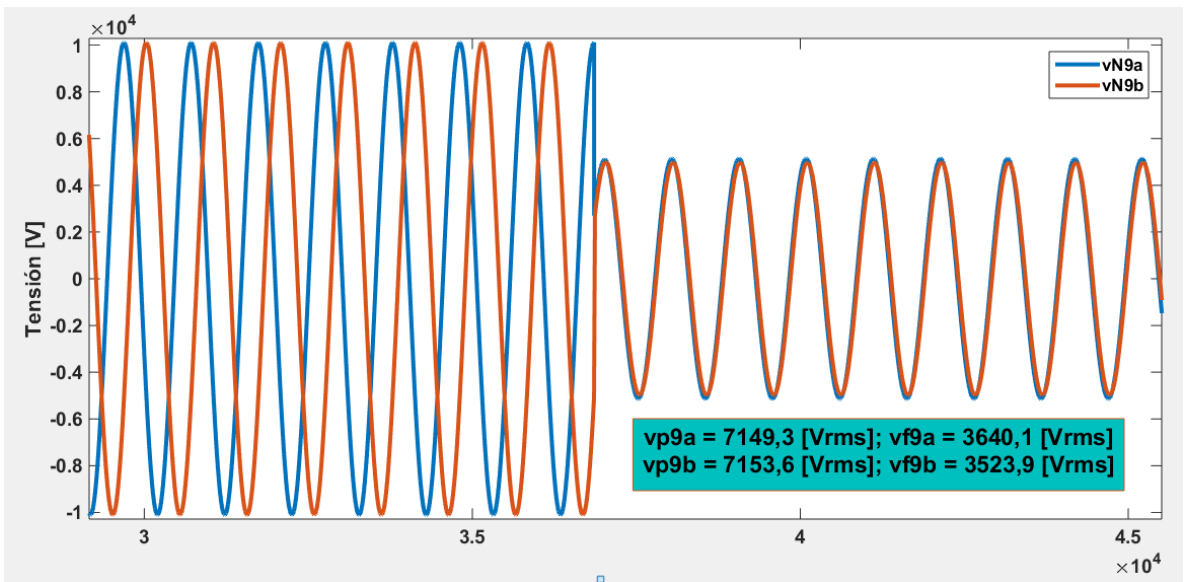
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1108,2	3,03245474	0,21625423

## Falla línea – línea en el nodo 10

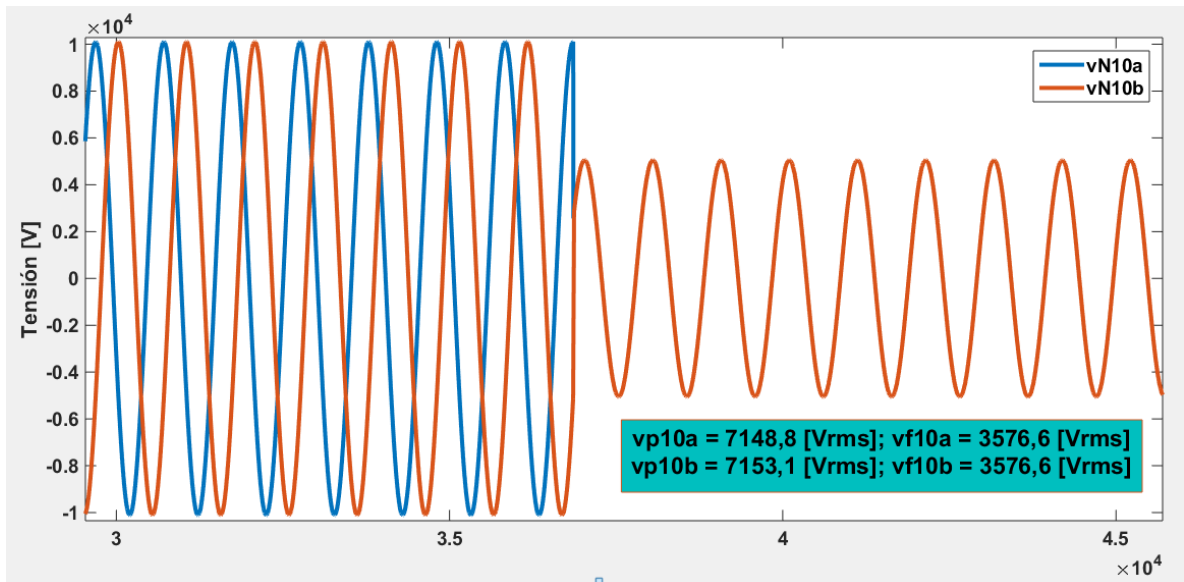
**Figura A141.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica en el nodo 10



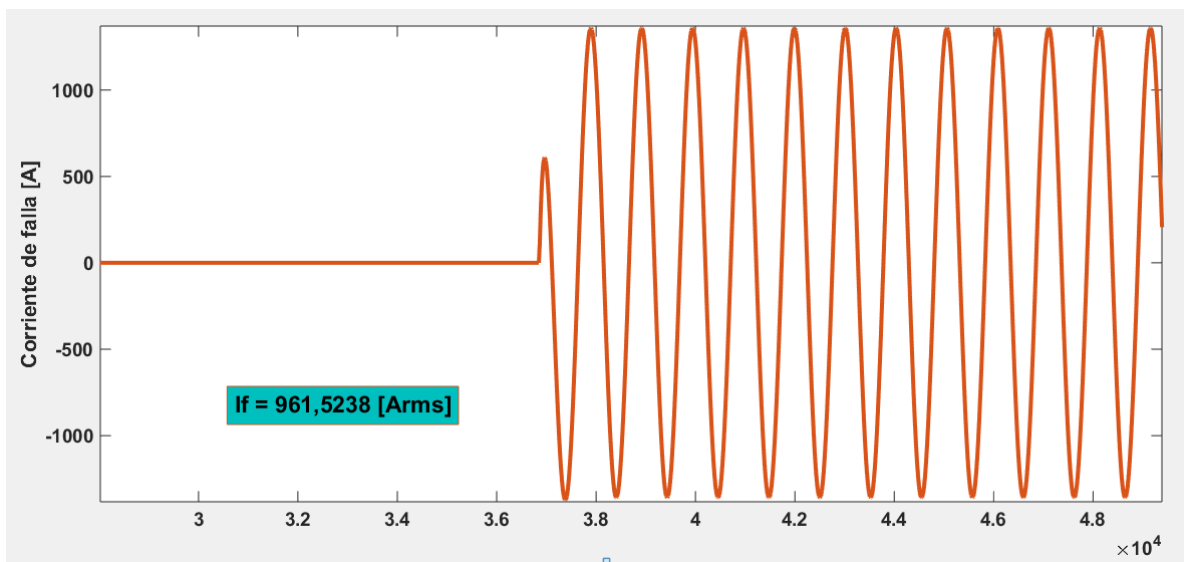
**Figura A142.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



**Figura A143.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es bifásica en el nodo 10



**Figura A144.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 10



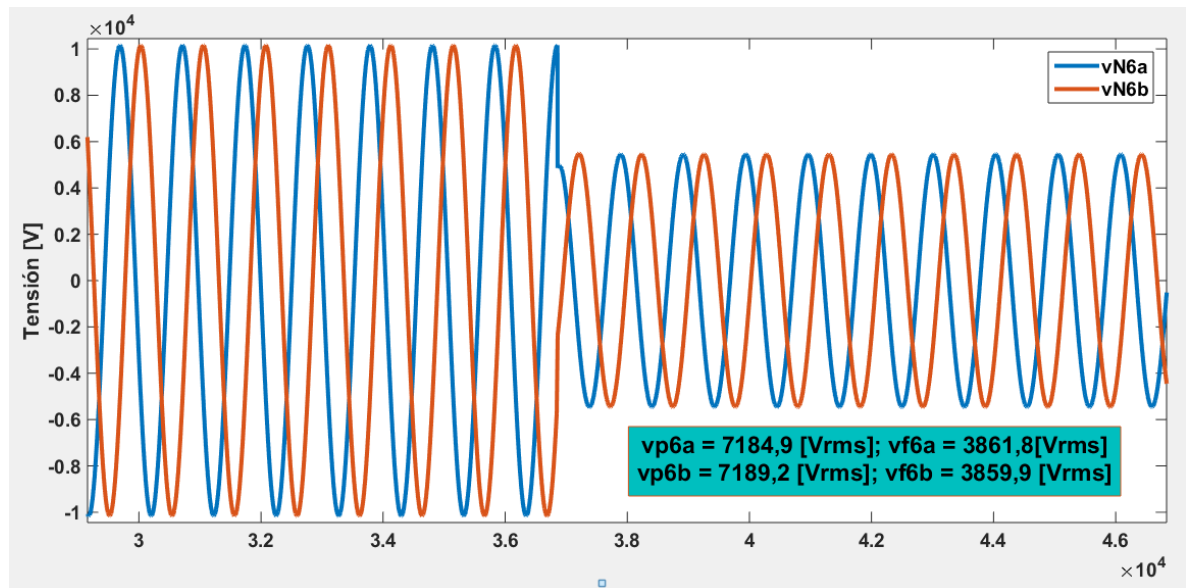
**Tabla A39.** Resultados falla bifásica en el nodo 10

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
<b>A</b>	5094,70436	3638,98363	3575,62686	445,038438	306,071341
<b>B</b>	4715,62441	3523,01812	3575,62686	364,599907	254,148524

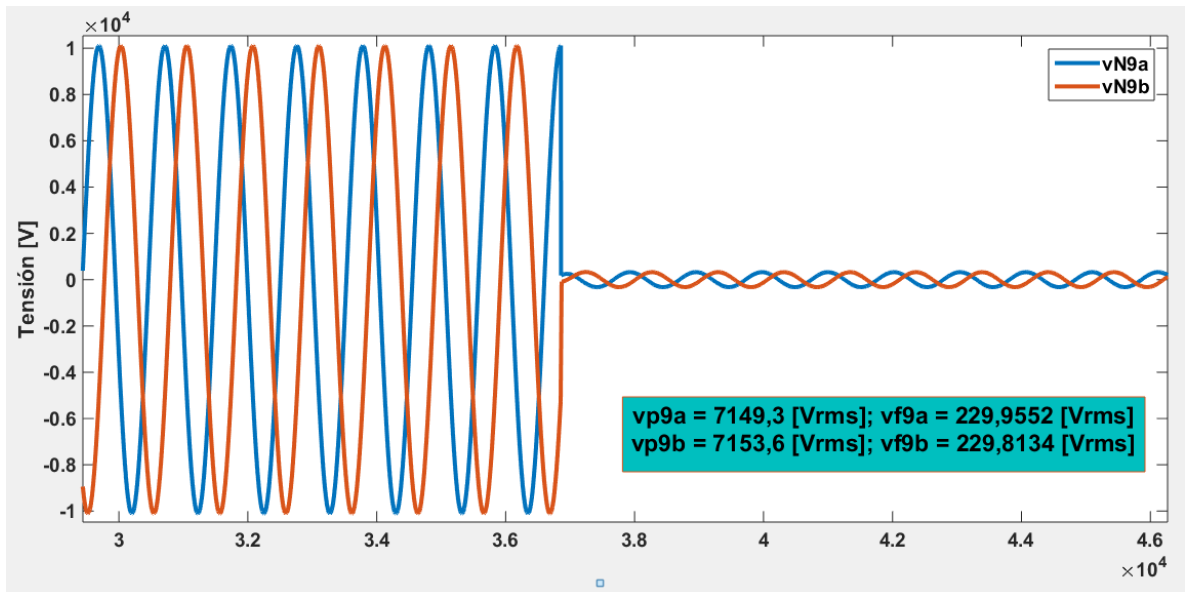
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
<b>A</b>	572,0898	652,0185	22,20829	53,0578747
<b>B</b>	572,7794	581,3195	36,3454923	56,2807502
<b>Resultado suma deltas</b>			<b>58,5537823</b>	109,338625

### Falla línea – línea a tierra en el nodo 10

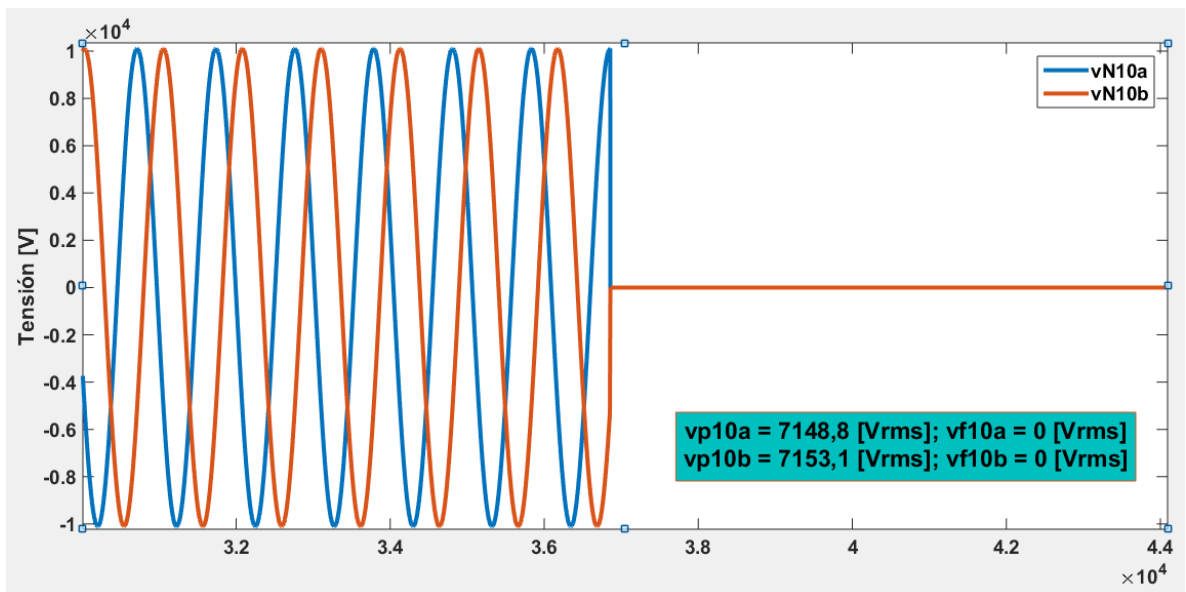
**Figura A145.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 10



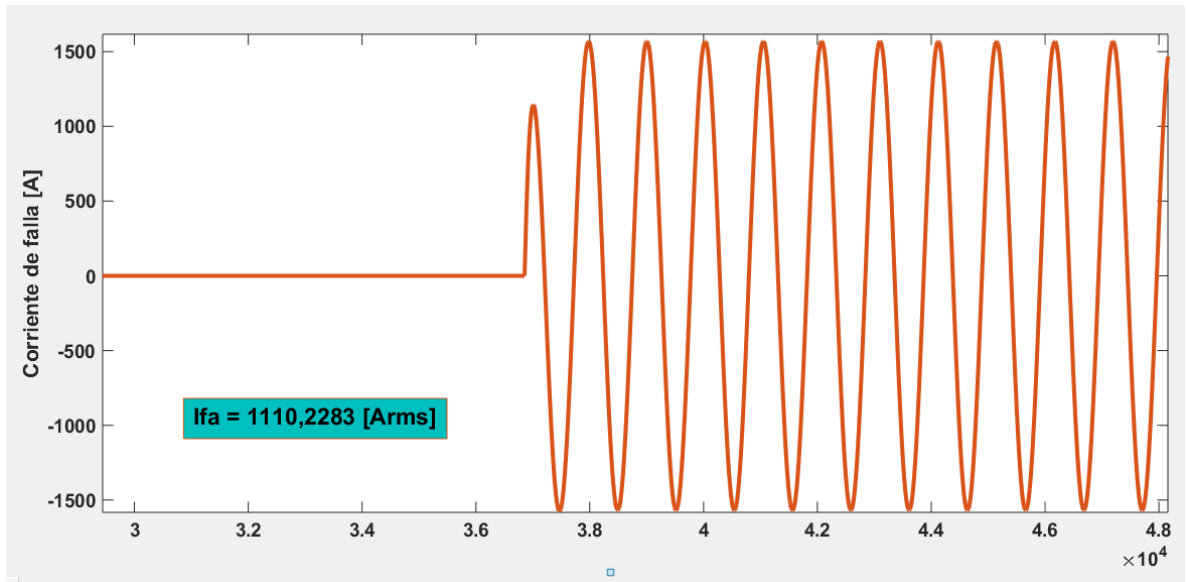
**Figura A146.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 10



**Figura A147.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 10



**Figura A148.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 10



**Tabla A40.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 10

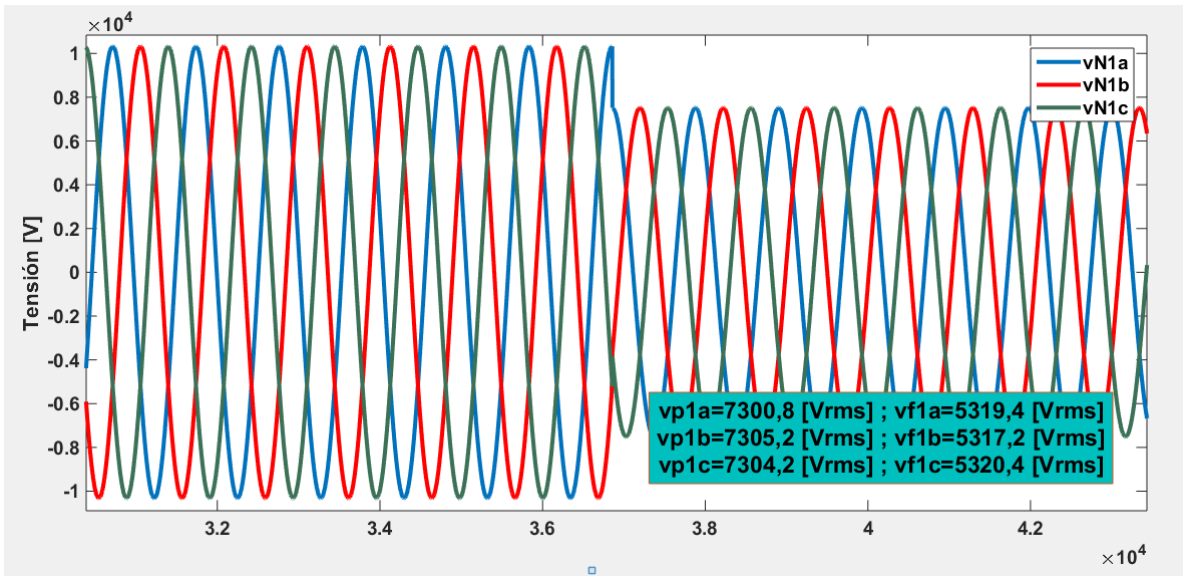
Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3861,298	229,8945567	0	1110,181426	1110,601723
B	3861,298	229,8874856	0	1110,183587	1110,567563

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1108,2	3,032454742	0,216254228
B	1145,6	1108,9	3,091516463	0,150154164
<b>Resultado suma deltas</b>			6,123971205	0,366408392

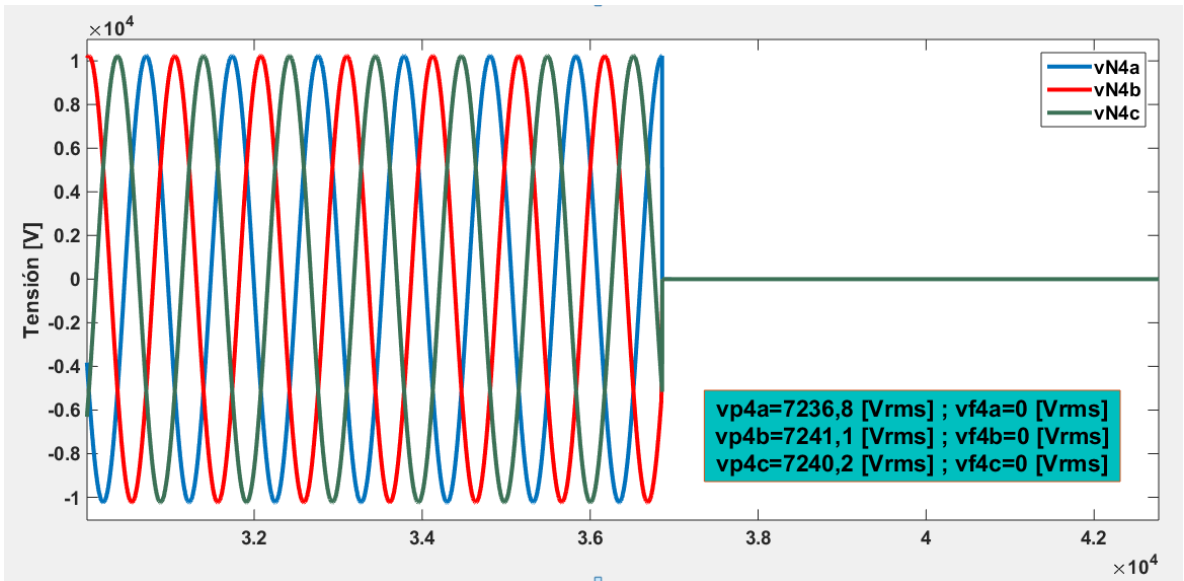
## A.5 Simulación de falla trifásica en tramos entre dos nodos eléctricos

### A.5.1 Falla trifásica entre los nodos 1 y 2

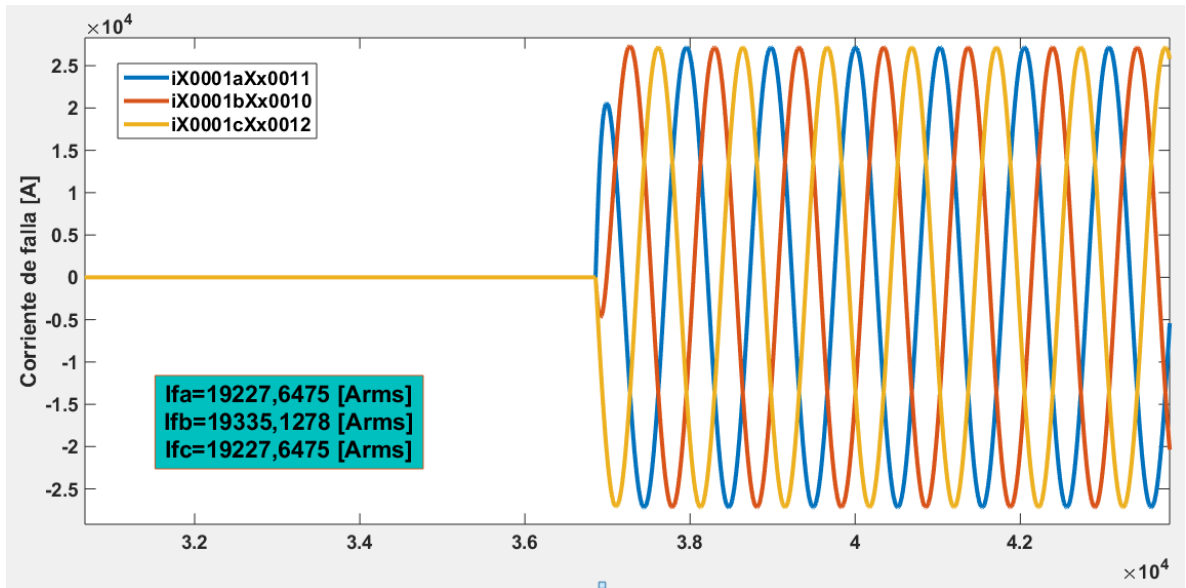
**Figura A149.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 1 y 2



**Figura A150.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 1 y 2



**Figura A151.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 1 y 2



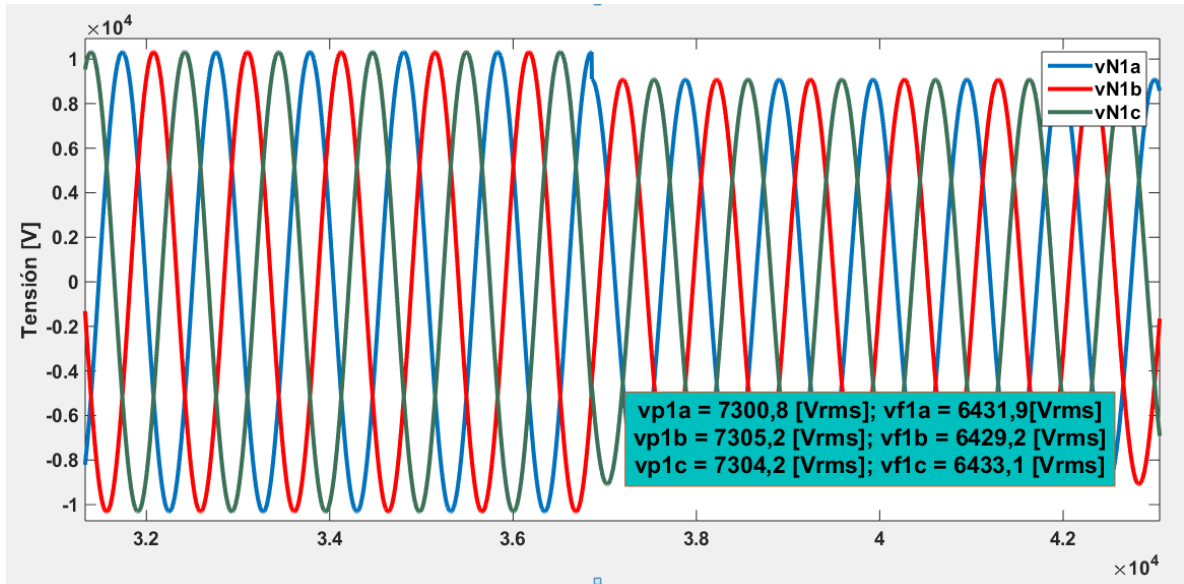
**Tabla A41.** Resultados falla trifásica entre los nodos 1 y 2

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	5318,99863	0	19231,7542	3822,21804
B	7309,25441	5318,99863	0	19231,7542	3822,21804
C	7309,25441	5318,7865	0	19233,804	3822,06561

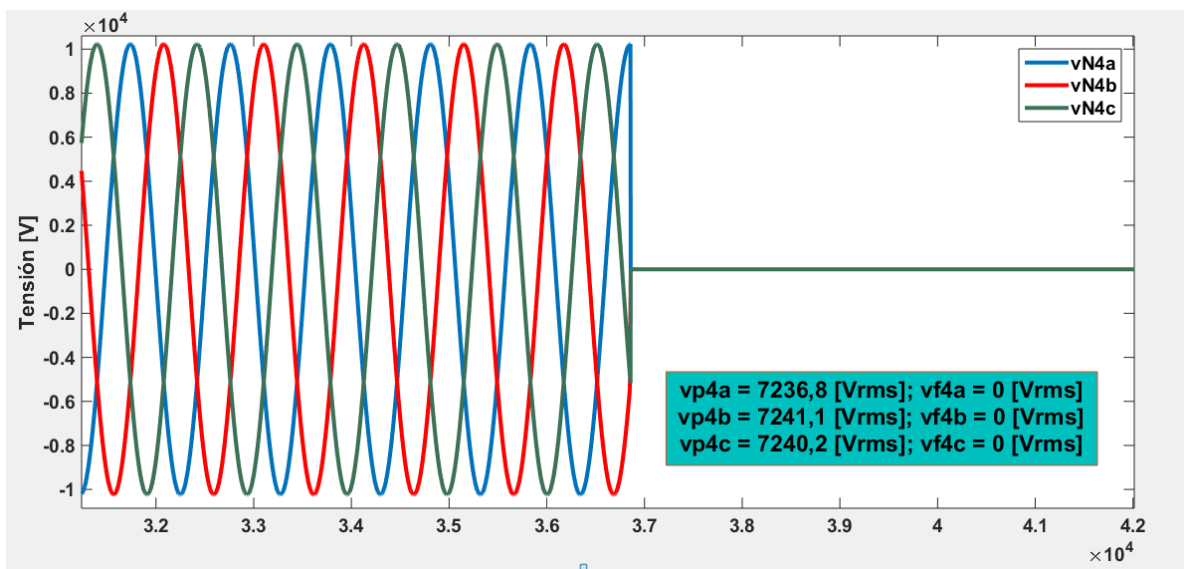
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70630	19229	11124	19296	6843,2	19338	72,7711253	42,1498778	64,5356551	80,2346776
B	70673	19294	11131	19361	6847,3	19404	72,7876923	42,3084897	64,6335417	80,3019066
C	70663	19253	11130	19320	6846,4	19362	72,7809405	42,1908274	64,563147	80,2599648
<b>Resultado suma deltas</b>							218,339758	126,649195	193,732344	240,796549

### A.5.2 Falla trifásica entre los nodos 2 y 3

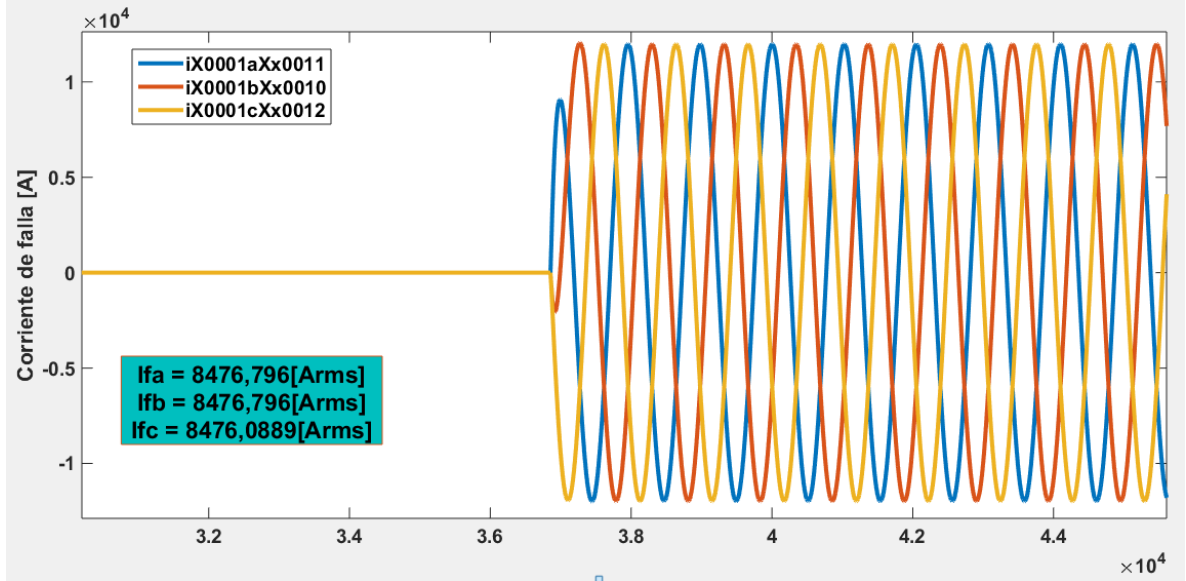
**Figura A152.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 2 y 3



**Figura A153.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 2 y 3



**Figura A154.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 2 y 3



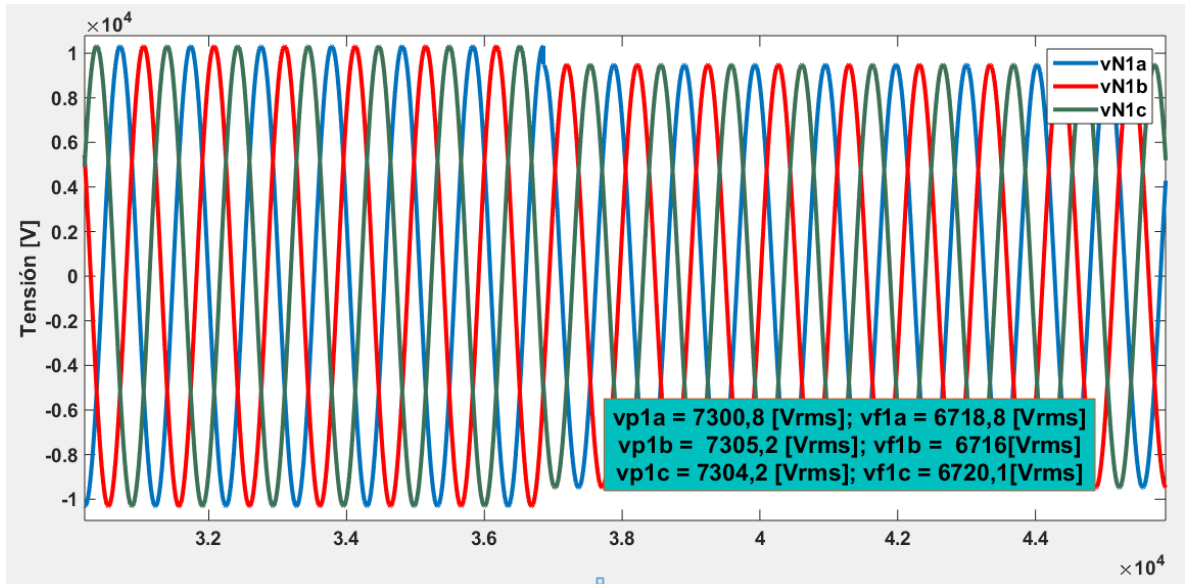
**Tabla A42.** Resultados falla trifásica entre los nodos 2 y 3

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6431,34831	0	8483,16811	4621,54952
B	7309,25441	6431,34831	0	8483,16811	4621,54952
C	7309,25441	6431,41902	0	8482,48483	4621,60033

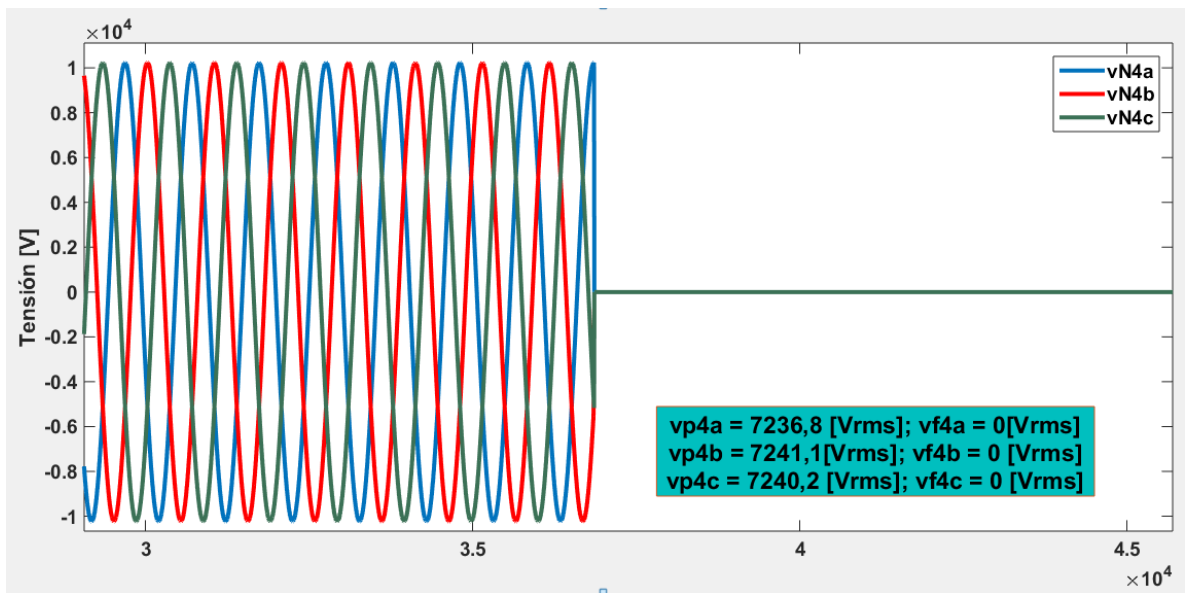
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	8432,5	11124	8461,9	6843,2	8480,4	87,9894549	24,1954333	19,1292736	45,5031659
B	70673	8502,2	11131	8531,9	6847,3	8550,5	87,9965926	23,6169257	19,7447227	45,9499501
C	70664	8454	11130	8483,5	6846,4	8502	87,9960307	24,0431267	19,2974598	45,6410218
Resultado suma deltas							263,982078	71,8554857	58,1714561	137,094138

### A.5.3 Falla trifásica entre los nodos 3 y 4

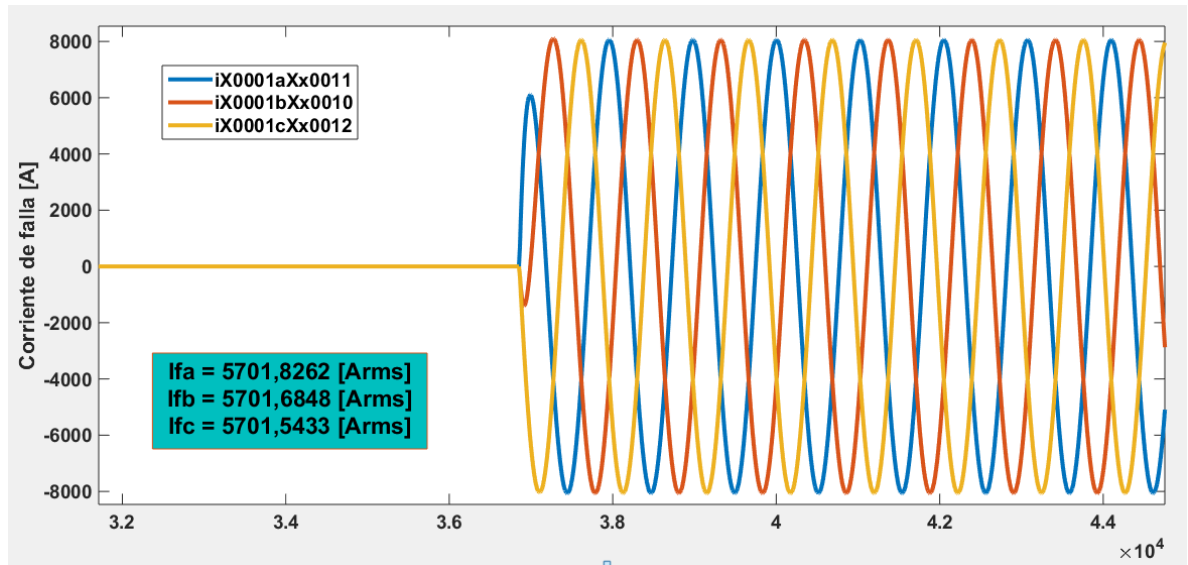
**Figura A155.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 3 y 4



**Figura A156.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 3 y 4



**Figura A157.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 3 y 4



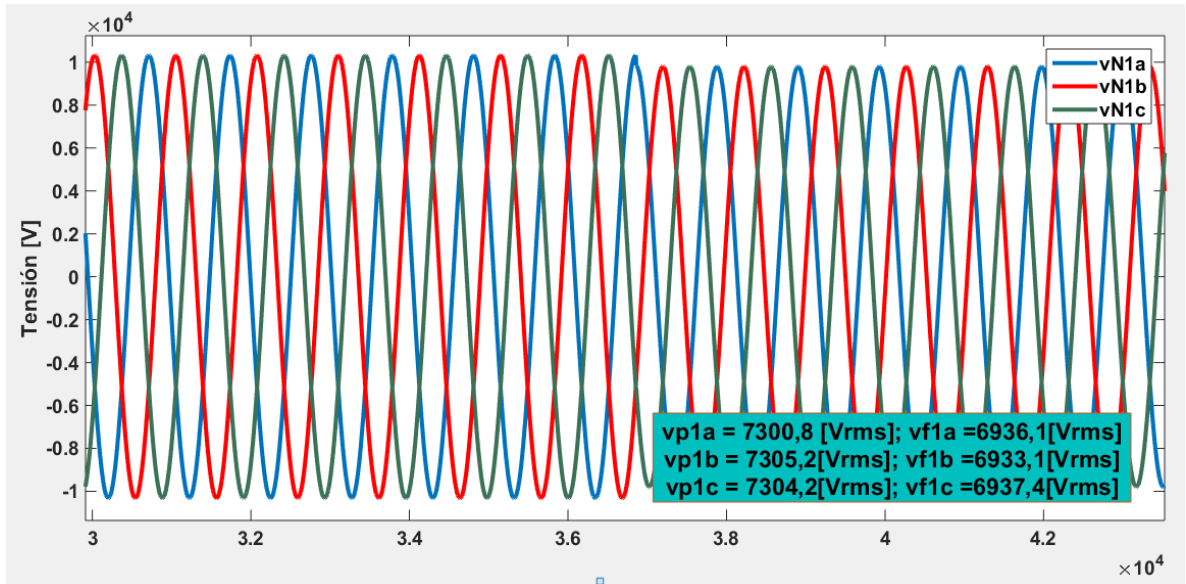
**Tabla A43.** Resultados falla trifásica entre los nodos 3 y 4

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_4$	$I_1$	$I_4$
A	7309,25441	6718,29224	0	5710,44149	4827,74665
B	7309,25441	6718,22153	0	5711,12477	4827,69584
C	7309,25441	6718,22153	0	5711,12477	4827,69584

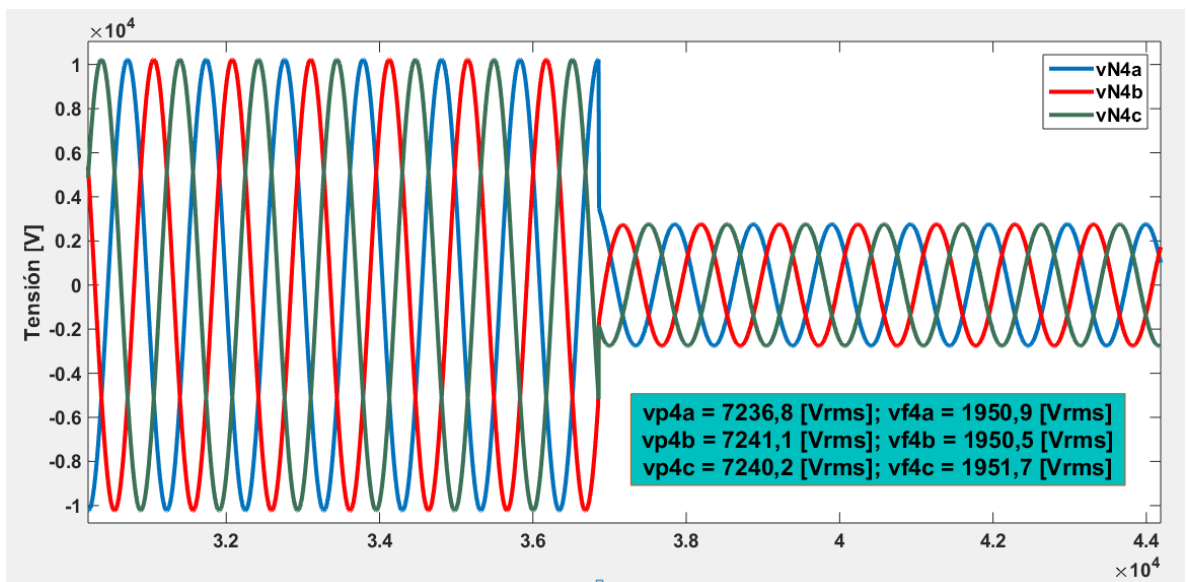
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{41}$	$I_{12}$	$I_{42}$	$I_{13}$	$I_{43}$	$I_{14}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70631	5647,9	11124	5667,6	6843,2	5680	91,915106	49,2277958	17,1790975	15,0044604
B	70673	5718,8	11131	5738,8	6847,3	5751,3	91,9189439	48,6227653	16,1888628	16,0590503
C	70664	5668,9	11130	5688,6	6846,4	5701	91,9179147	49,066487	16,9110774	15,3184382
Resultado suma deltas							275,751965	146,917048	50,2790376	46,3819489

### A.5.4 Falla trifásica entre los nodos 4 y 5

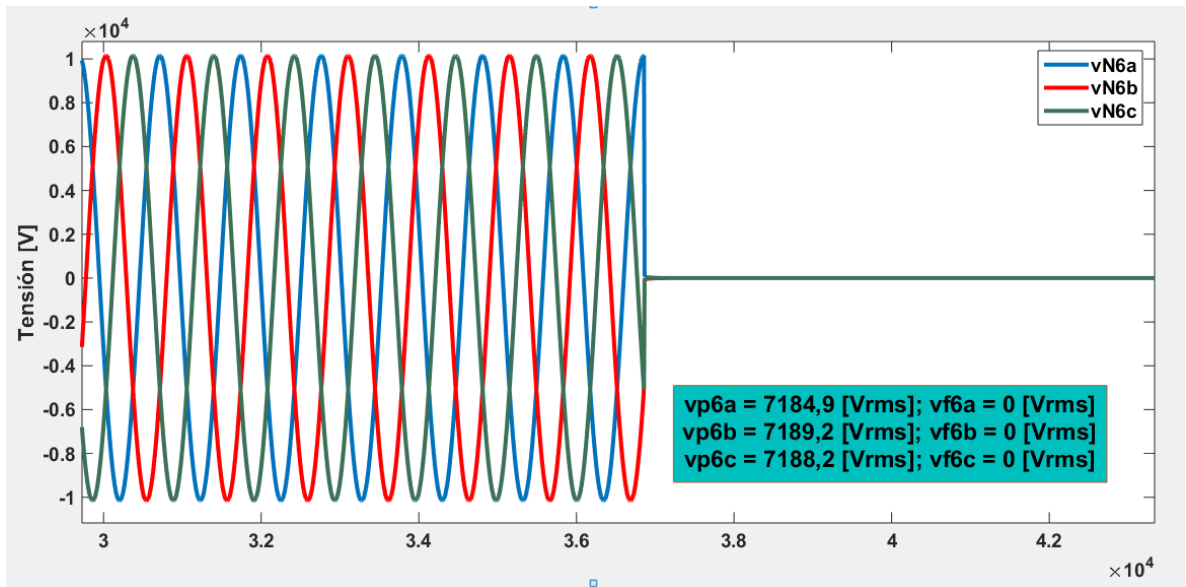
**Figura A158.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 4 y 5



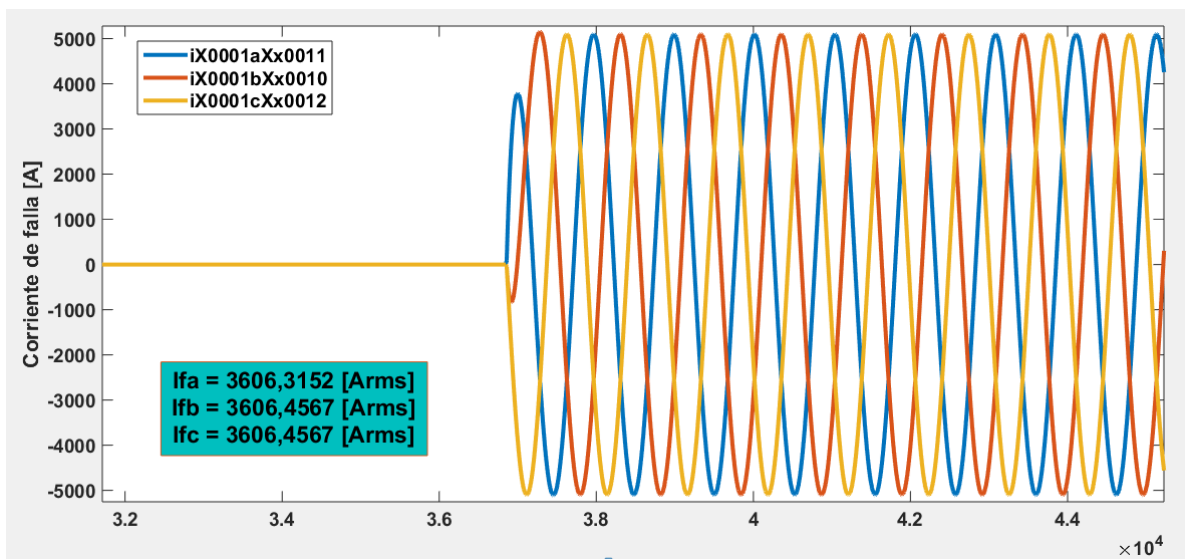
**Figura A159.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 4 y 5



**Figura A160.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 4 y 5



**Figura A161.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 4 y 5



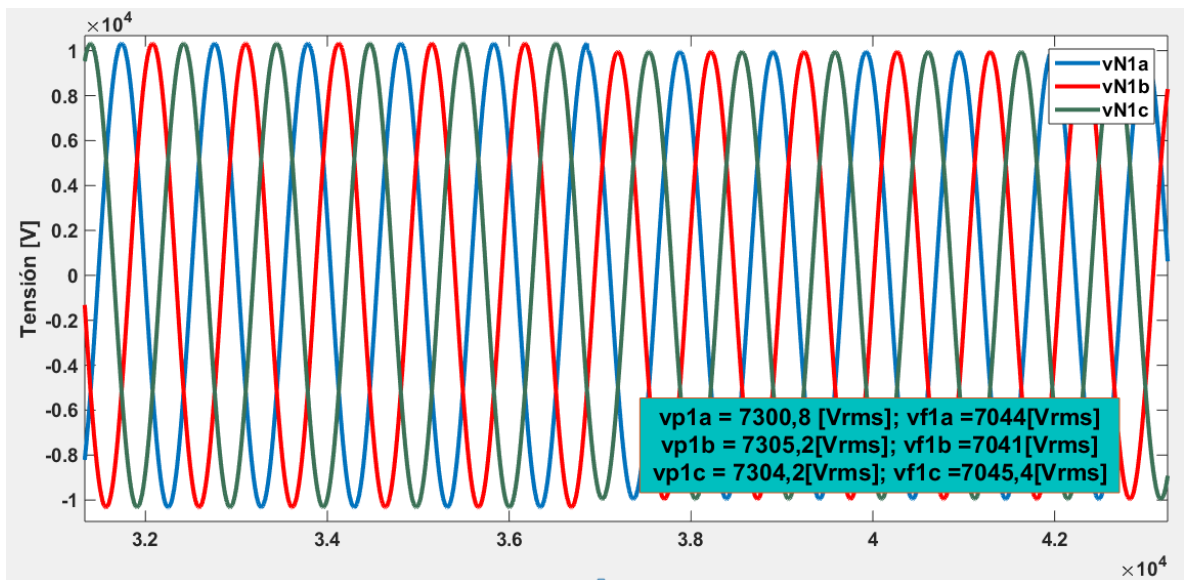
**Tabla A44.** Resultados falla trifásica entre los nodos 4 y 5

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
A	6935,51544	1951,04903	0	3581,8241	1172,29408
B	6935,51544	1950,97832	0	3581,87491	1172,25159
C	6935,37402	1951,04903	0	3581,72247	1172,29408

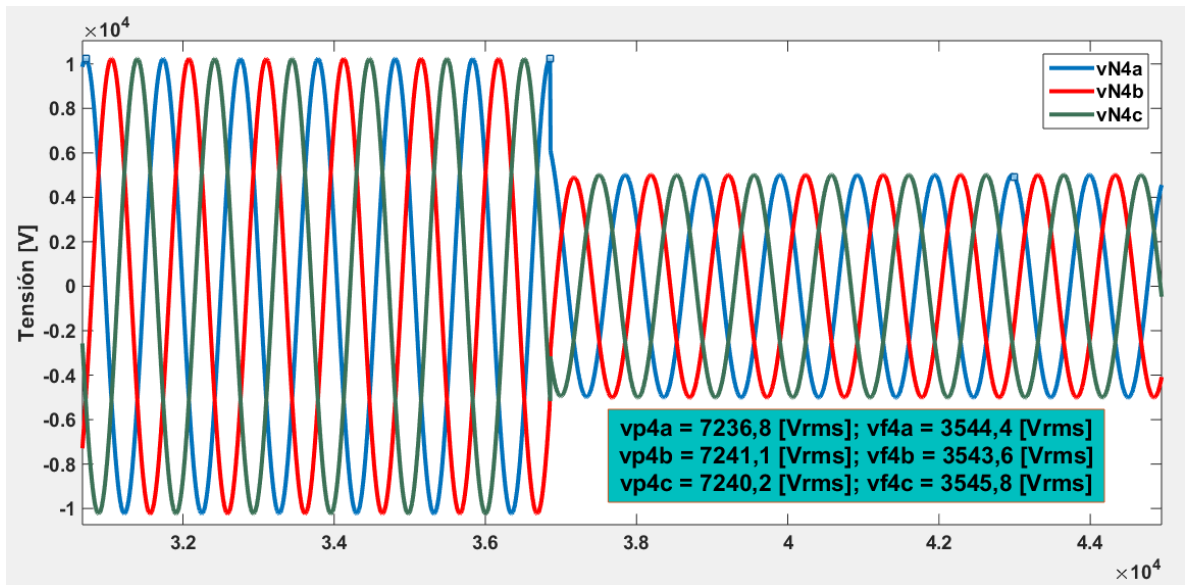
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
A	4883,9	3585,8	2851,8	3593,1	26,6605767	20,4696302	67,373742
B	4886,9	3589,1	2853,5	3596,4	26,704559	20,4953888	67,4048607
C	4886,2	3587,6	2853,1	3594,9	26,6971784	20,4732969	67,3900783
<b>Resultado suma deltas</b>					<b>80,062314</b>	<b>61,4383159</b>	<b>202,168681</b>

### A.5.5 Falla trifásica entre los nodos 5 y 6

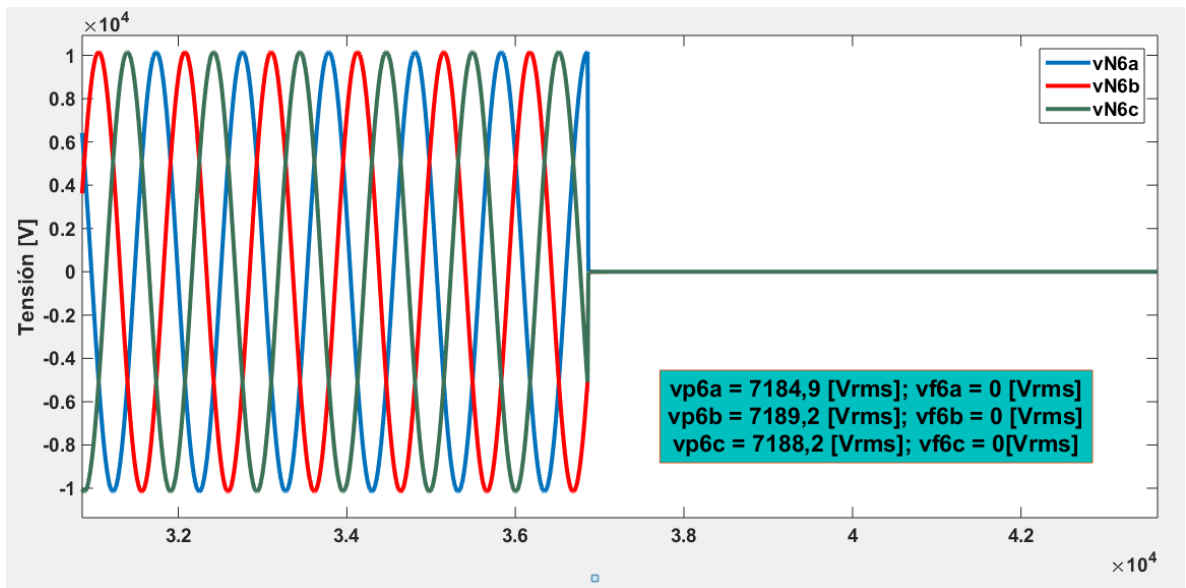
**Figura A162.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 5 y 6



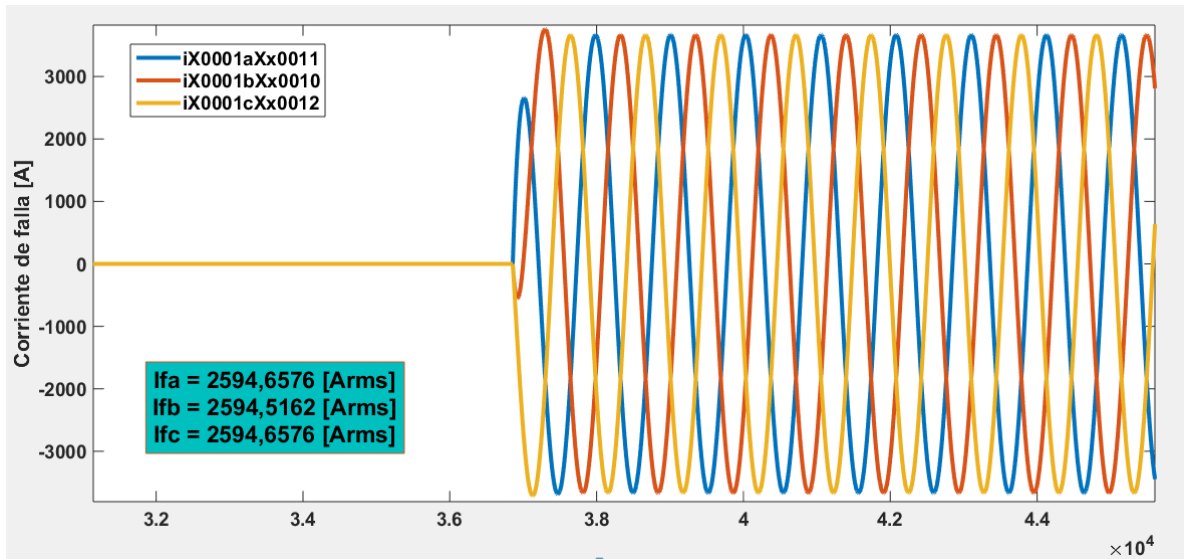
**Figura A163.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 5 y 6



**Figura A164.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 5 y 6



**Figura A165.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 5 y 6



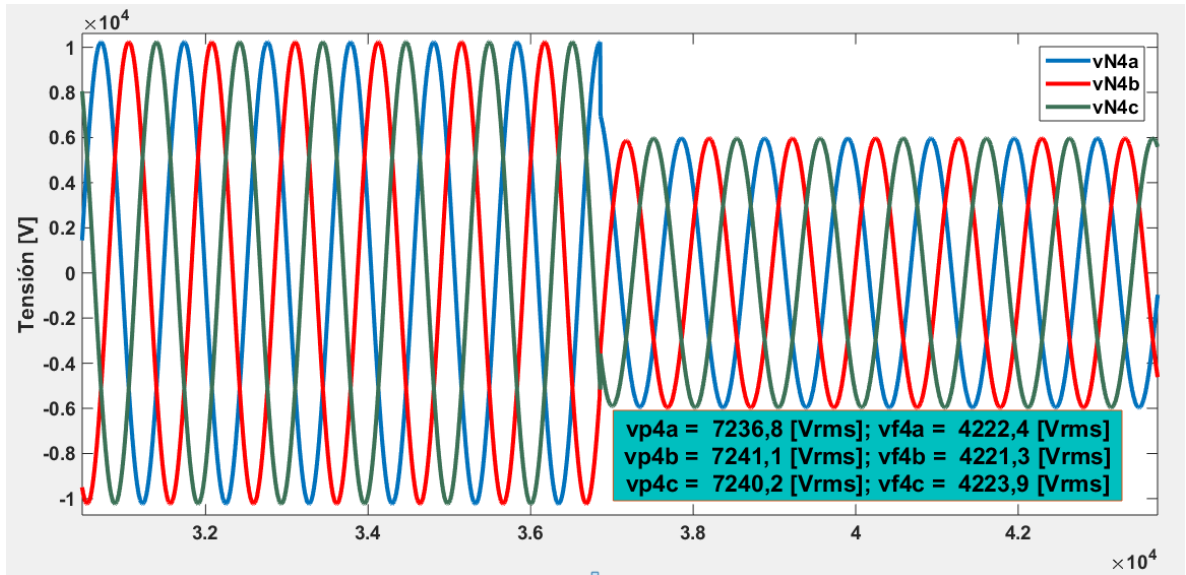
**Tabla A45.** Resultados falla trifásica entre los nodos 5 y 6

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_1$	$V_4$	$V_6$	$I_4$	$I_6$
<b>A</b>	7043,41994	3544,51416	0	2514,30424	2129,73272
<b>B</b>	7043,41994	3544,44345	0	2514,35505	2129,69023
<b>C</b>	7043,34923	3544,51416	0	2514,25342	2129,73272

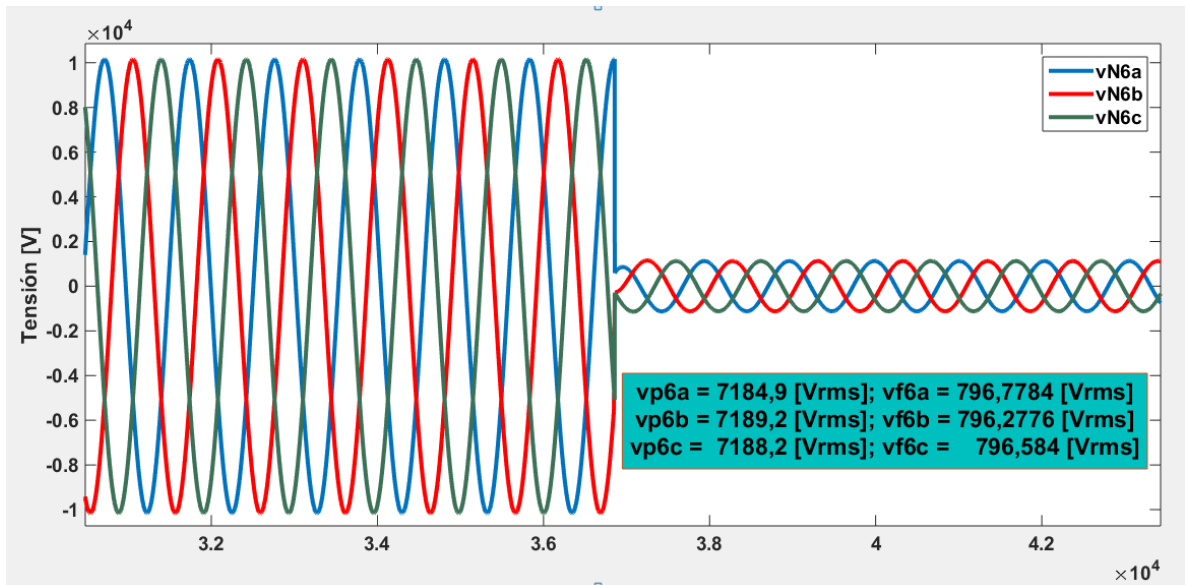
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]				Deltas		
	$I_{64}$	$I_{45}$	$I_{65}$	$I_{46}$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$
<b>A</b>	4883,9	2504,9	2851,8	2509,9	48,5185152	12,1642471	15,1467103
<b>B</b>	4886,9	2508,4	2853,5	2513,4	48,5490792	12,0939197	15,266562
<b>C</b>	4886,2	2506,2	2853,1	2511,3	48,5437882	12,1587046	15,1940143
<b>Resultado suma deltas</b>					145,611383	36,4168715	45,6072867

### A.5.6 Falla trifásica entre los nodos 6 y 7

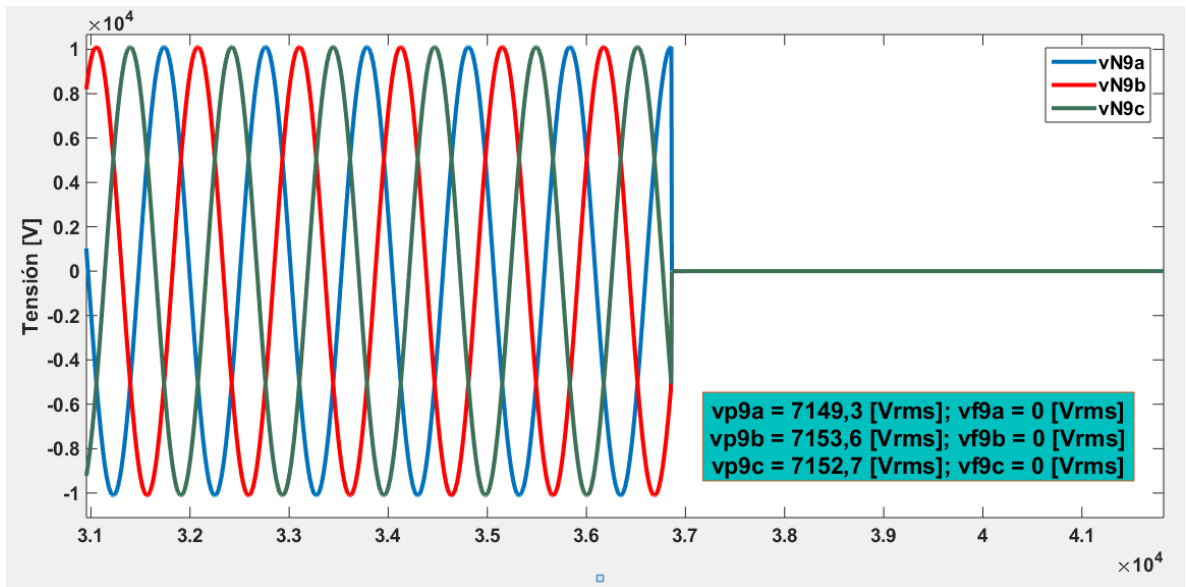
**Figura A166.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 6 y 7



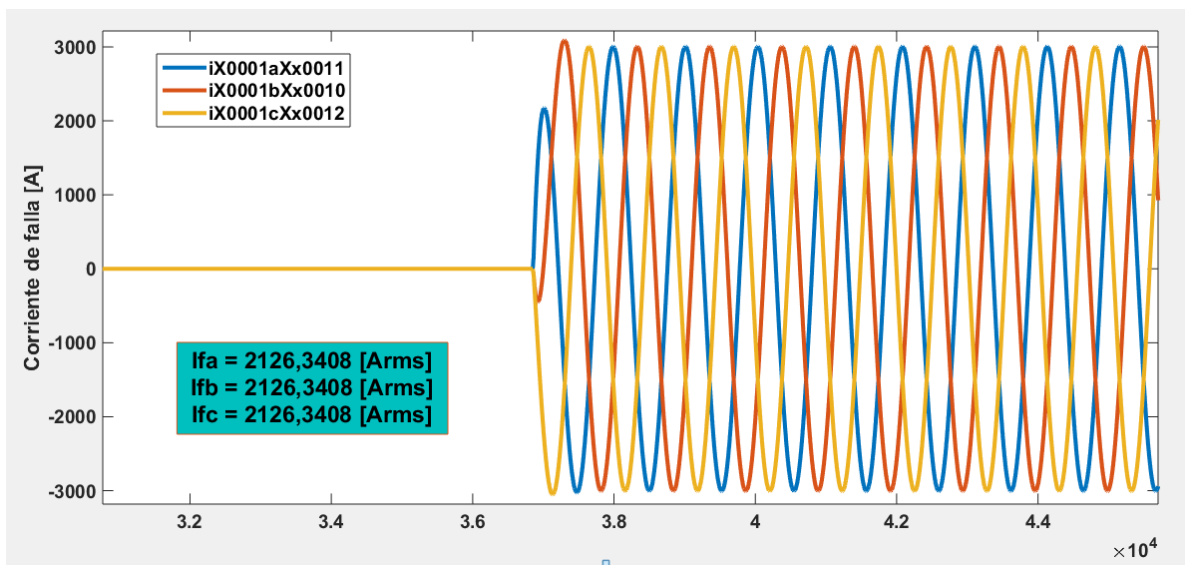
**Figura A167.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 6 y 7



**Figura A168.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica entre los nodos 6 y 7



**Figura A169.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 6 y 7



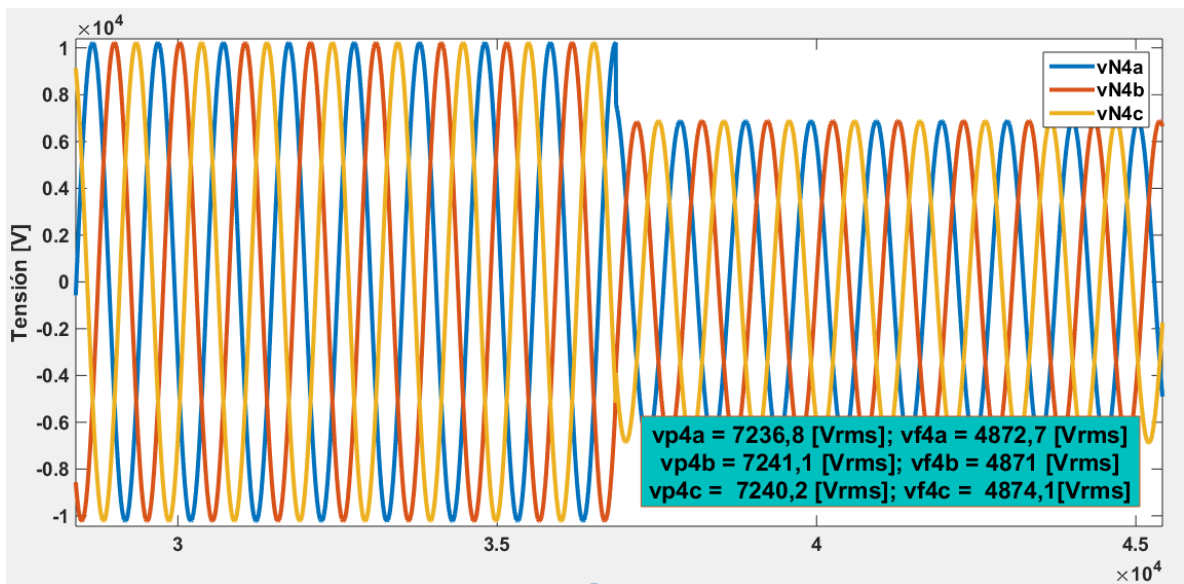
**Tabla A46.** Resultados falla trifásica entre los nodos 6 y 7

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	4222,48814	796,555789	0	2058,48246	243,520571
B	4222,48814	796,555789	0	2058,48246	243,520571
C	4222,41743	796,555789	0	2058,43997	243,520571

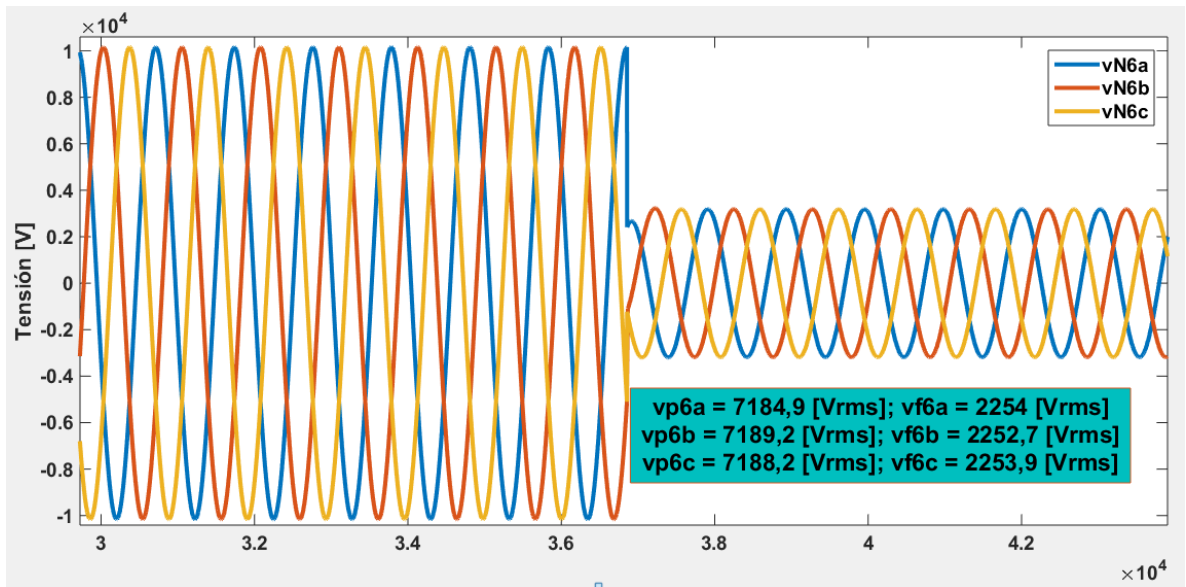
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	2110,5	1925,4	2113,9	1438	2116,3	13,0891932	8,77043355	31,9740764	88,4930978
B	2369,9	2112,1	1926,6	2115,5	1438,9	2117,9	13,1405351	8,78272809	31,9829827	88,5017909
C	2369,6	2111,7	1926,3	2115,1	1438,7	2117,5	13,1313314	8,7796562	31,9795754	88,4996188
Resultado suma deltas							39,3610598	26,3328178	95,9366345	265,494507

### A.5.7 Falla trifásica entre los nodos 7 y 8

**Figura A170.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 7 y 8



**Figura A171.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 7 y 8



**Figura A172.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica entre los nodos 7 y 8

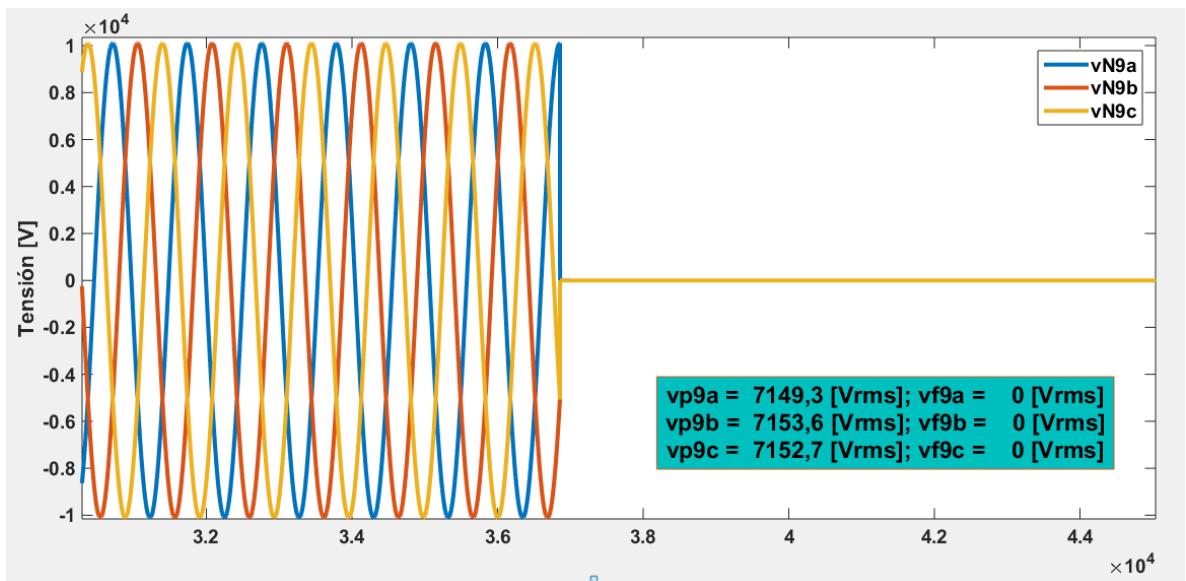


Figura A173. Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 7 y 8

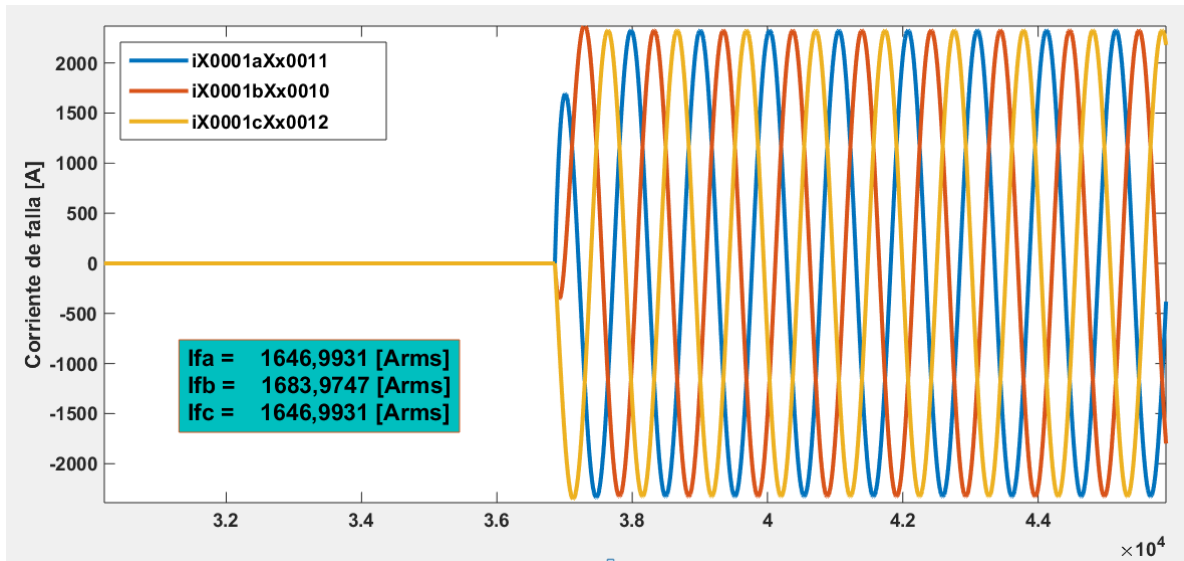


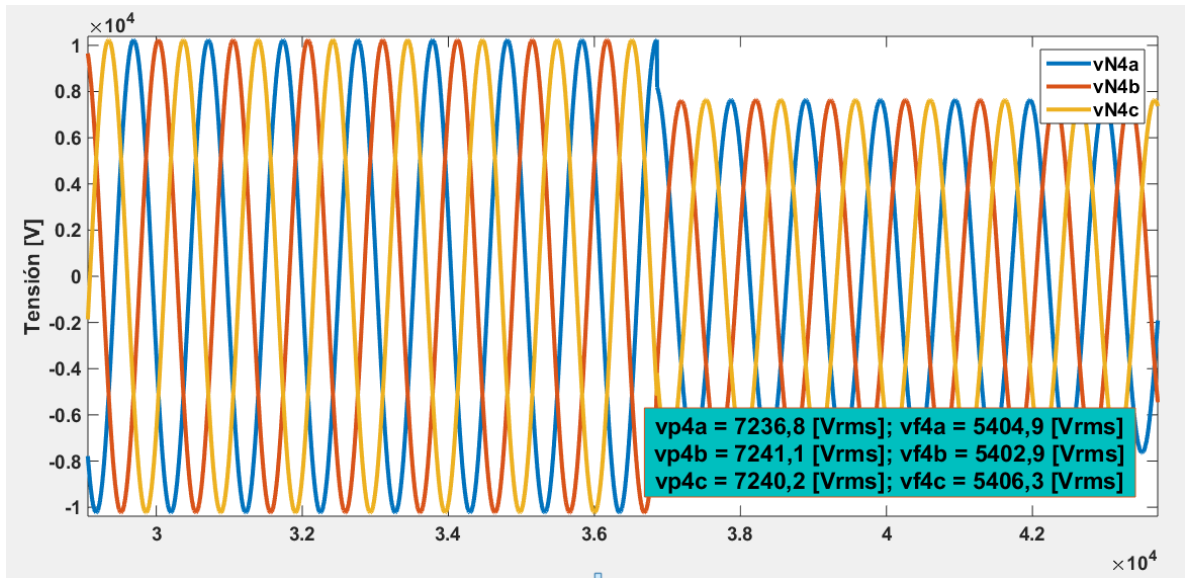
Tabla A47. Resultados falla trifásica entre los nodos 7 y 8

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	4872,60212	2253,54931	0	1573,66629	688,948123
B	4872,60212	2253,54931	0	1573,66629	688,948123
C	4872,60212	2253,54931	0	1573,66629	688,948123

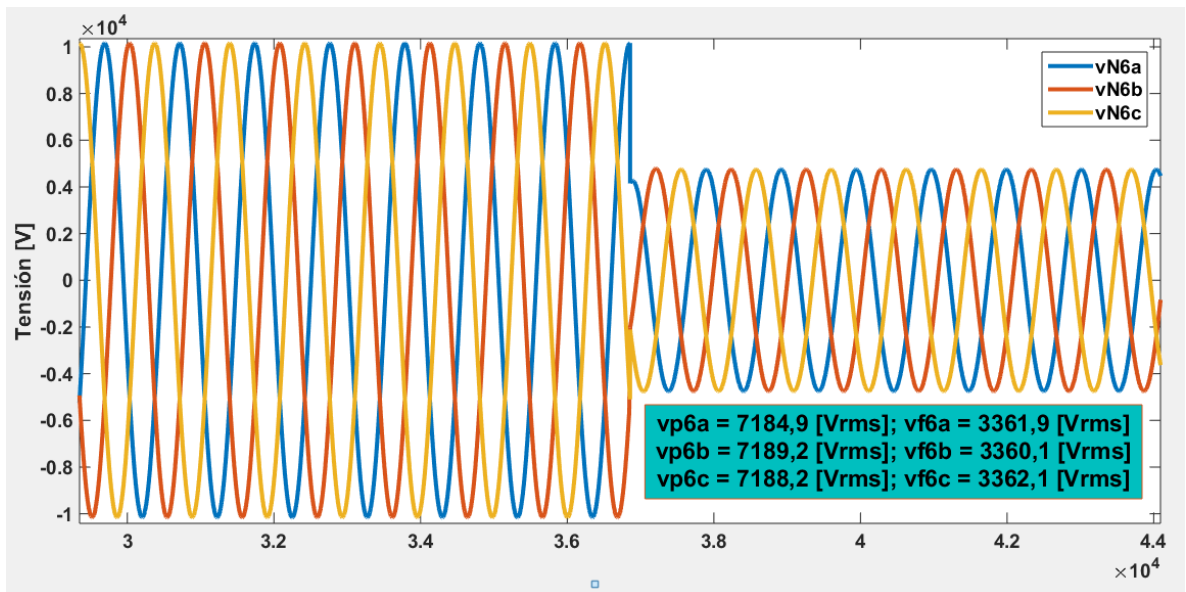
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1629	1925,4	1631,7	1438	1633,5	33,5585269	15,3942038	11,8710547	57,8238063
B	2369,9	1630,9	1926,6	1633,6	1438,9	1635,4	33,5977767	15,3482819	11,9184623	57,8728064
C	2369,6	1630,2	1926,3	1632,9	1438,7	1634,7	33,5893699	15,3714375	11,8929512	57,854767
<b>Resultado suma deltas</b>							100,745674	46,1139232	35,6824682	173,55138

### A.5.8 Falla trifásica entre los nodos 8 y 9

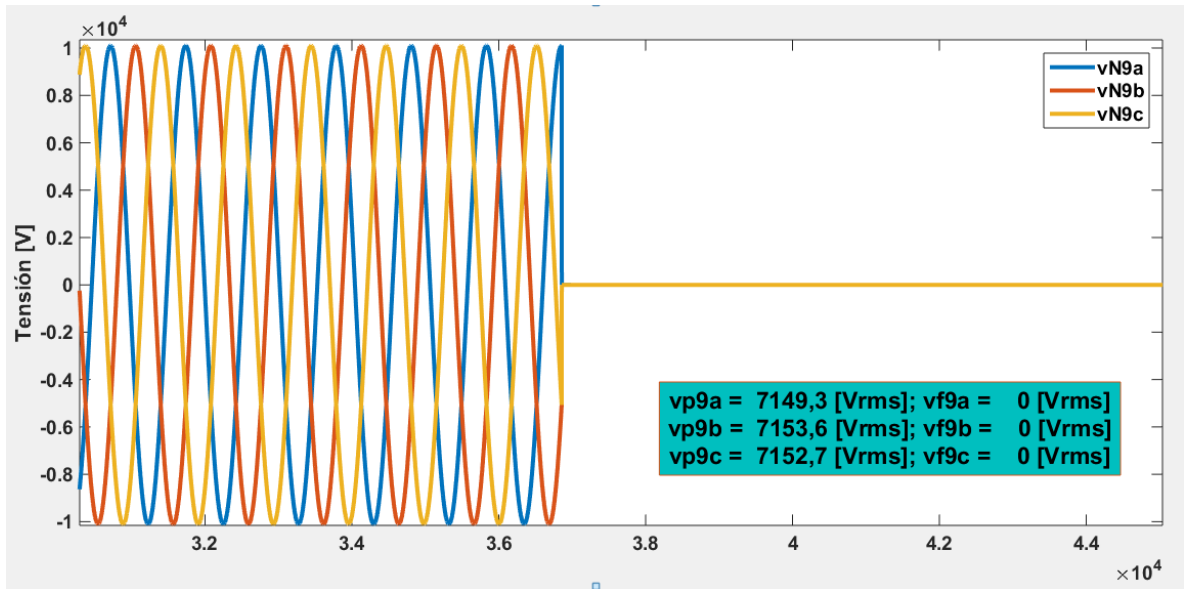
**Figura A174.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 4 cuando la falla es trifásica entre los nodos 8 y 9



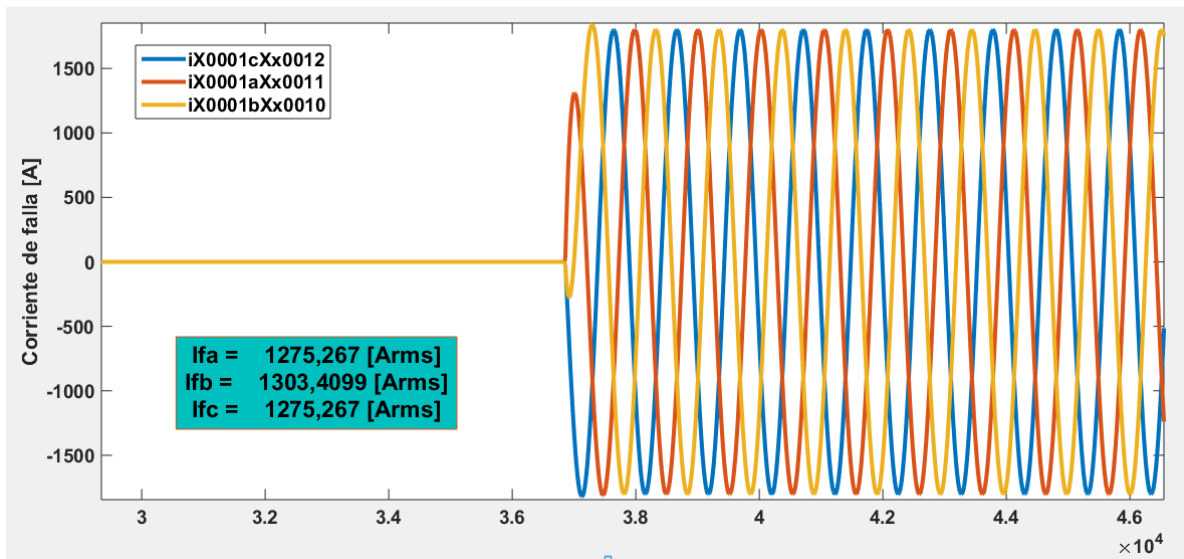
**Figura A175.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 8 y 9



**Figura A176.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica entre los nodos 8 y 9



**Figura A177.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 8 y 9



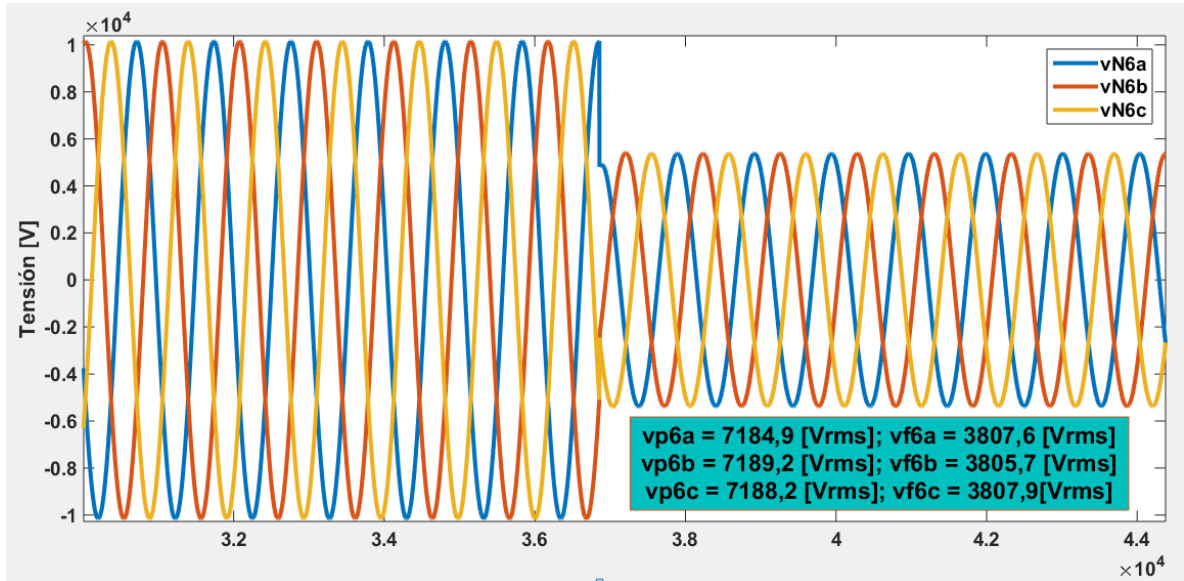
**Tabla A48.** Resultados falla trifásica entre los nodos 8 y 9

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_4$	$V_6$	$V_9$	$I_6$	$I_9$
A	5404,48784	3361,16137	0	1227,73927	1027,56386
B	5404,69997	3361,3028	0	1227,78176	1027,60709
C	5404,55855	3361,3028	0	1227,69678	1027,60709

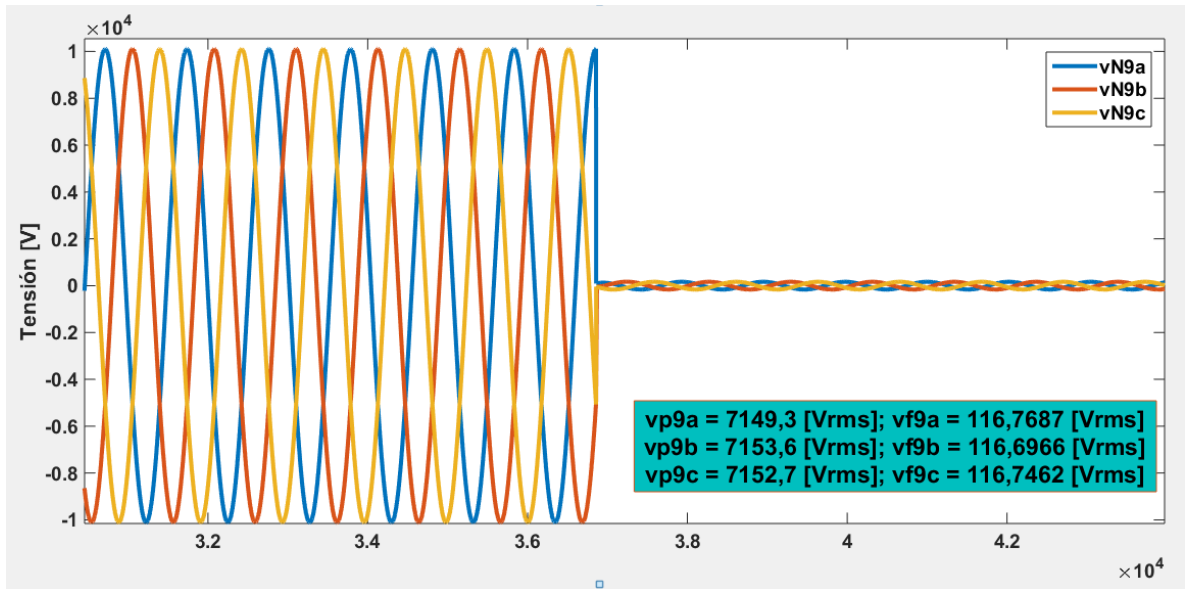
Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]						Deltas			
	$I_{96}$	$I_{67}$	$I_{97}$	$I_{68}$	$I_{98}$	$I_{69}$	$\delta_6$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
A	2368,5	1263	1925,4	1265,1	1438	1266,5	48,1638476	34,4032409	12,0236439	18,8658621
B	2369,9	1265	1926,6	1267,1	1438,9	1268,5	48,1926767	34,3402886	11,9396761	18,9903752
C	2369,6	1264,1	1926,3	1266,1	1438,7	1267,6	48,1897036	34,3767845	11,9969417	18,9328581
Resultado suma deltas							144,546228	103,120314	35,9602618	56,7890953

### A.5.9 Falla trifásica entre los nodos 9 y 10

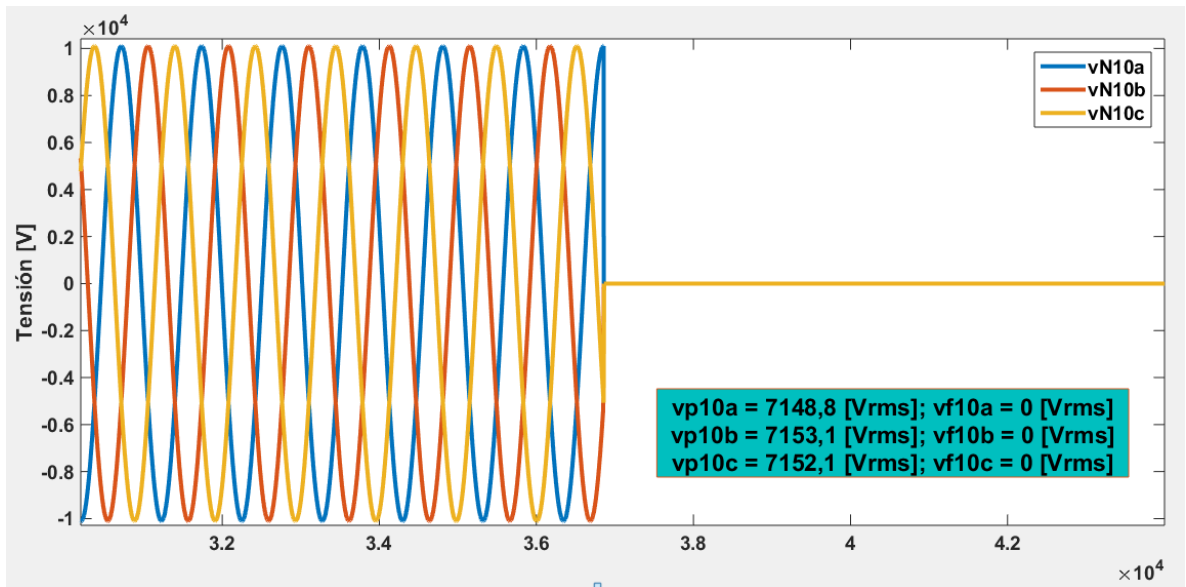
**Figura A178.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 6 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



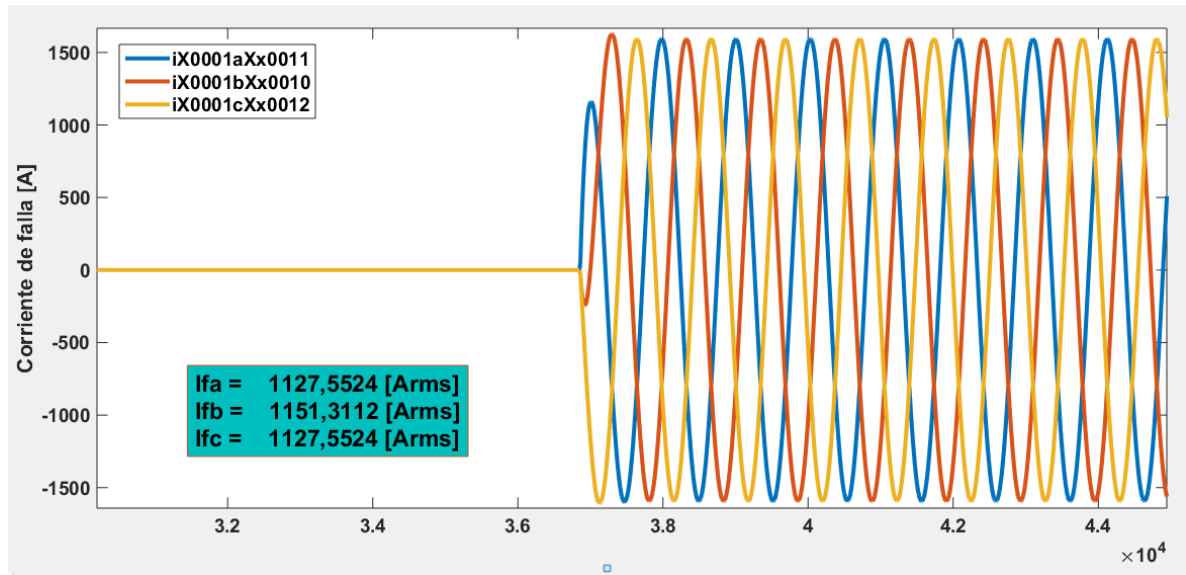
**Figura A179.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 9 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



**Figura A180.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 10 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



**Figura A181.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 9 y 10



**Tabla A49.** Resultados falla trifásica entre los nodos 9 y 10

Fase	Tensiones de falla [Vrms]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_6$	$V_9$	$V_{10}$	$I_9$	$I_{10}$
A	3806,92149	116,736259	0	1128,15201	563,943278
B	3807,06291	116,736259	0	1128,19525	563,943278
C	3807,06291	116,736259	0	1128,19525	563,943278

Fase	Corrientes de falla calculadas [Arms]		Deltas	
	$I_{109}$	$I_{910}$	$\delta_9$	$\delta_{10}$
A	1144,9	1126,3	1,46283417	49,9295678
B	1145,6	1127	1,51926968	49,9606675
C	1145,4	1126,8	1,50207381	49,9517858
<b>Resultado suma deltas</b>			<b>4,48417766</b>	<b>149,842021</b>

## ANEXO B. MATRIZ DE IMPEDANCIAS SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS

Se muestra a continuación la Zbus general del sistema de 32 nodos eléctricos, hallada incluyendo las cargas del sistema para una mayor precisión del método.

```
zbus=[0.0919 + 0.0469i    0.0905 + 0.0463i    0.0897 + 0.0461i    0.0889 +
0.0458i    0.0872 + 0.0447i    0.0871 + 0.0442i    0.0866 + 0.0440i    0.0860 +
0.0436i    0.0855 + 0.0432i    0.0854 + 0.0432i    0.0853 + 0.0432i    0.0848
+ 0.0427i    0.0846 + 0.0425i    0.0845 + 0.0424i    0.0844 + 0.0423i
0.0843 + 0.0420i    0.0842 + 0.0420i    0.0919 + 0.0468i    0.0916 + 0.0466i
0.0915 + 0.0465i    0.0915 + 0.0464i    0.0902 + 0.0461i    0.0896 + 0.0456i
0.0893 + 0.0454i    0.0870 + 0.0447i    0.0867 + 0.0447i    0.0855 + 0.0442i
0.0846 + 0.0439i    0.0841 + 0.0439i    0.0838 + 0.0436i    0.0837 + 0.0435i
0.0837 + 0.0434i;
0.0905 + 0.0463i    0.5744 + 0.2939i    0.5695 + 0.2923i    0.5645 + 0.2907i
0.5537 + 0.2839i    0.5527 + 0.2805i    0.5496 + 0.2794i    0.5462 + 0.2767i
0.5430 + 0.2743i    0.5424 + 0.2742i    0.5414 + 0.2738i    0.5382 + 0.2710i
0.5372 + 0.2696i    0.5365 + 0.2688i    0.5358 + 0.2681i    0.5349 + 0.2668i
0.5346 + 0.2665i    0.0904 + 0.0463i    0.0902 + 0.0460i    0.0901 + 0.0459i
0.0901 + 0.0459i    0.5725 + 0.2925i    0.5690 + 0.2896i    0.5673 + 0.2882i
0.5522 + 0.2837i    0.5503 + 0.2835i    0.5427 + 0.2806i    0.5371 + 0.2787i
0.5343 + 0.2786i    0.5321 + 0.2764i    0.5316 + 0.2758i    0.5315 + 0.2757i;
0.0897 + 0.0461i    0.5695 + 0.2923i    0.9274 + 0.4760i    0.9194 + 0.4734i
0.9016 + 0.4624i    0.9001 + 0.4568i    0.8950 + 0.4550i    0.8895 + 0.4507i
0.8842 + 0.4468i    0.8833 + 0.4465i    0.8817 + 0.4459i    0.8764 + 0.4414i
0.8748 + 0.4390i    0.8737 + 0.4377i    0.8726 + 0.4367i    0.8712 + 0.4345i
0.8706 + 0.4340i    0.0897 + 0.0460i    0.0894 + 0.0458i    0.0893 + 0.0457i
0.0893 + 0.0456i    0.5675 + 0.2909i    0.5641 + 0.2880i    0.5624 + 0.2866i
0.8993 + 0.4620i    0.8962 + 0.4616i    0.8837 + 0.4569i    0.8746 + 0.4539i
0.8700 + 0.4537i    0.8665 + 0.4501i    0.8657 + 0.4492i    0.8655 + 0.4490i;
0.0889 + 0.0458i    0.5645 + 0.2907i    0.9194 + 0.4734i    1.2892 + 0.6638i
1.2644 + 0.6483i    1.2622 + 0.6406i    1.2551 + 0.6380i    1.2473 + 0.6320i
1.2399 + 0.6265i    1.2387 + 0.6260i    1.2365 + 0.6252i    1.2290 + 0.6189i
1.2267 + 0.6156i    1.2252 + 0.6138i    1.2236 + 0.6123i    1.2216 + 0.6092i
1.2209 + 0.6086i    0.0889 + 0.0458i    0.0886 + 0.0455i    0.0886 + 0.0454i
0.0885 + 0.0454i    0.5626 + 0.2893i    0.5592 + 0.2864i    0.5575 + 0.2850i
1.2611 + 0.6478i    1.2567 + 0.6473i    1.2392 + 0.6407i    1.2264 + 0.6364i
1.2200 + 0.6362i    1.2151 + 0.6311i    1.2140 + 0.6299i    1.2137 + 0.6295i;
0.0872 + 0.0447i    0.5537 + 0.2839i    0.9016 + 0.4624i    1.2644 + 0.6483i
2.0436 + 1.3247i    2.0413 + 1.3111i    2.0296 + 1.3055i    2.0173 + 1.2938i
2.0058 + 1.2832i    2.0037 + 1.2822i    2.0001 + 1.2805i    1.9885 + 1.2685i
1.9852 + 1.2624i    1.9829 + 1.2590i    1.9803 + 1.2562i    1.9775 + 1.2506i
1.9764 + 1.2494i    0.0872 + 0.0447i    0.0869 + 0.0444i    0.0869 + 0.0444i
0.0868 + 0.0443i    0.5518 + 0.2826i    0.5484 + 0.2798i    0.5467 + 0.2784i
2.0382 + 1.3233i    2.0308 + 1.3216i    2.0021 + 1.3074i    1.9810 + 1.2978i
1.9702 + 1.2963i    1.9626 + 1.2868i    1.9610 + 1.2846i    1.9605 + 1.2839i;
0.0871 + 0.0442i    0.5527 + 0.2805i    0.9001 + 0.4568i    1.2622 + 0.6406i
2.0413 + 1.3111i    2.2281 + 1.9133i    2.2150 + 1.9046i    2.2022 + 1.8886i
2.1901 + 1.8739i    2.1877 + 1.8724i    2.1837 + 1.8697i    2.1718 + 1.8533i
2.1689 + 1.8455i    2.1667 + 1.8411i    2.1641 + 1.8373i    2.1617 + 1.8300i
2.1605 + 1.8284i    0.0870 + 0.0442i    0.0868 + 0.0439i    0.0867 + 0.0439i
0.0867 + 0.0438i    0.5508 + 0.2792i    0.5475 + 0.2764i    0.5458 + 0.2750i
```

2.0359 + 1.3098i	2.0285 + 1.3081i	1.9999 + 1.2941i	1.9789 + 1.2847i
1.9680 + 1.2832i	1.9604 + 1.2738i	1.9588 + 1.2715i	1.9584 + 1.2708i;
0.0866 + 0.0440i	0.5496 + 0.2794i	0.8950 + 0.4550i	1.2551 + 0.6380i
2.0296 + 1.3055i	2.2150 + 1.9046i	2.9095 + 2.1303i	2.8921 + 2.1117i
2.8759 + 2.0948i	2.8728 + 2.0932i	2.8676 + 2.0903i	2.8514 + 2.0713i
2.8470 + 2.0619i	2.8439 + 2.0567i	2.8403 + 2.0523i	2.8367 + 2.0436i
2.8351 + 2.0417i	0.0865 + 0.0440i	0.0863 + 0.0437i	0.0862 + 0.0437i
0.0862 + 0.0436i	0.5477 + 0.2781i	0.5444 + 0.2753i	0.5427 + 0.2739i
2.0242 + 1.3042i	2.0169 + 1.3025i	1.9884 + 1.2885i	1.9675 + 1.2791i
1.9568 + 1.2777i	1.9492 + 1.2683i	1.9476 + 1.2661i	1.9471 + 1.2654i;
0.0860 + 0.0436i	0.5462 + 0.2767i	0.8895 + 0.4507i	1.2473 + 0.6320i
2.0173 + 1.2938i	2.2022 + 1.8886i	2.8921 + 2.1117i	3.8988 + 2.8269i
3.8768 + 2.8042i	3.8727 + 2.8021i	3.8656 + 2.7982i	3.8438 + 2.7727i
3.8379 + 2.7601i	3.8336 + 2.7531i	3.8289 + 2.7472i	3.8239 + 2.7355i
3.8217 + 2.7330i	0.0860 + 0.0436i	0.0857 + 0.0433i	0.0857 + 0.0433i
0.0856 + 0.0432i	0.5443 + 0.2754i	0.5410 + 0.2727i	0.5393 + 0.2713i
2.0120 + 1.2925i	2.0047 + 1.2908i	1.9764 + 1.2770i	1.9556 + 1.2677i
1.9449 + 1.2663i	1.9374 + 1.2570i	1.9358 + 1.2548i	1.9354 + 1.2541i;
0.0855 + 0.0432i	0.5430 + 0.2743i	0.8842 + 0.4468i	1.2399 + 0.6265i
2.0058 + 1.2832i	2.1901 + 1.8739i	2.8759 + 2.0948i	3.8768 + 2.8042i
4.8930 + 3.5158i	4.8879 + 3.5131i	4.8790 + 3.5082i	4.8513 + 3.4762i
4.8438 + 3.4604i	4.8385 + 3.4516i	4.8324 + 3.4442i	4.8261 + 3.4295i
4.8234 + 3.4263i	0.0855 + 0.0432i	0.0852 + 0.0429i	0.0852 + 0.0429i
0.0851 + 0.0428i	0.5411 + 0.2730i	0.5378 + 0.2703i	0.5362 + 0.2690i
2.0004 + 1.2819i	1.9932 + 1.2803i	1.9650 + 1.2665i	1.9444 + 1.2573i
1.9338 + 1.2559i	1.9263 + 1.2467i	1.9247 + 1.2445i	1.9243 + 1.2438i;
0.0854 + 0.0432i	0.5424 + 0.2742i	0.8833 + 0.4465i	1.2387 + 0.6260i
2.0037 + 1.2822i	2.1877 + 1.8724i	2.8728 + 2.0932i	3.8727 + 2.8021i
4.8879 + 3.5131i	5.0791 + 3.5753i	5.0699 + 3.5704i	5.0410 + 3.5376i
5.0332 + 3.5214i	5.0275 + 3.5124i	5.0212 + 3.5048i	5.0146 + 3.4897i
5.0117 + 3.4864i	0.0854 + 0.0432i	0.0851 + 0.0429i	0.0851 + 0.0429i
0.0851 + 0.0428i	0.5406 + 0.2728i	0.5373 + 0.2701i	0.5356 + 0.2688i
1.9983 + 1.2809i	1.9911 + 1.2793i	1.9630 + 1.2656i	1.9424 + 1.2564i
1.9318 + 1.2550i	1.9243 + 1.2457i	1.9227 + 1.2435i	1.9223 + 1.2428i;
0.0853 + 0.0432i	0.5414 + 0.2738i	0.8817 + 0.4459i	1.2365 + 0.6252i
2.0001 + 1.2805i	2.1837 + 1.8697i	2.8676 + 2.0903i	3.8656 + 2.7982i
4.8790 + 3.5082i	5.0699 + 3.5704i	5.4344 + 3.6891i	5.4032 + 3.6550i
5.3946 + 3.6379i	5.3885 + 3.6284i	5.3816 + 3.6205i	5.3743 + 3.6047i
5.3712 + 3.6013i	0.0852 + 0.0431i	0.0850 + 0.0429i	0.0849 + 0.0428i
0.0849 + 0.0427i	0.5396 + 0.2725i	0.5363 + 0.2698i	0.5347 + 0.2684i
1.9947 + 1.2792i	1.9875 + 1.2776i	1.9594 + 1.2639i	1.9389 + 1.2547i
1.9283 + 1.2533i	1.9208 + 1.2440i	1.9193 + 1.2419i	1.9188 + 1.2412i;
0.0848 + 0.0427i	0.5382 + 0.2710i	0.8764 + 0.4414i	1.2290 + 0.6189i
1.9885 + 1.2685i	2.1718 + 1.8533i	2.8514 + 2.0713i	3.8438 + 2.7727i
4.8513 + 3.4762i	5.0410 + 3.5376i	5.4032 + 3.6550i	6.8321 + 4.7657i
6.8214 + 4.7438i	6.8137 + 4.7316i	6.8051 + 4.7214i	6.7961 + 4.7010i
6.7922 + 4.6966i	0.0847 + 0.0427i	0.0845 + 0.0424i	0.0844 + 0.0424i
0.0844 + 0.0423i	0.5364 + 0.2698i	0.5331 + 0.2671i	0.5314 + 0.2657i
1.9832 + 1.2672i	1.9760 + 1.2655i	1.9481 + 1.2520i	1.9277 + 1.2429i
1.9171 + 1.2415i	1.9097 + 1.2324i	1.9081 + 1.2302i	1.9077 + 1.2295i;
0.0846 + 0.0425i	0.5372 + 0.2696i	0.8748 + 0.4390i	1.2267 + 0.6156i
1.9852 + 1.2624i	2.1689 + 1.8455i	2.8470 + 2.0619i	3.8379 + 2.7601i
4.8438 + 3.4604i	5.0332 + 3.5214i	5.3946 + 3.6379i	6.8214 + 4.7438i
7.3519 + 5.4323i	7.3439 + 5.4186i	7.3348 + 5.4071i	7.3255 + 5.3844i

7.3213 + 5.3794i	0.0846 + 0.0424i	0.0843 + 0.0422i	0.0843 + 0.0421i
0.0842 + 0.0421i	0.5354 + 0.2683i	0.5321 + 0.2656i	0.5305 + 0.2643i
1.9799 + 1.2611i	1.9728 + 1.2595i	1.9449 + 1.2460i	1.9245 + 1.2370i
1.9140 + 1.2356i	1.9066 + 1.2265i	1.9050 + 1.2243i	1.9046 + 1.2236i;
0.0845 + 0.0424i	0.5365 + 0.2688i	0.8737 + 0.4377i	1.2252 + 0.6138i
1.9829 + 1.2590i	2.1667 + 1.8411i	2.8439 + 2.0567i	3.8336 + 2.7531i
4.8385 + 3.4516i	5.0275 + 3.5124i	5.3885 + 3.6284i	6.8137 + 4.7316i
7.3439 + 5.4186i	7.9262 + 5.9297i	7.9165 + 5.9172i	7.9065 + 5.8925i
7.9021 + 5.8871i	0.0845 + 0.0423i	0.0842 + 0.0421i	0.0842 + 0.0420i
0.0841 + 0.0420i	0.5347 + 0.2675i	0.5314 + 0.2648i	0.5298 + 0.2635i
1.9776 + 1.2577i	1.9705 + 1.2561i	1.9426 + 1.2427i	1.9223 + 1.2337i
1.9118 + 1.2323i	1.9043 + 1.2232i	1.9028 + 1.2211i	1.9023 + 1.2204i;
0.0844 + 0.0423i	0.5358 + 0.2681i	0.8726 + 0.4367i	1.2236 + 0.6123i
1.9803 + 1.2562i	2.1641 + 1.8373i	2.8403 + 2.0523i	3.8289 + 2.7472i
4.8324 + 3.4442i	5.0212 + 3.5048i	5.3816 + 3.6205i	6.8051 + 4.7214i
7.3348 + 5.4071i	7.9165 + 5.9172i	8.6521 + 6.4485i	8.6412 + 6.4216i
8.6363 + 6.4157i	0.0844 + 0.0422i	0.0841 + 0.0420i	0.0841 + 0.0419i
0.0840 + 0.0419i	0.5340 + 0.2669i	0.5307 + 0.2642i	0.5291 + 0.2629i
1.9750 + 1.2549i	1.9679 + 1.2534i	1.9402 + 1.2400i	1.9198 + 1.2310i
1.9093 + 1.2296i	1.9019 + 1.2206i	1.9004 + 1.2184i	1.8999 + 1.2177i;
0.0843 + 0.0420i	0.5349 + 0.2668i	0.8712 + 0.4345i	1.2216 + 0.6092i
1.9775 + 1.2506i	2.1617 + 1.8300i	2.8367 + 2.0436i	3.8239 + 2.7355i
4.8261 + 3.4295i	5.0146 + 3.4897i	5.3743 + 3.6047i	6.7961 + 4.7010i
7.3255 + 5.3844i	7.9065 + 5.8925i	8.6412 + 6.4216i	9.9187 + 8.1100i
9.9133 + 8.1027i	0.0842 + 0.0420i	0.0840 + 0.0418i	0.0839 + 0.0417i
0.0839 + 0.0416i	0.5331 + 0.2655i	0.5299 + 0.2629i	0.5282 + 0.2615i
1.9723 + 1.2493i	1.9652 + 1.2477i	1.9374 + 1.2344i	1.9171 + 1.2254i
1.9067 + 1.2241i	1.8992 + 1.2151i	1.8977 + 1.2129i	1.8972 + 1.2122i;
0.0842 + 0.0420i	0.5346 + 0.2665i	0.8706 + 0.4340i	1.2209 + 0.6086i
1.9764 + 1.2494i	2.1605 + 1.8284i	2.8351 + 2.0417i	3.8217 + 2.7330i
4.8234 + 3.4263i	5.0117 + 3.4864i	5.3712 + 3.6013i	6.7922 + 4.6966i
7.3213 + 5.3794i	7.9021 + 5.8871i	8.6363 + 6.4157i	9.9133 + 8.1027i
10.6394 + 8.6688i	0.0842 + 0.0420i	0.0839 + 0.0417i	0.0839 + 0.0417i
0.0838 + 0.0416i	0.5328 + 0.2652i	0.5295 + 0.2626i	0.5279 + 0.2613i
1.9711 + 1.2481i	1.9640 + 1.2465i	1.9363 + 1.2332i	1.9160 + 1.2243i
1.9055 + 1.2230i	1.8981 + 1.2139i	1.8966 + 1.2118i	1.8961 + 1.2111i;
0.0919 + 0.0468i	0.0904 + 0.0463i	0.0897 + 0.0460i	0.0889 + 0.0458i
0.0872 + 0.0447i	0.0870 + 0.0442i	0.0865 + 0.0440i	0.0860 + 0.0436i
0.0855 + 0.0432i	0.0854 + 0.0432i	0.0852 + 0.0431i	0.0847 + 0.0427i
0.0846 + 0.0424i	0.0845 + 0.0423i	0.0844 + 0.0422i	0.0842 + 0.0420i
0.0842 + 0.0420i	0.2558 + 0.2032i	0.2551 + 0.2021i	0.2550 + 0.2019i
0.2549 + 0.2017i	0.0901 + 0.0461i	0.0896 + 0.0456i	0.0893 + 0.0454i
0.0869 + 0.0447i	0.0866 + 0.0446i	0.0854 + 0.0442i	0.0846 + 0.0439i
0.0841 + 0.0439i	0.0838 + 0.0435i	0.0837 + 0.0434i	0.0837 + 0.0434i;
0.0916 + 0.0466i	0.0902 + 0.0460i	0.0894 + 0.0458i	0.0886 + 0.0455i
0.0869 + 0.0444i	0.0868 + 0.0439i	0.0863 + 0.0437i	0.0857 + 0.0433i
0.0852 + 0.0429i	0.0851 + 0.0429i	0.0850 + 0.0429i	0.0845 + 0.0424i
0.0843 + 0.0422i	0.0842 + 0.0421i	0.0841 + 0.0420i	0.0840 + 0.0418i
0.0839 + 0.0417i	0.2551 + 0.2021i	1.7548 + 1.5499i	1.7540 + 1.5482i
1.7535 + 1.5466i	0.0899 + 0.0458i	0.0893 + 0.0453i	0.0890 + 0.0451i
0.0867 + 0.0444i	0.0864 + 0.0444i	0.0852 + 0.0439i	0.0843 + 0.0436i
0.0839 + 0.0436i	0.0835 + 0.0433i	0.0834 + 0.0432i	0.0834 + 0.0432i;
0.0915 + 0.0465i	0.0901 + 0.0459i	0.0893 + 0.0457i	0.0886 + 0.0454i
0.0869 + 0.0444i	0.0867 + 0.0439i	0.0862 + 0.0437i	0.0857 + 0.0433i

0.0852 + 0.0429i	0.0851 + 0.0429i	0.0849 + 0.0428i	0.0844 + 0.0424i
0.0843 + 0.0421i	0.0842 + 0.0420i	0.0841 + 0.0419i	0.0839 + 0.0417i
0.0839 + 0.0417i	0.2550 + 0.2019i	1.7540 + 1.5482i	2.1627 + 2.0244i
2.1620 + 2.0224i	0.0898 + 0.0457i	0.0893 + 0.0453i	0.0890 + 0.0451i
0.0866 + 0.0443i	0.0863 + 0.0443i	0.0851 + 0.0439i	0.0843 + 0.0436i
0.0838 + 0.0436i	0.0835 + 0.0432i	0.0834 + 0.0431i	0.0834 + 0.0431i;
0.0915 + 0.0464i	0.0901 + 0.0459i	0.0893 + 0.0456i	0.0885 + 0.0454i
0.0868 + 0.0443i	0.0867 + 0.0438i	0.0862 + 0.0436i	0.0856 + 0.0432i
0.0851 + 0.0428i	0.0851 + 0.0428i	0.0849 + 0.0427i	0.0844 + 0.0423i
0.0842 + 0.0421i	0.0841 + 0.0420i	0.0840 + 0.0419i	0.0839 + 0.0416i
0.0838 + 0.0416i	0.2549 + 0.2017i	1.7535 + 1.5466i	2.1620 + 2.0224i
2.8701 + 2.9567i	0.0898 + 0.0457i	0.0892 + 0.0452i	0.0890 + 0.0450i
0.0866 + 0.0443i	0.0863 + 0.0443i	0.0851 + 0.0438i	0.0842 + 0.0435i
0.0838 + 0.0435i	0.0834 + 0.0431i	0.0834 + 0.0431i	0.0833 + 0.0430i;
0.0902 + 0.0461i	0.5725 + 0.2925i	0.5675 + 0.2909i	0.5626 + 0.2893i
0.5518 + 0.2826i	0.5508 + 0.2792i	0.5477 + 0.2781i	0.5443 + 0.2754i
0.5411 + 0.2730i	0.5406 + 0.2728i	0.5396 + 0.2725i	0.5364 + 0.2698i
0.5354 + 0.2683i	0.5347 + 0.2675i	0.5340 + 0.2669i	0.5331 + 0.2655i
0.5328 + 0.2652i	0.0901 + 0.0461i	0.0899 + 0.0458i	0.0898 + 0.0457i
0.0898 + 0.0457i	1.0202 + 0.5981i	1.0142 + 0.5924i	1.0111 + 0.5896i
0.5504 + 0.2824i	0.5484 + 0.2821i	0.5408 + 0.2793i	0.5352 + 0.2774i
0.5324 + 0.2773i	0.5303 + 0.2751i	0.5298 + 0.2745i	0.5297 + 0.2744i;
0.0896 + 0.0456i	0.5690 + 0.2896i	0.5641 + 0.2880i	0.5592 + 0.2864i
0.5484 + 0.2798i	0.5475 + 0.2764i	0.5444 + 0.2753i	0.5410 + 0.2727i
0.5378 + 0.2703i	0.5373 + 0.2701i	0.5363 + 0.2698i	0.5331 + 0.2671i
0.5321 + 0.2656i	0.5314 + 0.2648i	0.5307 + 0.2642i	0.5299 + 0.2629i
0.5295 + 0.2626i	0.0896 + 0.0456i	0.0893 + 0.0453i	0.0893 + 0.0453i
0.0892 + 0.0452i	1.0142 + 0.5924i	1.9010 + 1.2896i	1.8955 + 1.2837i
0.5470 + 0.2796i	0.5451 + 0.2793i	0.5375 + 0.2765i	0.5320 + 0.2746i
0.5292 + 0.2746i	0.5270 + 0.2724i	0.5266 + 0.2718i	0.5265 + 0.2717i;
0.0893 + 0.0454i	0.5673 + 0.2882i	0.5624 + 0.2866i	0.5575 + 0.2850i
0.5467 + 0.2784i	0.5458 + 0.2750i	0.5427 + 0.2739i	0.5393 + 0.2713i
0.5362 + 0.2690i	0.5356 + 0.2688i	0.5347 + 0.2684i	0.5314 + 0.2657i
0.5305 + 0.2643i	0.5298 + 0.2635i	0.5291 + 0.2629i	0.5282 + 0.2615i
0.5279 + 0.2613i	0.0893 + 0.0454i	0.0890 + 0.0451i	0.0890 + 0.0451i
0.0890 + 0.0450i	1.0111 + 0.5896i	1.8955 + 1.2837i	2.7834 + 1.9758i
0.5453 + 0.2782i	0.5434 + 0.2779i	0.5359 + 0.2751i	0.5304 + 0.2733i
0.5276 + 0.2732i	0.5254 + 0.2710i	0.5250 + 0.2705i	0.5249 + 0.2703i;
0.0870 + 0.0447i	0.5522 + 0.2837i	0.8993 + 0.4620i	1.2611 + 0.6478i
2.0382 + 1.3233i	2.0359 + 1.3098i	2.0242 + 1.3042i	2.0120 + 1.2925i
2.0004 + 1.2819i	1.9983 + 1.2809i	1.9947 + 1.2792i	1.9832 + 1.2672i
1.9799 + 1.2611i	1.9776 + 1.2577i	1.9750 + 1.2549i	1.9723 + 1.2493i
1.9711 + 1.2481i	0.0869 + 0.0447i	0.0867 + 0.0444i	0.0866 + 0.0443i
0.0866 + 0.0443i	0.5504 + 0.2824i	0.5470 + 0.2796i	0.5453 + 0.2782i
2.2352 + 1.4252i	2.2271 + 1.4234i	2.1957 + 1.4082i	2.1726 + 1.3980i
2.1608 + 1.3964i	2.1524 + 1.3861i	2.1507 + 1.3837i	2.1501 + 1.3829i;
0.0867 + 0.0447i	0.5503 + 0.2835i	0.8962 + 0.4616i	1.2567 + 0.6473i
2.0308 + 1.3216i	2.0285 + 1.3081i	2.0169 + 1.3025i	2.0047 + 1.2908i
1.9932 + 1.2803i	1.9911 + 1.2793i	1.9875 + 1.2776i	1.9760 + 1.2655i
1.9728 + 1.2595i	1.9705 + 1.2561i	1.9679 + 1.2534i	1.9652 + 1.2477i
1.9640 + 1.2465i	0.0866 + 0.0446i	0.0864 + 0.0444i	0.0863 + 0.0443i
0.0863 + 0.0443i	0.5484 + 0.2821i	0.5451 + 0.2793i	0.5434 + 0.2779i
2.2271 + 1.4234i	2.5023 + 1.5662i	2.4670 + 1.5495i	2.4412 + 1.5383i
2.4279 + 1.5368i	2.4184 + 1.5253i	2.4165 + 1.5226i	2.4159 + 1.5218i;

0.0855 + 0.0442i	0.5427 + 0.2806i	0.8837 + 0.4569i	1.2392 + 0.6407i
2.0021 + 1.3074i	1.9999 + 1.2941i	1.9884 + 1.2885i	1.9764 + 1.2770i
1.9650 + 1.2665i	1.9630 + 1.2656i	1.9594 + 1.2639i	1.9481 + 1.2520i
1.9449 + 1.2460i	1.9426 + 1.2427i	1.9402 + 1.2400i	1.9374 + 1.2344i
1.9363 + 1.2332i	0.0854 + 0.0442i	0.0852 + 0.0439i	0.0851 + 0.0439i
0.0851 + 0.0438i	0.5408 + 0.2793i	0.5375 + 0.2765i	0.5359 + 0.2751i
2.1957 + 1.4082i	2.4670 + 1.5495i	3.4759 + 2.4561i	3.4391 + 2.4377i
3.4198 + 2.4344i	3.4069 + 2.4170i	3.4043 + 2.4129i	3.4035 + 2.4115i;
0.0846 + 0.0439i	0.5371 + 0.2787i	0.8746 + 0.4539i	1.2264 + 0.6364i
1.9810 + 1.2978i	1.9789 + 1.2847i	1.9675 + 1.2791i	1.9556 + 1.2677i
1.9444 + 1.2573i	1.9424 + 1.2564i	1.9389 + 1.2547i	1.9277 + 1.2429i
1.9245 + 1.2370i	1.9223 + 1.2337i	1.9198 + 1.2310i	1.9171 + 1.2254i
1.9160 + 1.2243i	0.0846 + 0.0439i	0.0843 + 0.0436i	0.0843 + 0.0436i
0.0842 + 0.0435i	0.5352 + 0.2774i	0.5320 + 0.2746i	0.5304 + 0.2733i
2.1726 + 1.3980i	2.4412 + 1.5383i	3.4391 + 2.4377i	4.1981 + 3.1146i
4.1744 + 3.1099i	4.1588 + 3.0880i	4.1557 + 3.0828i	4.1547 + 3.0811i;
0.0841 + 0.0439i	0.5343 + 0.2786i	0.8700 + 0.4537i	1.2200 + 0.6362i
1.9702 + 1.2963i	1.9680 + 1.2832i	1.9568 + 1.2777i	1.9449 + 1.2663i
1.9338 + 1.2559i	1.9318 + 1.2550i	1.9283 + 1.2533i	1.9171 + 1.2415i
1.9140 + 1.2356i	1.9118 + 1.2323i	1.9093 + 1.2296i	1.9067 + 1.2241i
1.9055 + 1.2230i	0.0841 + 0.0439i	0.0839 + 0.0436i	0.0838 + 0.0436i
0.0838 + 0.0435i	0.5324 + 0.2773i	0.5292 + 0.2746i	0.5276 + 0.2732i
2.1608 + 1.3964i	2.4279 + 1.5368i	3.4198 + 2.4344i	4.1744 + 3.1099i
4.6556 + 3.3636i	4.6381 + 3.3397i	4.6345 + 3.3340i	4.6335 + 3.3322i;
0.0838 + 0.0436i	0.5321 + 0.2764i	0.8665 + 0.4501i	1.2151 + 0.6311i
1.9626 + 1.2868i	1.9604 + 1.2738i	1.9492 + 1.2683i	1.9374 + 1.2570i
1.9263 + 1.2467i	1.9243 + 1.2457i	1.9208 + 1.2440i	1.9097 + 1.2324i
1.9066 + 1.2265i	1.9043 + 1.2232i	1.9019 + 1.2206i	1.8992 + 1.2151i
1.8981 + 1.2139i	0.0838 + 0.0435i	0.0835 + 0.0433i	0.0835 + 0.0432i
0.0834 + 0.0431i	0.5303 + 0.2751i	0.5270 + 0.2724i	0.5254 + 0.2710i
2.1524 + 1.3861i	2.4184 + 1.5253i	3.4069 + 2.4170i	4.1588 + 3.0880i
4.6381 + 3.3397i	5.5918 + 4.2726i	5.5876 + 4.2655i	5.5863 + 4.2632i;
0.0837 + 0.0435i	0.5316 + 0.2758i	0.8657 + 0.4492i	1.2140 + 0.6299i
1.9610 + 1.2846i	1.9588 + 1.2715i	1.9476 + 1.2661i	1.9358 + 1.2548i
1.9247 + 1.2445i	1.9227 + 1.2435i	1.9193 + 1.2419i	1.9081 + 1.2302i
1.9050 + 1.2243i	1.9028 + 1.2211i	1.9004 + 1.2184i	1.8977 + 1.2129i
1.8966 + 1.2118i	0.0837 + 0.0434i	0.0834 + 0.0432i	0.0834 + 0.0431i
0.0834 + 0.0431i	0.5298 + 0.2745i	0.5266 + 0.2718i	0.5250 + 0.2705i
2.1507 + 1.3837i	2.4165 + 1.5226i	3.4043 + 2.4129i	4.1557 + 3.0828i
4.6345 + 3.3340i	5.5876 + 4.2655i	5.8937 + 4.6198i	5.8924 + 4.6174i;
0.0837 + 0.0434i	0.5315 + 0.2757i	0.8655 + 0.4490i	1.2137 + 0.6295i
1.9605 + 1.2839i	1.9584 + 1.2708i	1.9471 + 1.2654i	1.9354 + 1.2541i
1.9243 + 1.2438i	1.9223 + 1.2428i	1.9188 + 1.2412i	1.9077 + 1.2295i
1.9046 + 1.2236i	1.9023 + 1.2204i	1.8999 + 1.2177i	1.8972 + 1.2122i
1.8961 + 1.2111i	0.0837 + 0.0434i	0.0834 + 0.0432i	0.0834 + 0.0431i
0.0833 + 0.0430i	0.5297 + 0.2744i	0.5265 + 0.2717i	0.5249 + 0.2703i
2.1501 + 1.3829i	2.4159 + 1.5218i	3.4035 + 2.4115i	4.1547 + 3.0811i
4.6335 + 3.3322i	5.5863 + 4.2632i	5.8924 + 4.6174i	6.2321 + 5.1449i;];

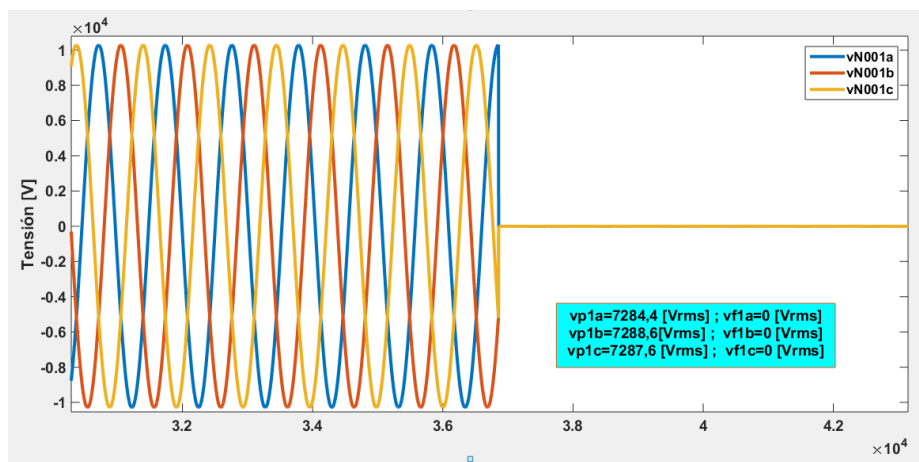
## ANEXO C. RESULTADOS DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL SISTEMA DE 32 NODOS ELECTRICOS

### C.1 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 1

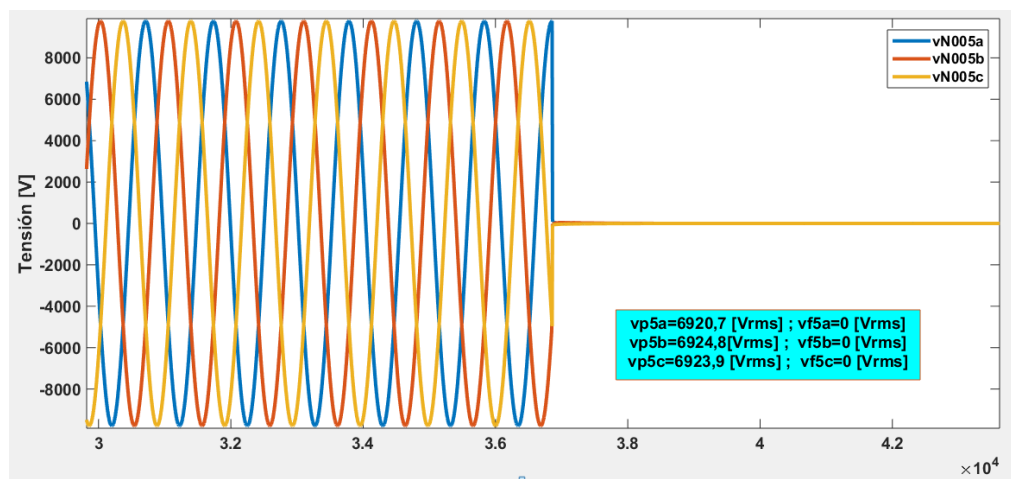
#### C.1.1 Nodo eléctrico 1

##### Falla trifásica en el nodo 1

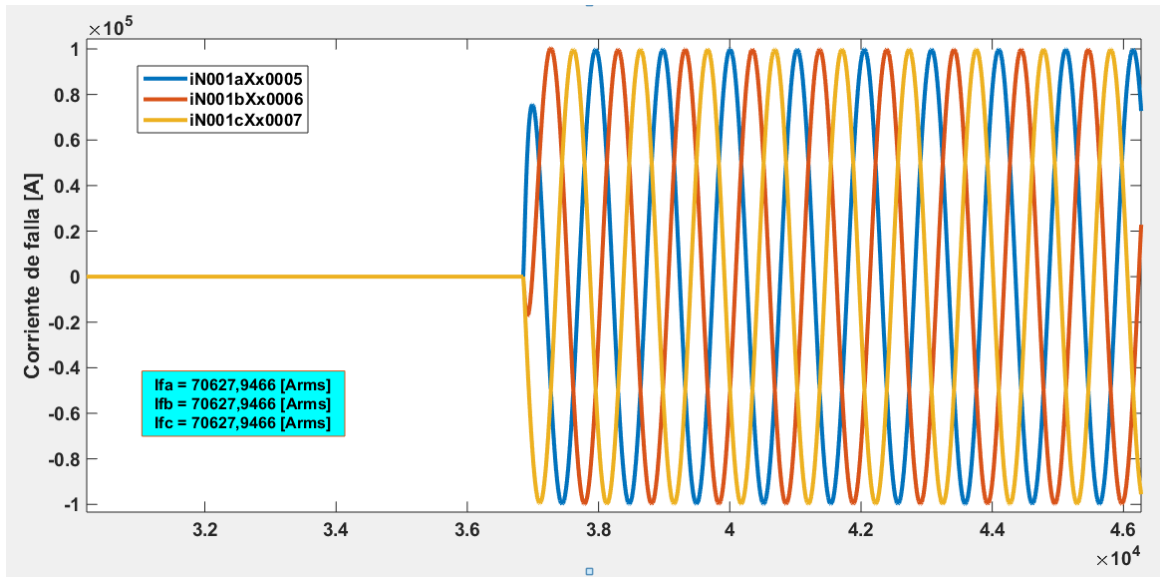
**Figura C1.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura C2.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura C3.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1



**Tabla C1.** Resultados falla trifásica en el nodo 1

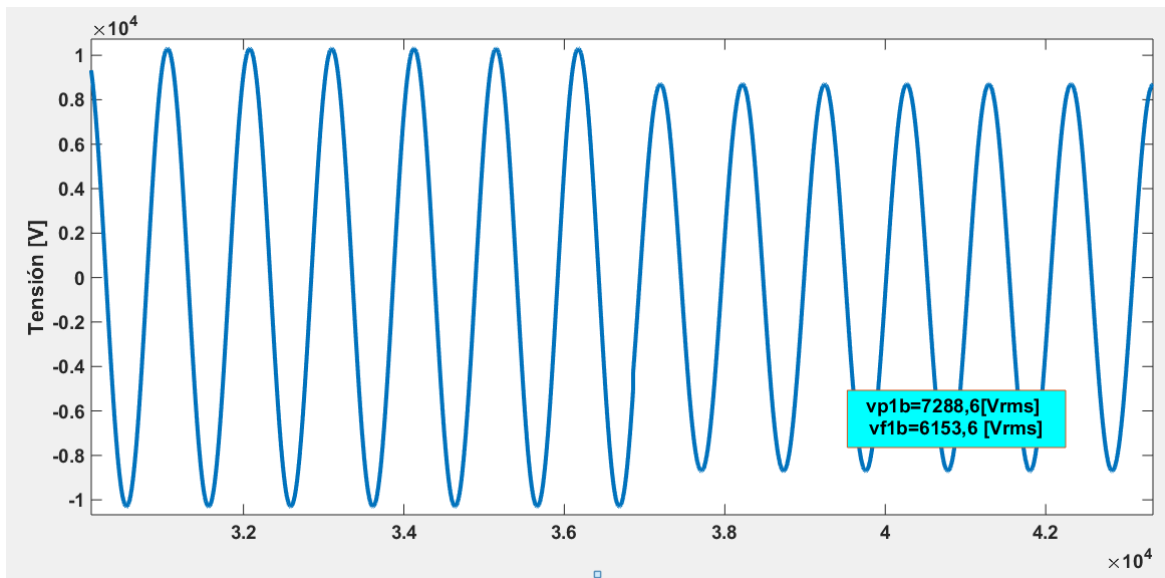
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	$V_f$	$V_1$	$V_5$	$I_1$	$I_5$
A	5967,98123	0	0	57668,3406	0
B	5967,98123	0	0	57668,3406	0
C	5967,98123	0	0	57668,3406	0

Fase	Corrientes calculadas [Arms]								Deltas				
	$I_{s1}$	$I_{s2}$	$I_{s2}$	$I_{s3}$	$I_{s3}$	$I_{s4}$	$I_{s4}$	$I_{s5}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
A	70626	71655	11122	72225	6830	72838	4870,5	74336	18,3468686	84,4784035	90,5434406	93,3132431	100
B	70669	71698	11129	72269	6834,2	72882	4973,5	74381	18,3965521	84,4779492	90,5433865	93,1759557	100
C	70659	71688	11127	72259	6833,2	72872	4872,8	74371	18,3850032	84,4785738	90,5434617	93,3132067	100
Resultado suma deltas $\delta_i$ :									55,1284239	253,434926	271,630289	279,802405	300

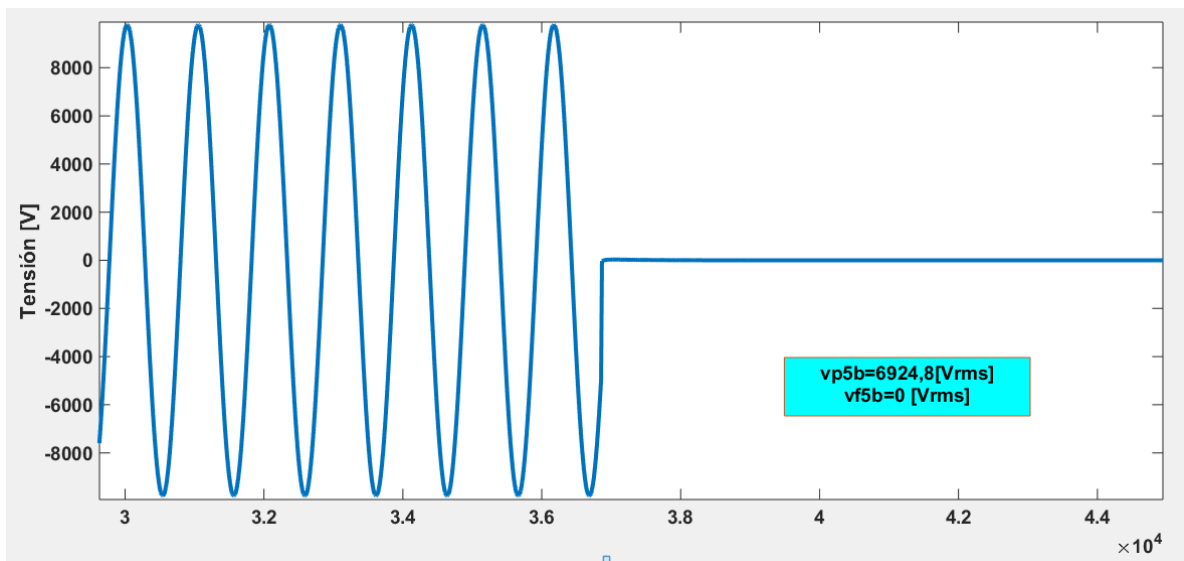
## C.1.2 Nodo eléctrico 2

### Falla monofásica en el nodo 2

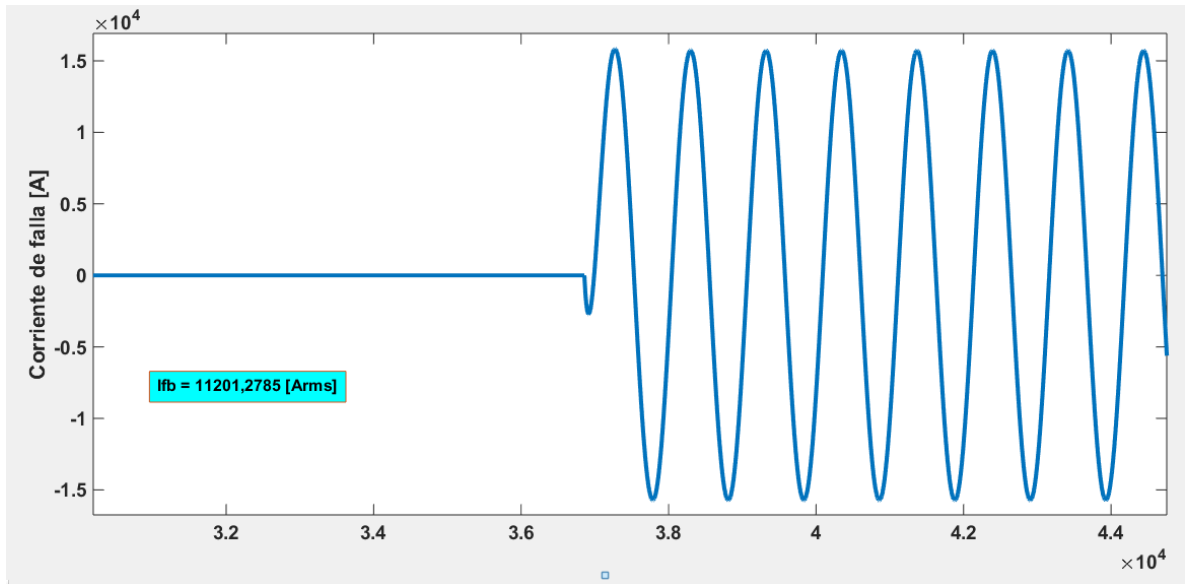
**Figura C4.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura C5.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura C6.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 2



**Tabla C2.** Resultados falla monofásica en el nodo 2

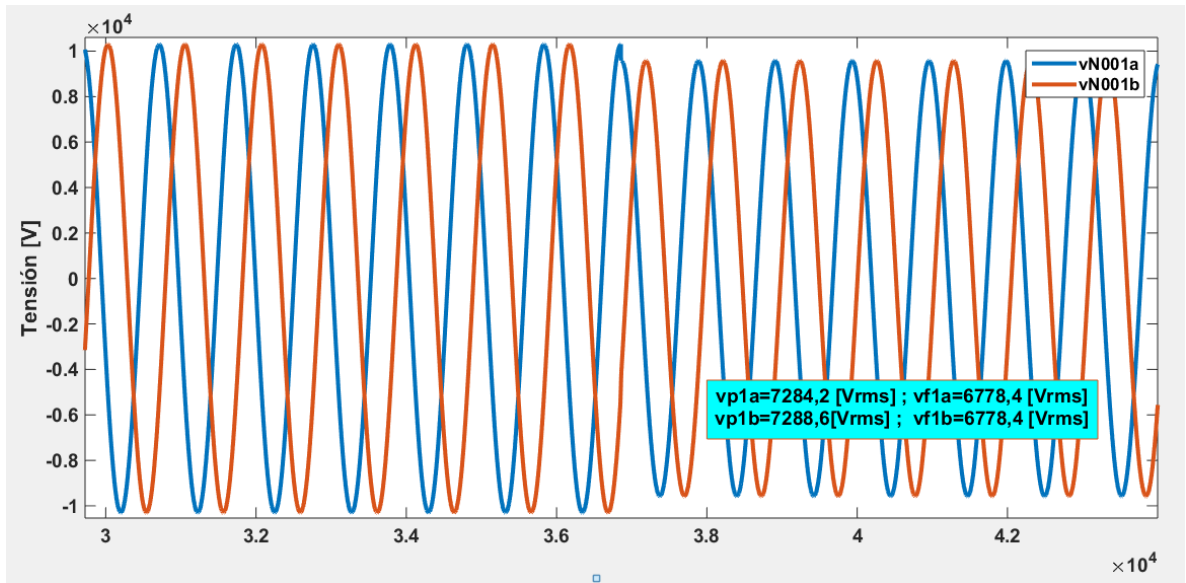
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_5$	$I_1$	$I_5$
B	5967,98123	6155,78879	0	1814,77624	2684,272655

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{s1}$	$I_{s2}$	$I_{s3}$	$I_{s4}$	$I_{s5}$	$I_{s6}$	$I_{s7}$	$I_{s8}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
B	70669	11165	11129	11254	6834,2	11349	4873,5	11583	97,4320052	0,32243618	39,2731473	57,0578906	76,8257562

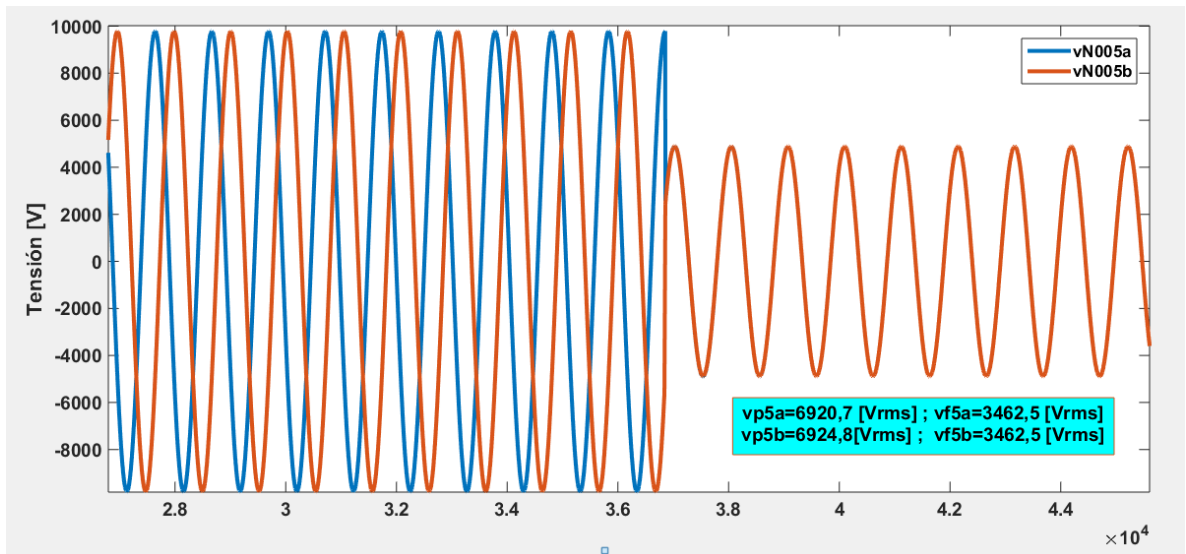
### C.1.3 Nodo eléctrico 3

#### Falla bifásica en el nodo 3

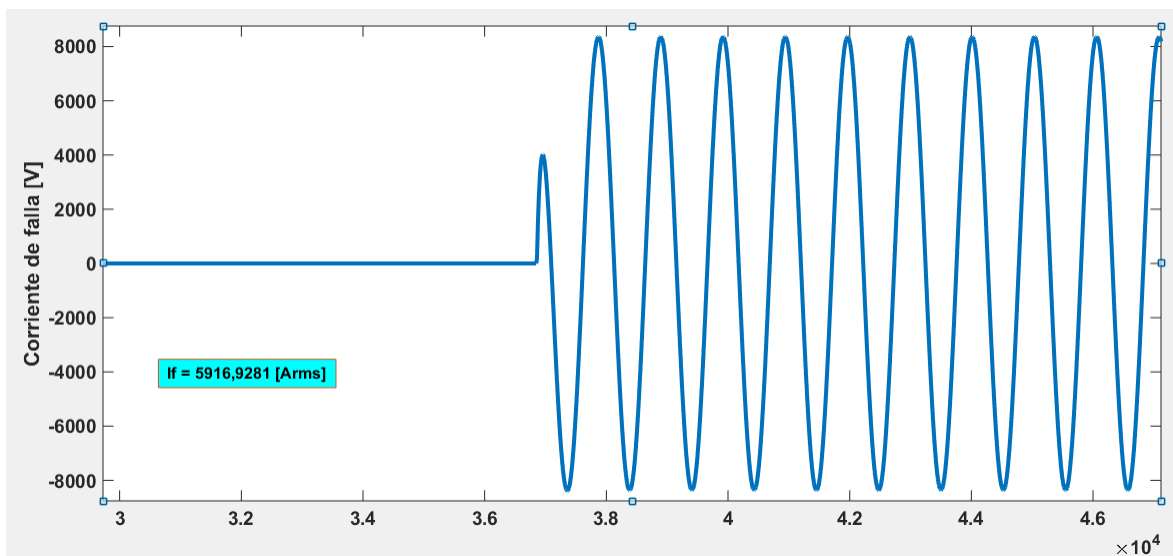
**Figura C7.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 3



**Figura C8.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica en el nodo 3



**Figura C9.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 3



**Tabla C3.** Resultados falla bifásica en el nodo 3

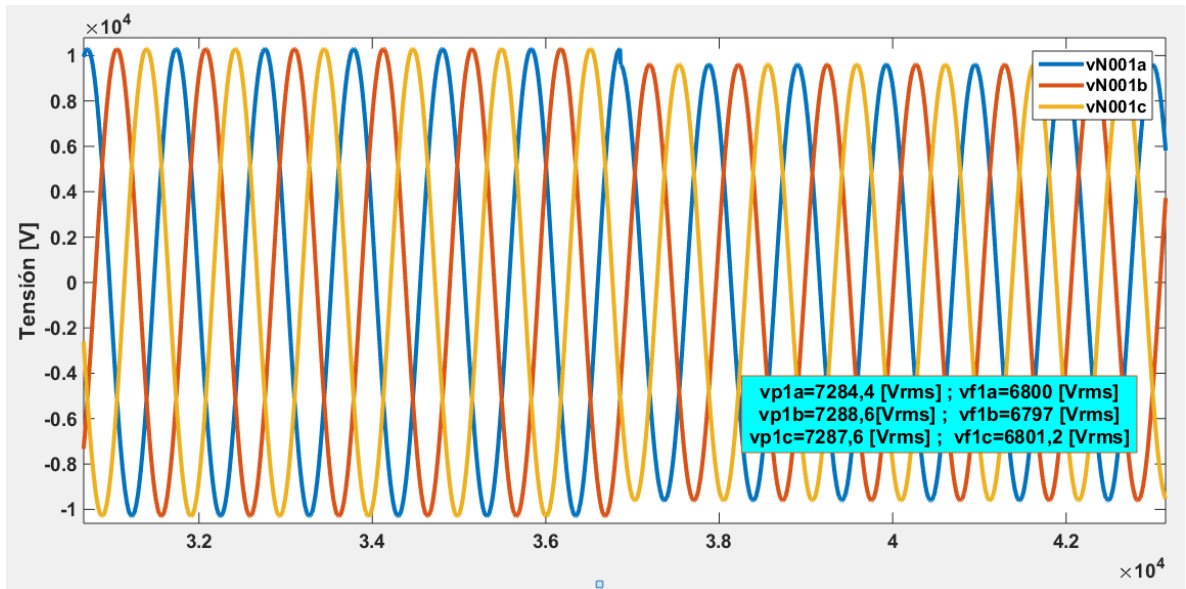
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_5$	$I_1$	$I_5$
A	5967,98123	6777,6185	3461,57054	7823,48936	1964,684746
B	5967,98123	6775,6386	3461,57054	7804,35768	1963,5117

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{s1}$	$I_{s2}$	$I_{s3}$	$I_{s4}$	$I_{s5}$	$I_{s6}$	$I_{s7}$	$I_{s8}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
A	35291	4957,7	5557,6	5015,3	3412,9	5057,9	2433,8	5161,9	77,8314886	10,7942277	31,9502323	51,8812155	61,938729
B	35334	5068,3	5564,3	5108,7	3417	5152	2436,7	5258	77,912612	8,91396941	33,1140995	52,7038043	62,6566812
Resultado suma deltas $\delta_i$									155,744101	19,7081971	65,0643318	104,58502	124,59541

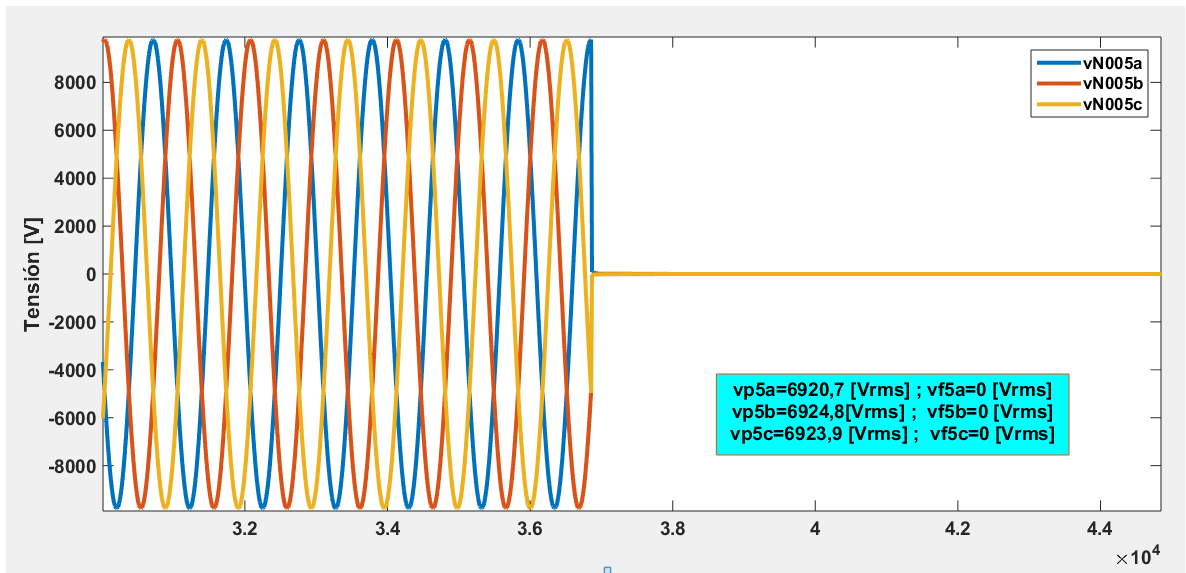
### C.1.4 Nodo eléctrico 4

#### Falla trifásica en el nodo 4

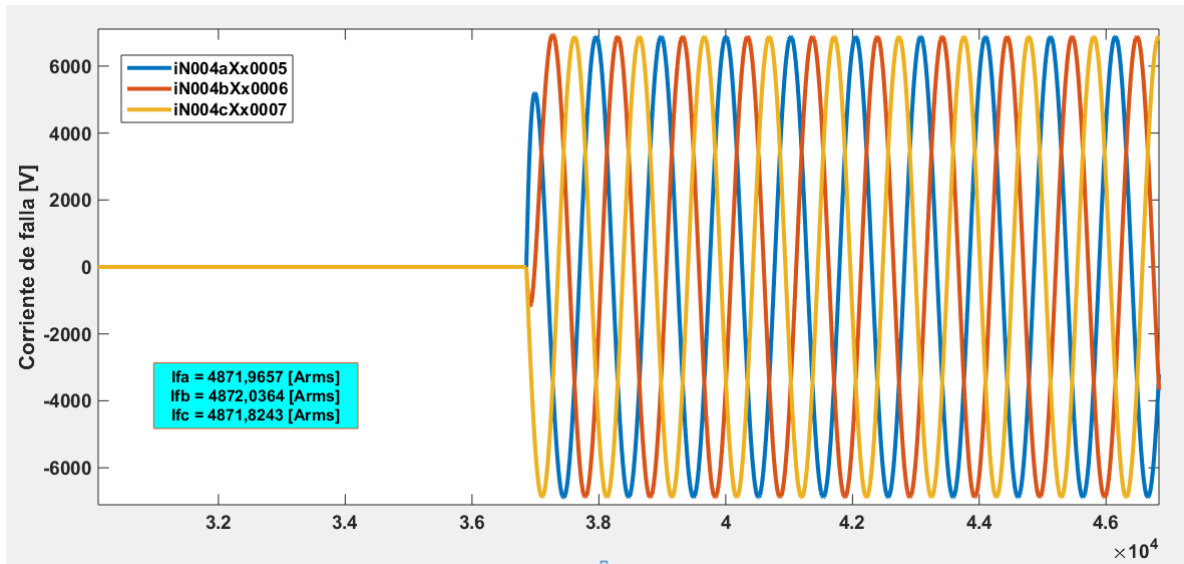
**Figura C10.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 4



**Figura C11.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica en el nodo 4



**Figura C12.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 4



**Tabla C4.** Resultados falla trifásica en el nodo 4

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_5$	$I_1$	$I_5$
A	5967,98123	6799,39739	0	8033,93781	4028,491893
B	5967,98123	6799,39739	0	8033,93781	4028,491893
C	5967,98123	6799,39739	0	8033,93781	4028,491893

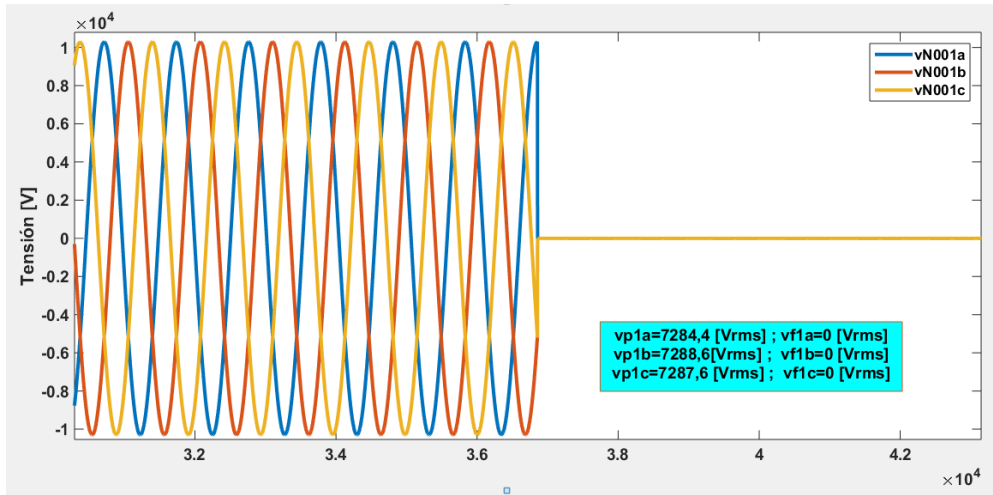
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{s1}$	$I_{s2}$	$I_{s3}$	$I_{s4}$	$I_{s5}$	$I_{s6}$	$I_{s7}$	$I_{s8}$	$I_{s9}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$
A	70627	4763,4	11122	4801,3	6830,1	4842,1	4870,6	4941,6	88,624835	57,1713721	29,7038111	0,58514351	18,477985
B	70669	4835,4	11129	4874	6834,2	4915,3	4873,5	5016,4	88,6315955	56,5513523	28,6822159	0,85040588	19,6935672
C	70659	4784,4	11127	4822,5	6833,3	4863,4	4872,8	4963,4	88,6299865	57,0018873	29,426485	0,19290757	18,836042
Resultado suma deltas $\delta_i$									265,886417	170,724612	87,812512	1,62845696	57,0075942

## C.2 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 2

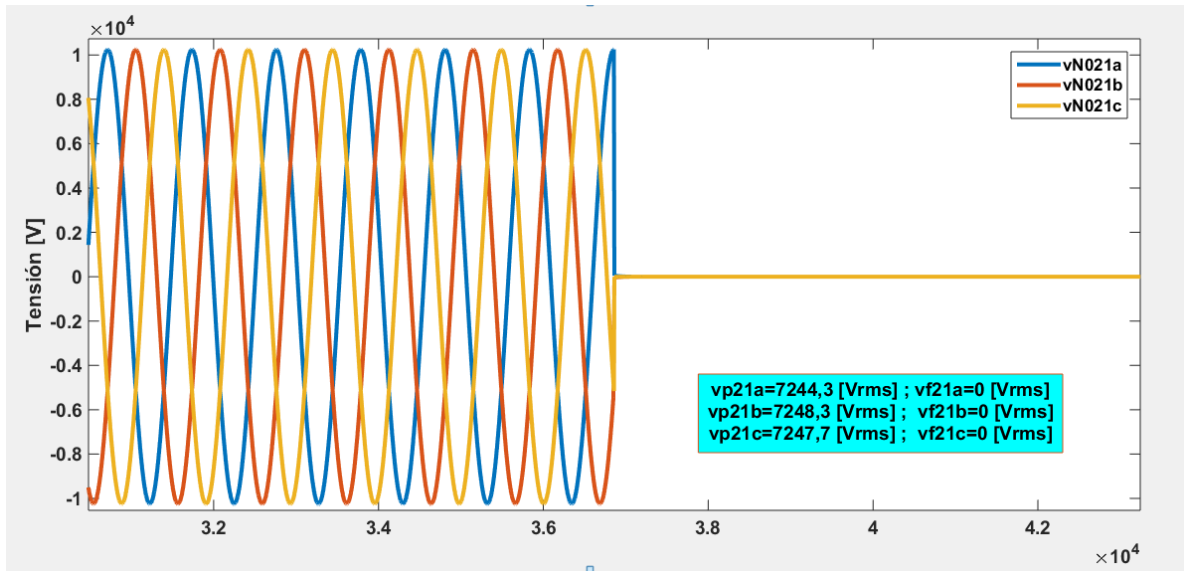
### C.2.1 Nodo eléctrico 1

#### Falla trifásica en el nodo 1

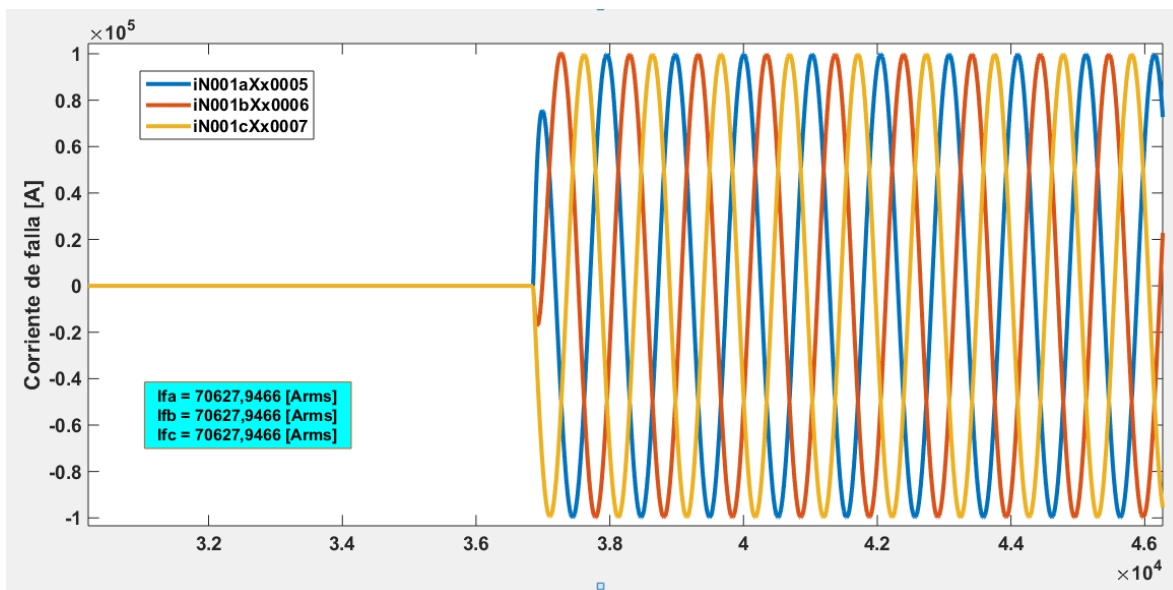
**Figura C13.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura C14.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 21 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura C15.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1



**Tabla C5.** Resultados falla trifásica en el nodo 1

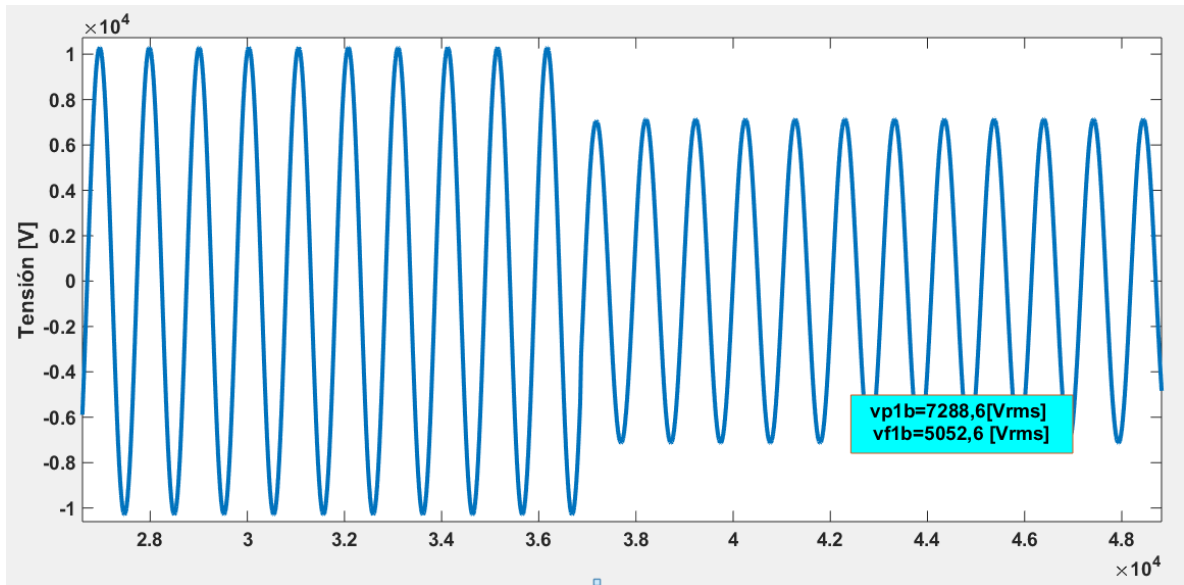
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{21}$	$I_1$	$I_{21}$
A	5967,98123	0	0	57668,3406	0
B	5967,98123	0	0	57668,3406	0
C	5967,98123	0	0	57668,3406	0

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{211}$	$I_{118}$	$I_{2118}$	$I_{119}$	$I_{2119}$	$I_{120}$	$I_{2120}$	$I_{121}$	$\delta_1$	$\delta_{18}$	$\delta_{19}$	$\delta_{20}$	$\delta_{21}$
A	70612	70630	22287	70876	3098,3	70969	2447	71001	18,3306795	68,4454198	95,6285626	96,5520157	100
B	70655	70673	22300	70919	3100,2	71012	2448,5	71043	18,3803827	68,4462242	95,628534	96,5519912	100
C	70645	70663	22297	70910	3099,8	71002	2448,1	71034	18,3688292	68,4460043	95,6285432	96,552069	100
Resultado suma deltas $\delta t$									55,0798915	205,337648	286,88564	289,656076	300

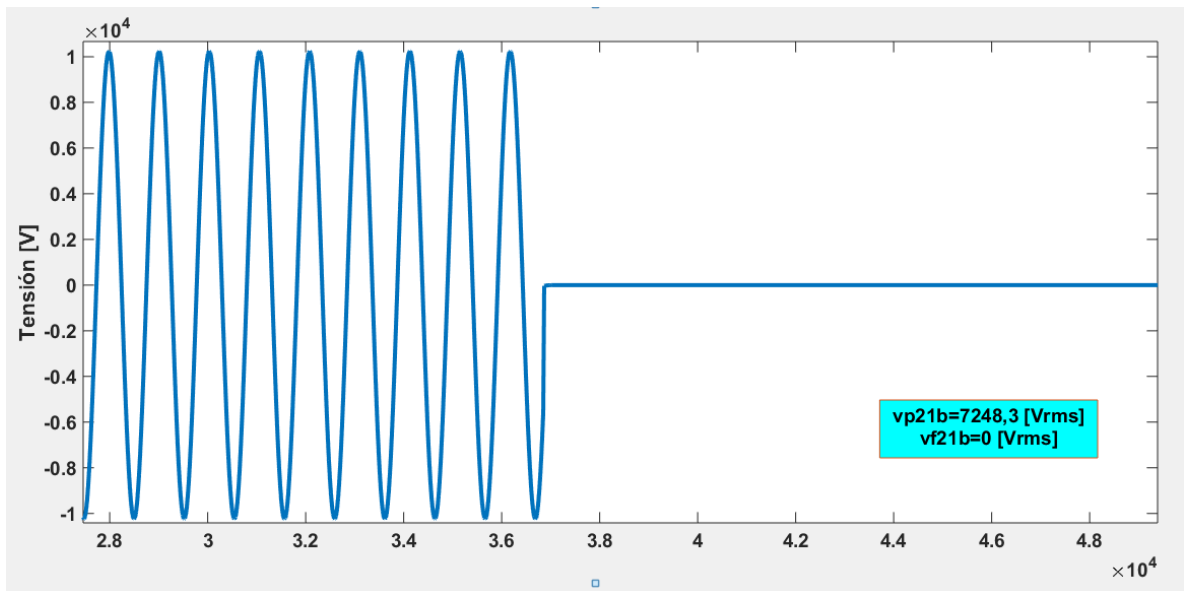
## C.2.2 Nodo eléctrico 18

### Falla monofásica en el nodo 18

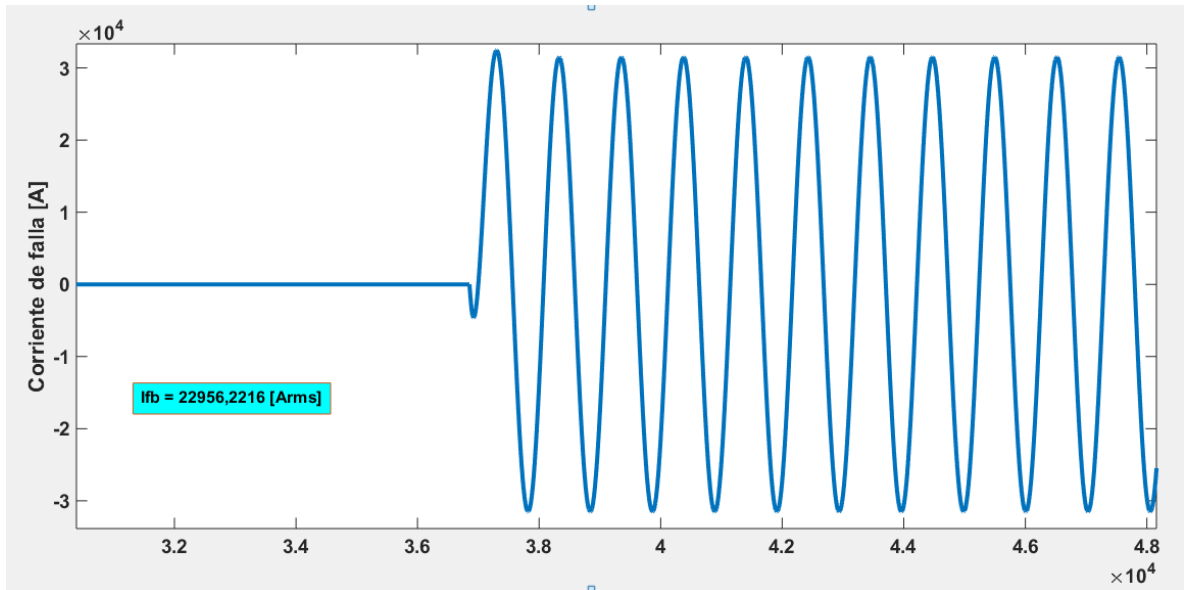
**Figura C16.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 18



**Figura C17.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 21 cuando la falla es monofásica en el nodo 18



**Figura C18.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 18



**Tabla C6.** Resultados falla monofásica en el nodo 18

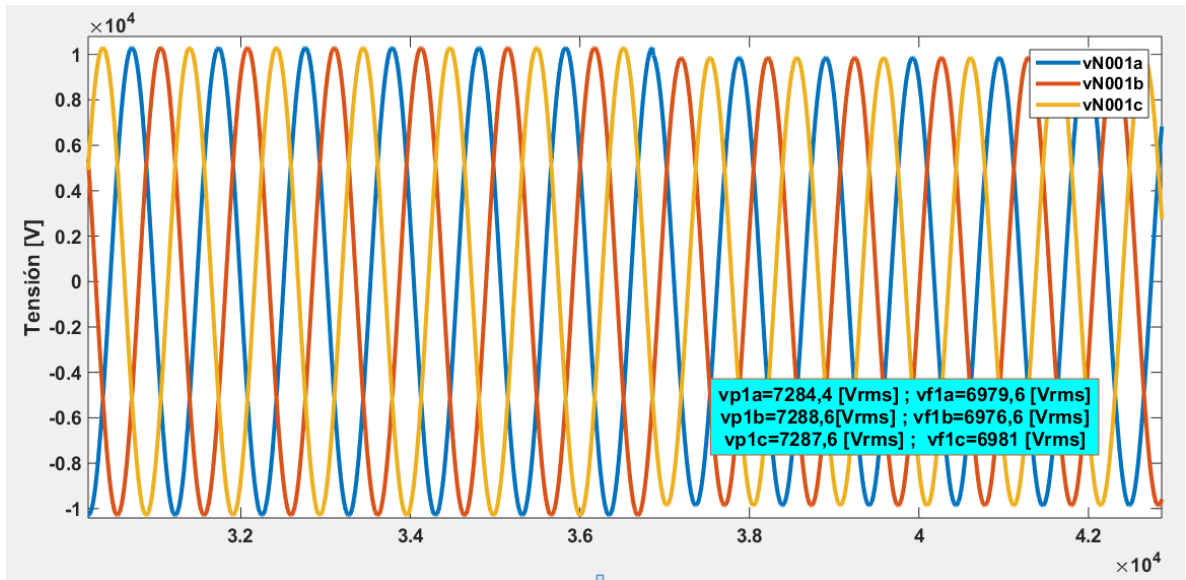
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{21}$	$I_1$	$I_{21}$
B	5967,98123	5054,25785	0	8829,2689	1250,548132

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{211}$	$I_{118}$	$I_{2118}$	$I_{119}$	$I_{2119}$	$I_{120}$	$I_{2120}$	$I_{121}$	$\delta_1$	$\delta_{18}$	$\delta_{19}$	$\delta_{20}$	$\delta_{21}$
B	70655	21681	22300	21757	3100,2	21785	2448	21795	87,5036885	2,77578475	85,7507928	88,7629103	94,2622247

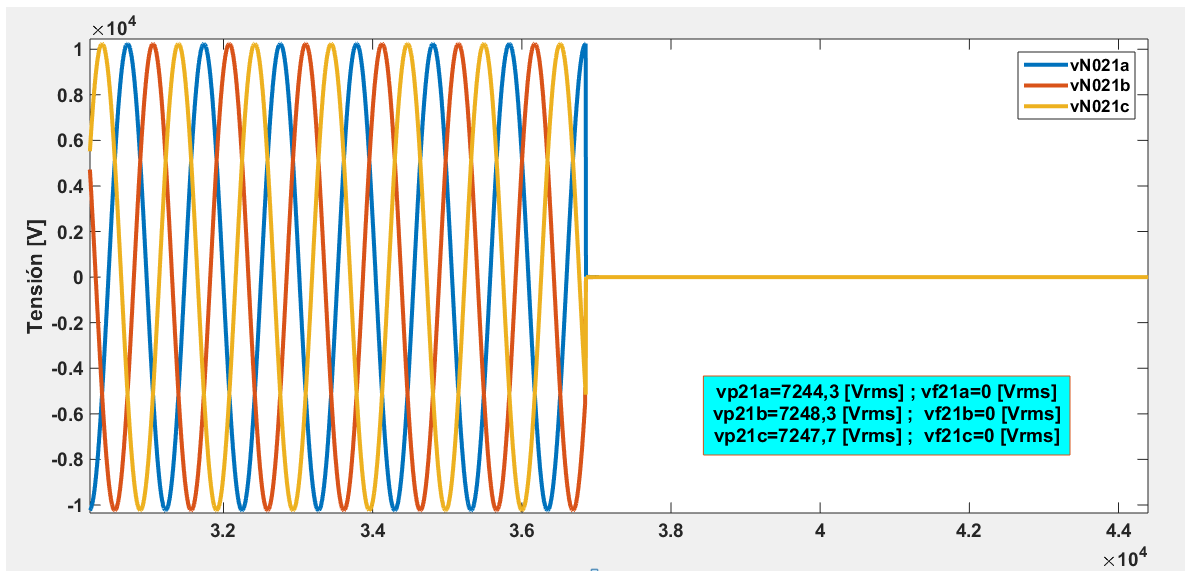
### C.2.3 Nodo eléctrico 19

#### Falla trifásica en el nodo 19

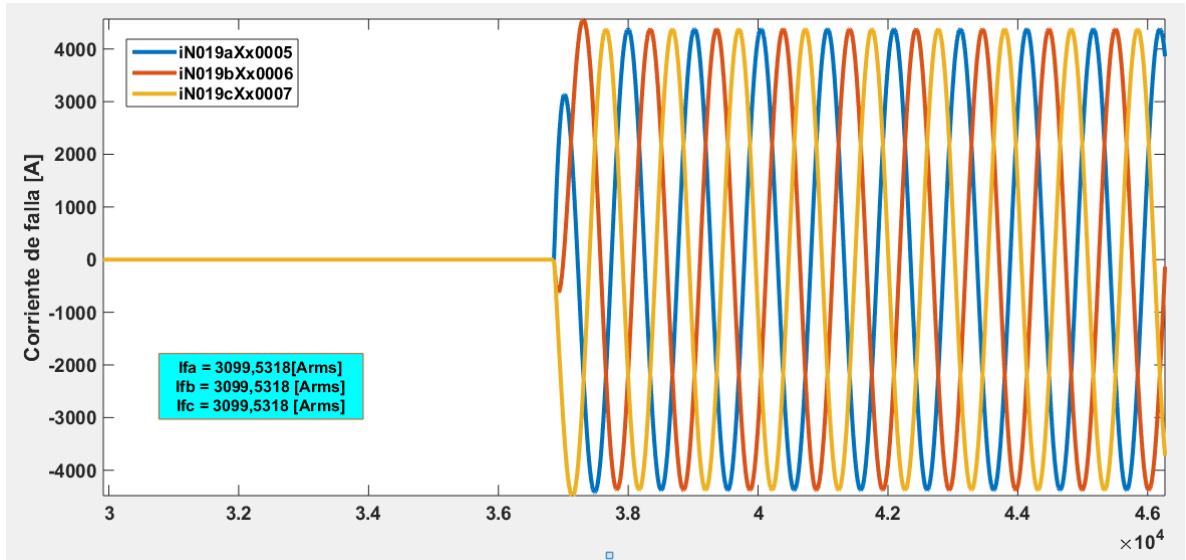
**Figura C19.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 19



**Figura C20.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 21 cuando la falla es trifásica en el nodo 19



**Figura C21.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 19



**Tabla C7.** Resultados falla trifásica en el nodo 19

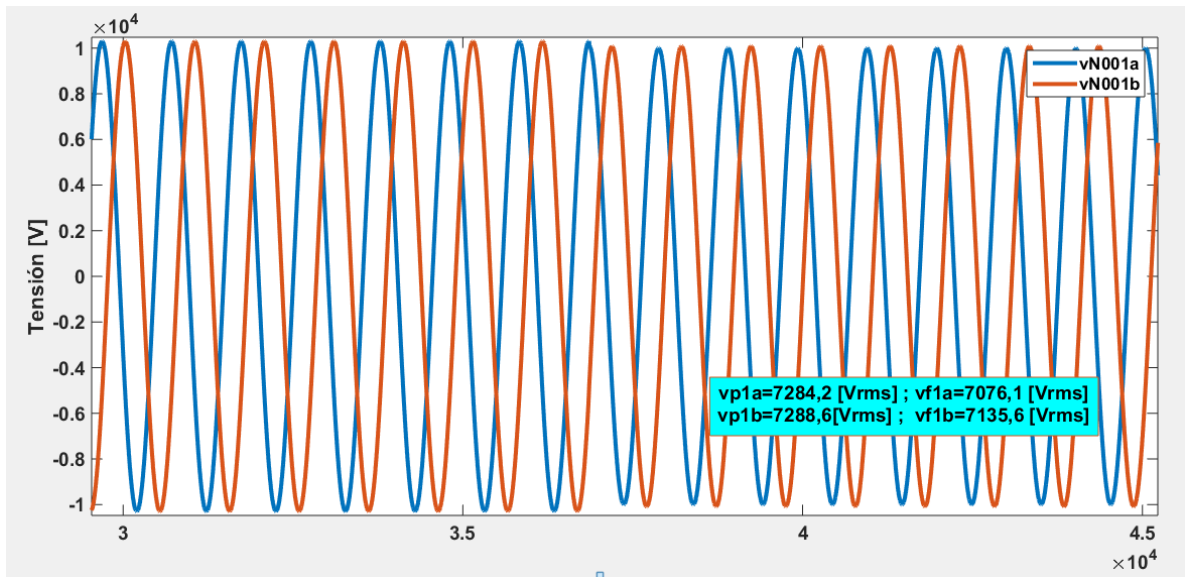
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{21}$	$I_1$	$I_{21}$
A	5967,98123	6979,07322	0	9770,13749	1726,79496
B	5967,98123	6979,00251	0	9769,45422	1726,777464
C	5967,98123	6979,07322	0	9770,13749	1726,79496

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{211}$	$I_{118}$	$I_{2118}$	$I_{119}$	$I_{2119}$	$I_{120}$	$I_{2120}$	$I_{121}$	$\delta_1$	$\delta_{18}$	$\delta_{19}$	$\delta_{20}$	$\delta_{21}$
A	70613	2953,9	22287	2964,2	3098,4	2968,1	2447	2969,4	86,1638261	86,7460852	4,33126775	17,5566861	41,8470075
B	70655	3025	22300	3035,5	3100,2	3039,5	2448,5	3040,8	86,1730179	86,4349776	2,08696213	19,4439875	43,2130537
C	70646	2973,3	22297	2983,6	3099,8	2987,5	2448,2	2988,8	86,1702892	86,6650222	3,74862894	18,0518828	42,2244727
Resultado suma deltas $\delta t$									258,507133	259,846085	10,1668588	55,0525564	127,284534

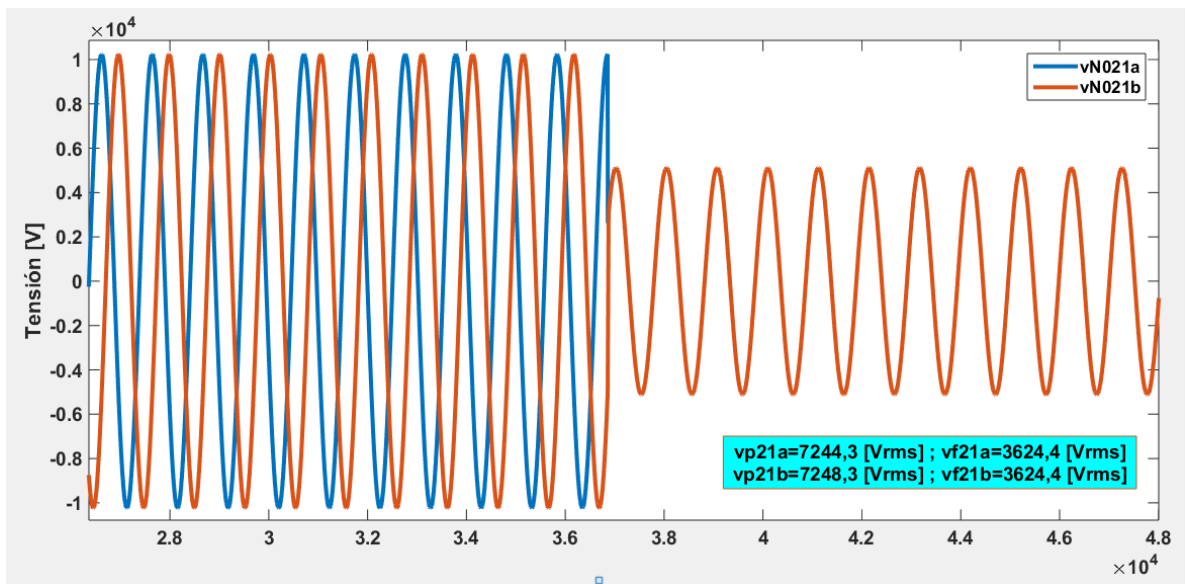
## C.2.4 Nodo eléctrico 20

### Falla bifásica en el nodo 20

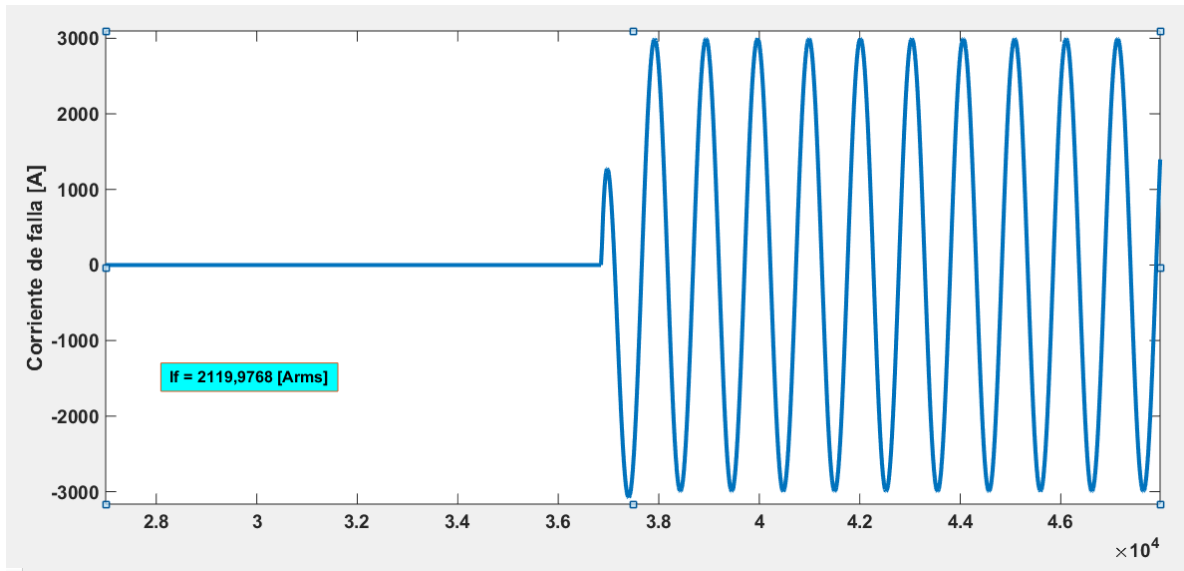
**Figura C22.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 20



**Figura C23.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 21 cuando la falla es bifásica en el nodo 20



**Figura C24.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 20



**Tabla C8.** Resultados falla bifásica en el nodo 20

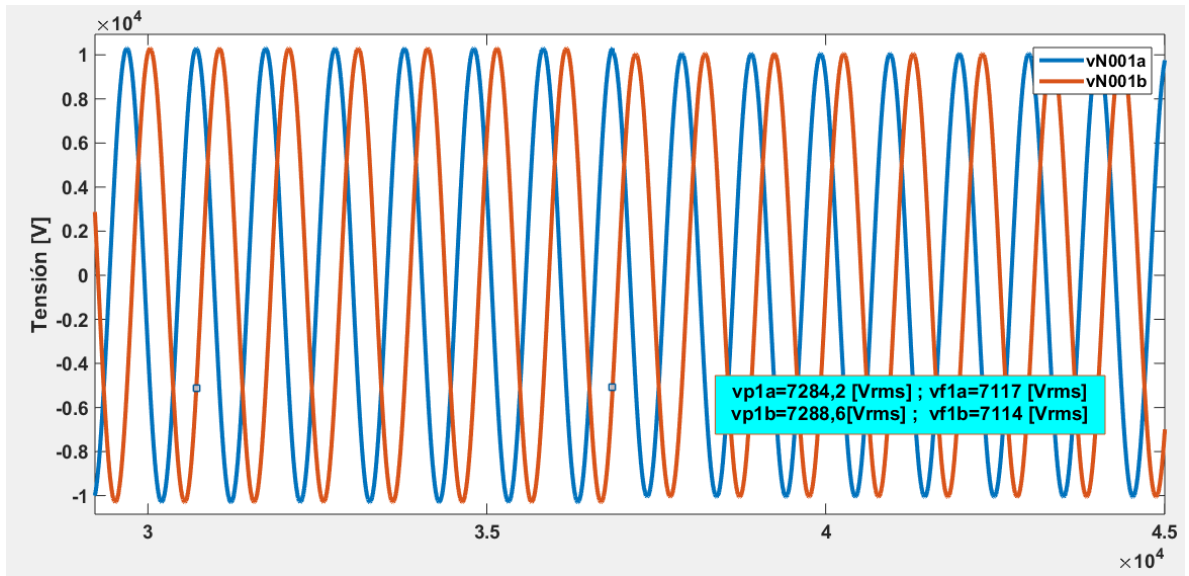
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>21</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>21</sub>
A	5967,98123	7075,31045	3623,42728	10700,0737	854,0810904
B	5967,98123	7138,24296	3623,42728	11308,1877	869,652145

Fase	Corrientes calculadas [Arms]							Deltas					
	I <sub>211</sub>	I <sub>118</sub>	I <sub>2118</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>2119</sub>	I <sub>120</sub>	I <sub>2120</sub>	I <sub>121</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>18</sub>	δ <sub>19</sub>	δ <sub>20</sub>	δ <sub>21</sub>
A	35284	2017,3	11136	2024,3	1548,2	2027	1222,7	2027,9	69,6744313	81,8848779	23,5192412	39,6793291	57,8834711
B	35327	1483,2	11150	1488,4	1550,1	1490,3	1224,2	1491	67,9899576	86,6977578	3,98038836	17,8554653	41,6732297
Resultado suma deltas δ:									137,664389	168,582636	27,4996296	57,5347944	99,5567008

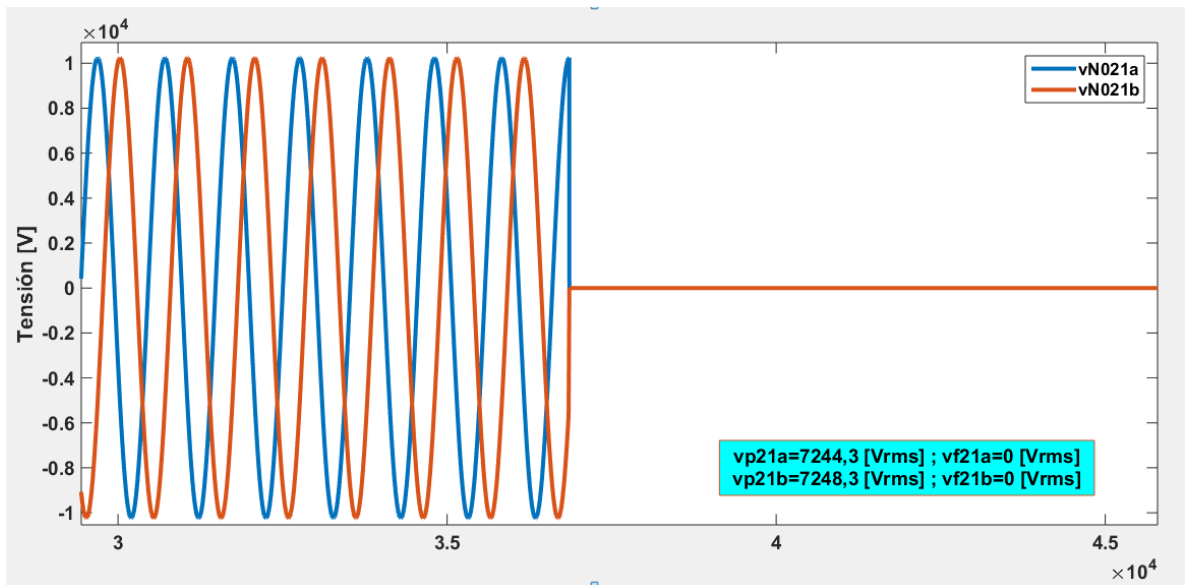
## C.2.5 Nodo eléctrico 21

### Falla bifásica a tierra en el nodo 21

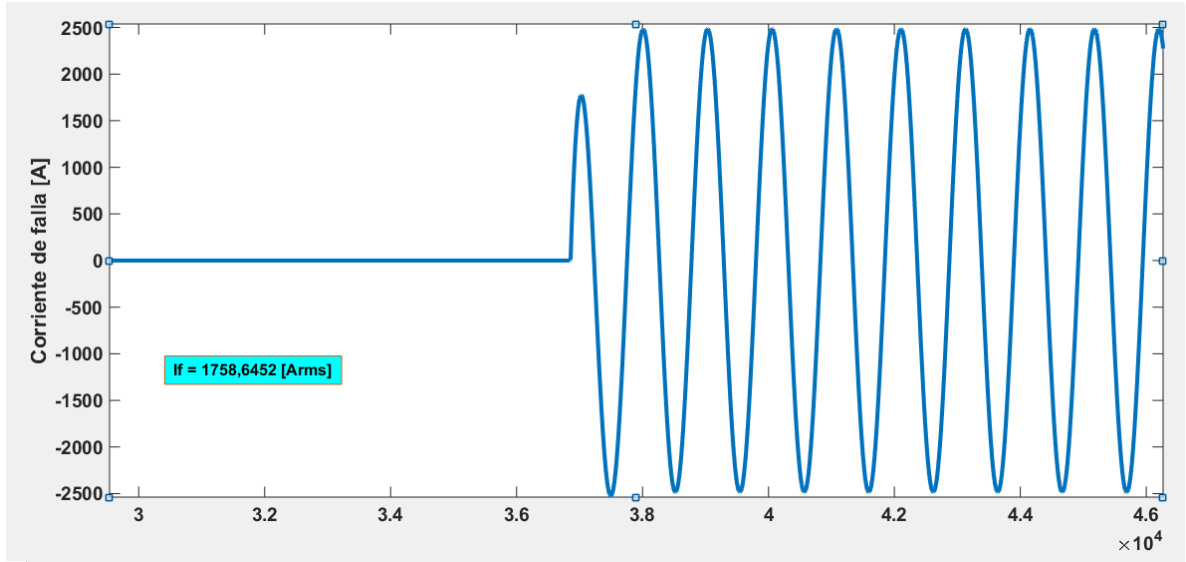
**Figura C25.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 21



**Figura C26.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 21 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 21



**Figura C27.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 21



**Tabla C9.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 21

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>21</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>21</sub>
A	5967,98123	7116,32265	0	11096,3727	1760,753855
B	5967,98123	7116,32265	0	11096,3727	1760,753855

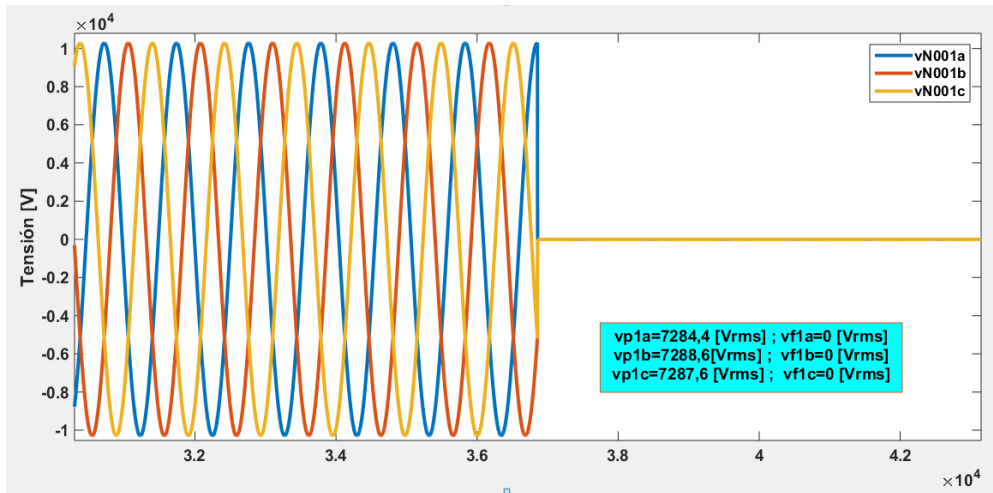
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>211</sub>	I <sub>118</sub>	I <sub>2118</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>2119</sub>	I <sub>120</sub>	I <sub>2120</sub>	I <sub>121</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>18</sub>	δ <sub>19</sub>	δ <sub>20</sub>	δ <sub>21</sub>
A	70613	1621,1	22287	1626,7	3098,4	1628,9	2447	1629,6	84,2856518	92,726253	47,498709	33,4327748	7,44873309
B	70655	1692,9	22300	1698,8	3100,2	1701	2448,5	1701,7	84,294993	92,4085202	45,2035353	30,5288952	3,35389611
Resultado suma deltas δ <sub>i</sub>									168,580645	185,134773	92,7022443	63,9616701	10,8026292

### C.3 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 3

#### C.3.1 Nodo eléctrico 1

##### Falla trifásica en el nodo 1

**Figura C28.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 1



**Figura C29.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es trifásica en el nodo 1

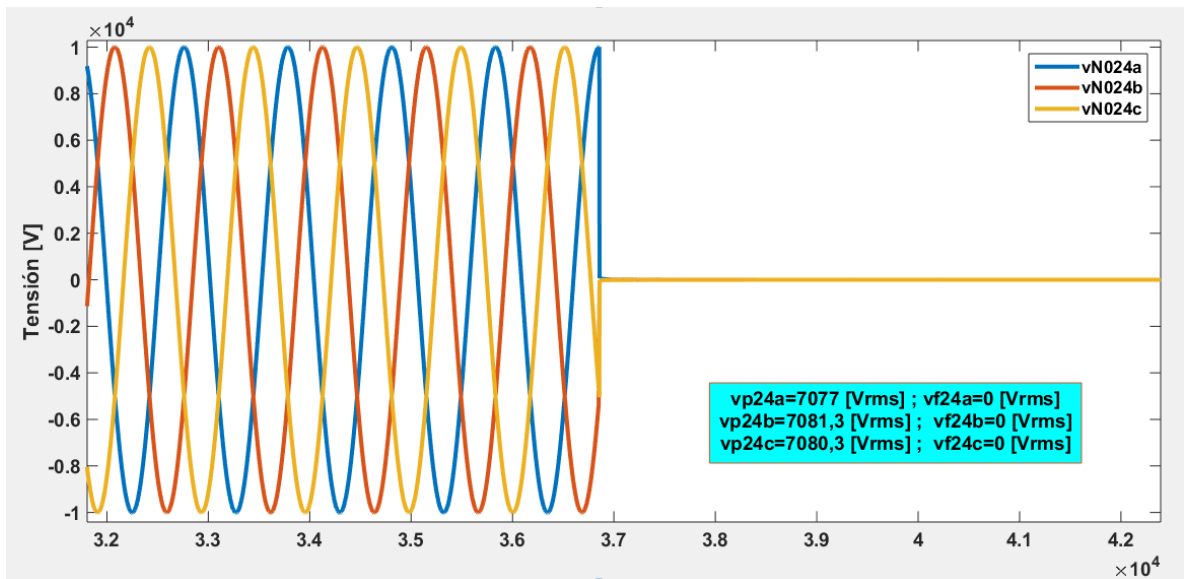


Figura C30. Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 1

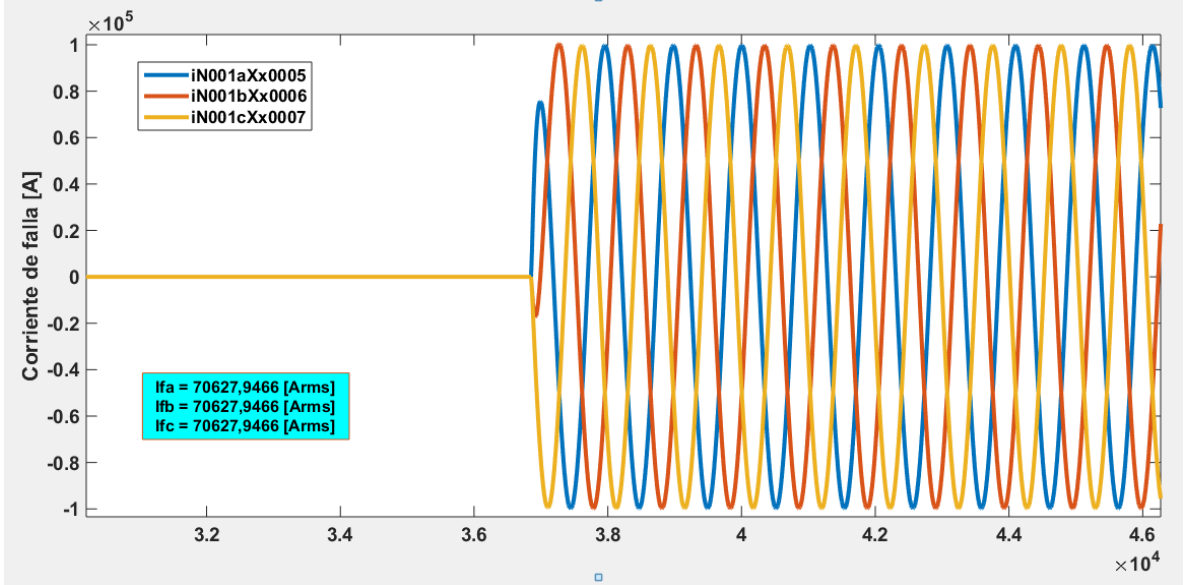


Tabla C10. Resultados falla trifásica en el nodo 1

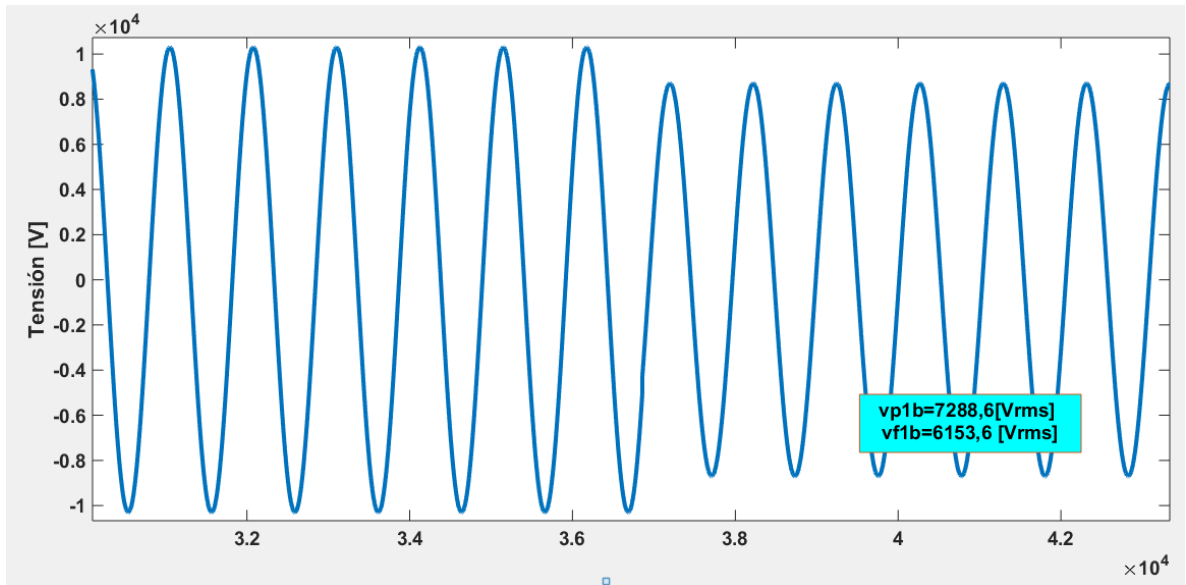
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{24}$	$I_1$	$I_{24}$
A	7309,25441	0	0	70629,0044	0
B	7309,25441	0	0	70629,0044	0
C	7309,25441	0	0	70629,0044	0

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{241}$	$I_{12}$	$I_{242}$	$I_{122}$	$I_{2422}$	$I_{123}$	$I_{2423}$	$I_{124}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{22}$	$\delta_{23}$	$\delta_{24}$
A	70644	71655	11122	71908	6046,4	72453	3091,3	72712	0,02122699	84,4784035	91,591478	95,733372	100
B	70686	71698	11129	71951	6050	72497	3093,2	71756	0,08063208	84,4779492	91,5914998	95,7333407	100
C	70677	71688	11127	71942	6049,2	72487	3092,8	72746	0,06790836	84,4785738	91,5915599	95,7333039	100
Resultado suma deltas $\delta_1$									0,16976744	253,434926	274,774538	287,200017	300

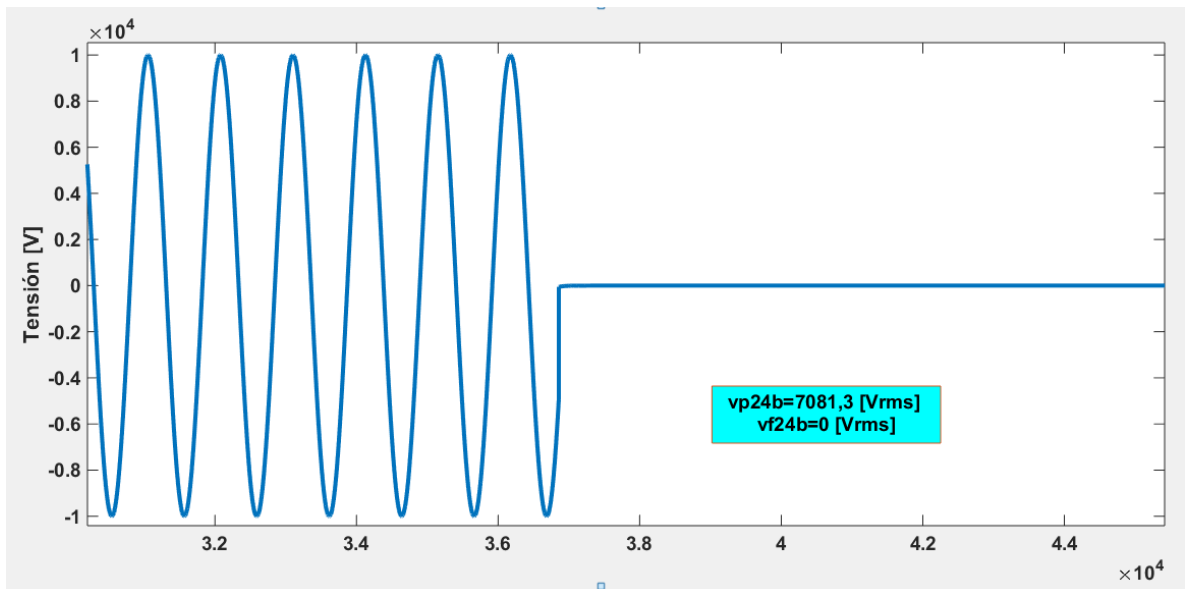
### C.3.2 Nodo eléctrico 2

#### Falla monofásica en el nodo 2

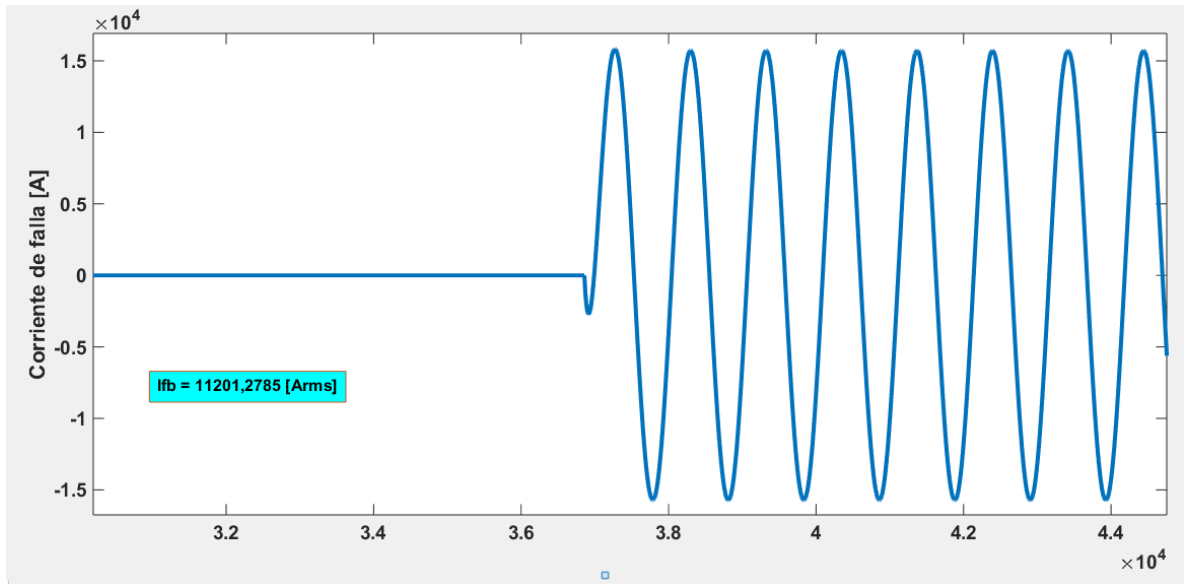
**Figura C31.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura C32.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es monofásica en el nodo 2



**Figura C33.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 2



**Tabla C11.** Resultados falla monofásica en el nodo 2

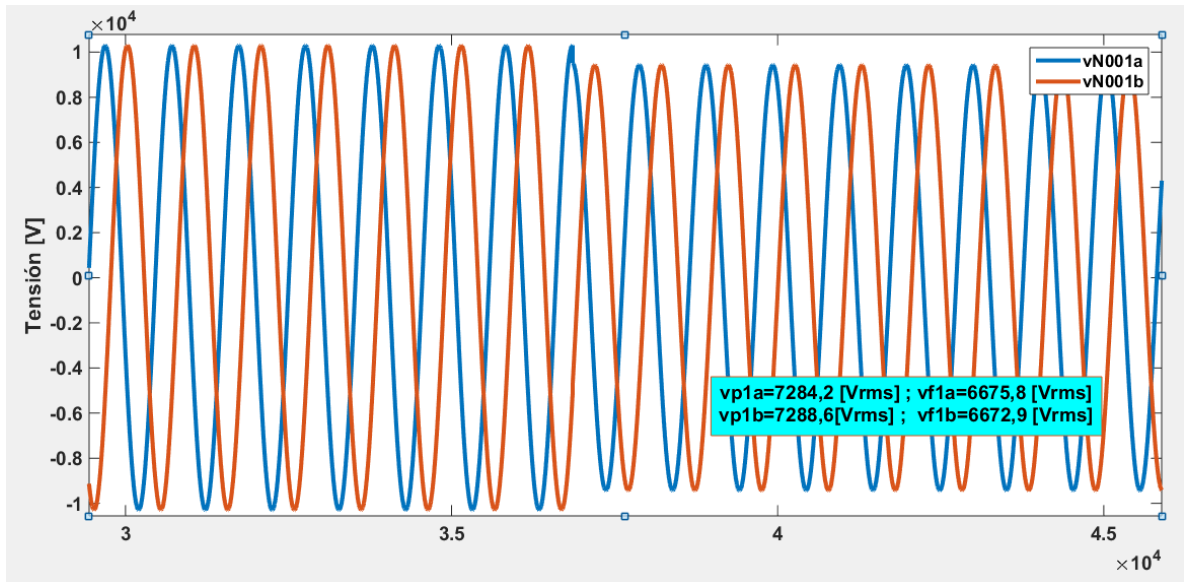
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{24}$	$I_1$	$I_{24}$
B	5967,98123	6155,78879	0	1814,77624	2684,272655

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{241}$	$I_{12}$	$I_{242}$	$I_{122}$	$I_{2422}$	$I_{123}$	$I_{2423}$	$I_{124}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{22}$	$\delta_{23}$	$\delta_{24}$
B	70687	11165	11129	11204	6050,1	11289	3093,2	11330	97,4326591	0,32243618	46,0005355	72,599876	76,3082731

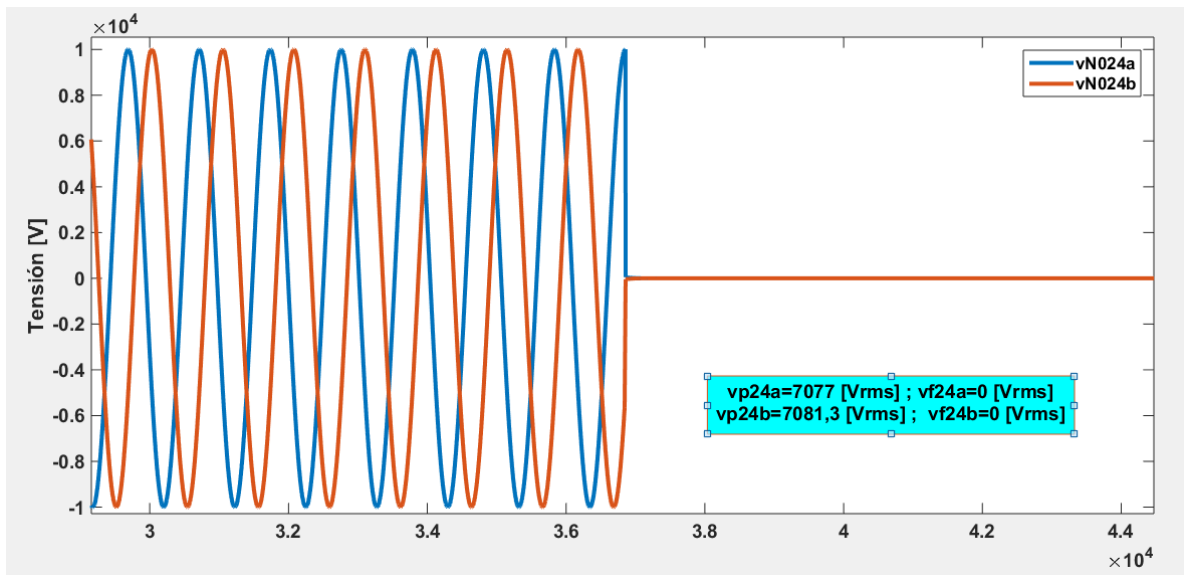
### C.3.3 Nodo eléctrico 22

#### Falla bifásica a tierra en el nodo 22

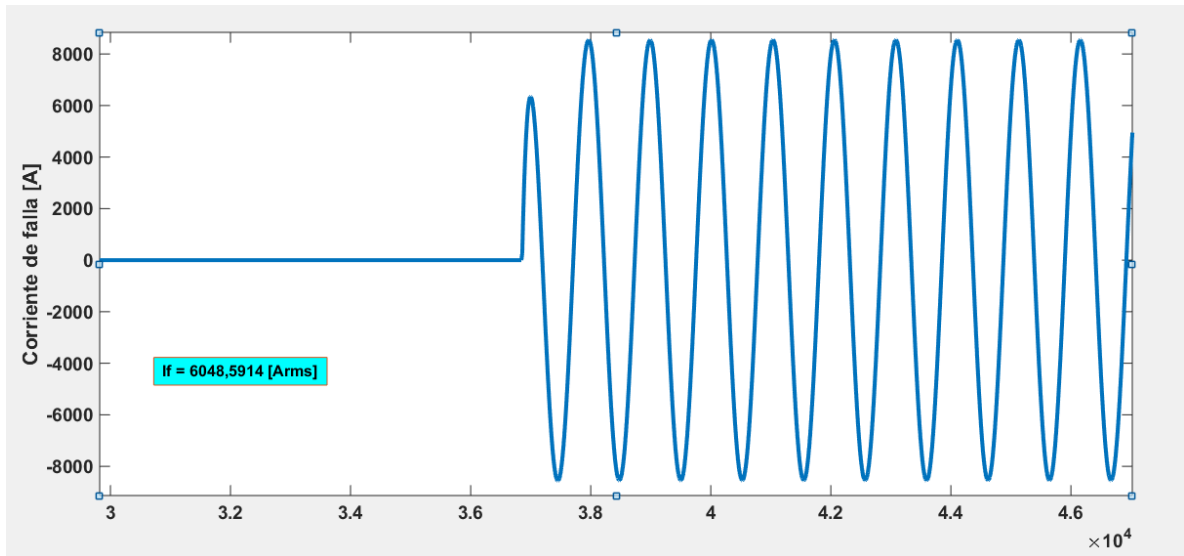
**Figura C34.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 22



**Figura C35.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 22



**Figura C36.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 22



**Tabla C12.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 22

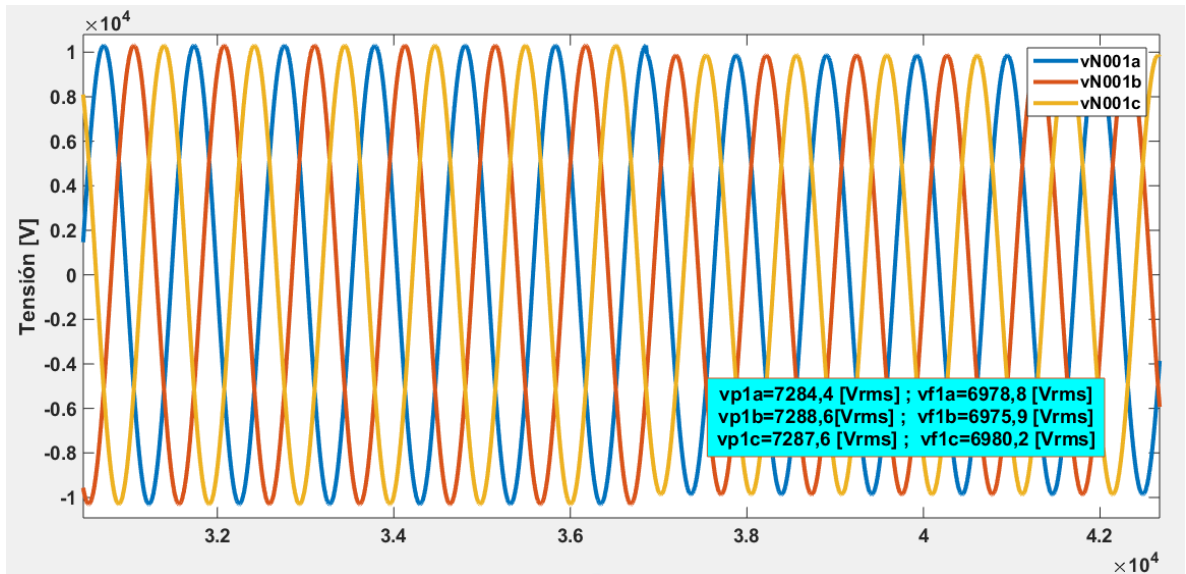
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>24</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>24</sub>
A	5967,98123	6675,22944	0	6834,10835	2910,778202
B	5967,98123	6675,22944	0	6834,10835	2910,778202

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>241</sub>	I <sub>12</sub>	I <sub>242</sub>	I <sub>122</sub>	I <sub>2422</sub>	I <sub>123</sub>	I <sub>2423</sub>	I <sub>124</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>22</sub>	δ <sub>23</sub>	δ <sub>24</sub>
A	70644	5985,1	11122	6006,3	6046,4	6051,7	3091,4	6073,4	90,325989	46,1868369	0,66320455	48,9168333	52,0733329
B	70687	6056,2	11129	6077,7	6050,1	6123,7	3093,2	6145,6	90,3318738	45,5818133	0,45411916	49,4880546	52,636387
Resultado suma deltas δt									180,657863	91,7686502	1,11732371	98,4048879	104,70972

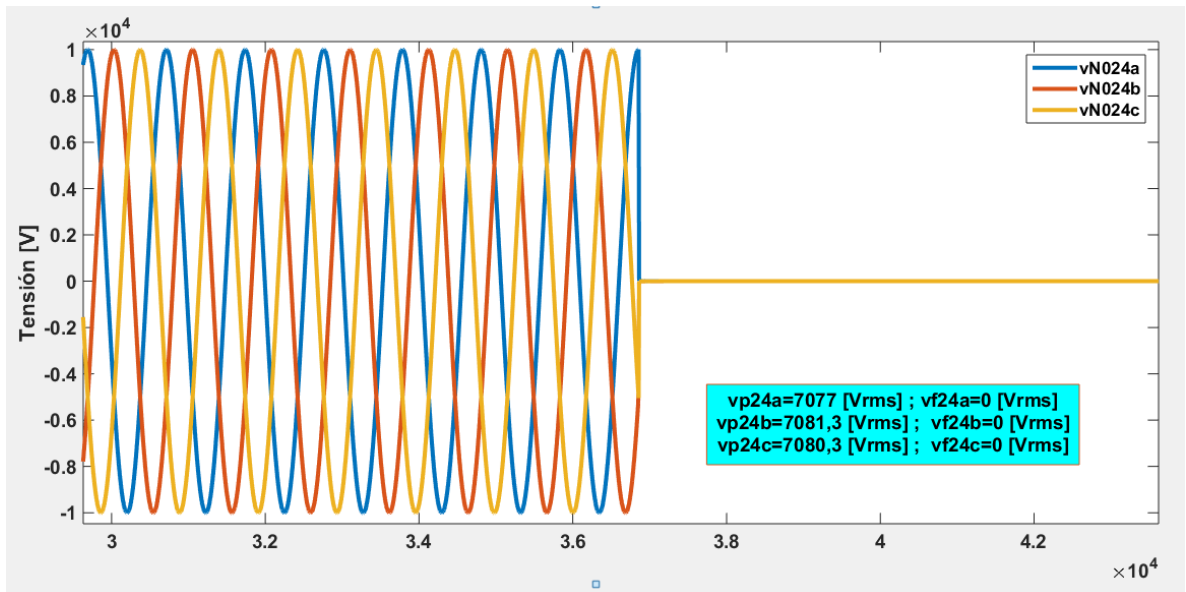
### C.3.4 Nodo eléctrico 23

#### Falla trifásica en el nodo 23

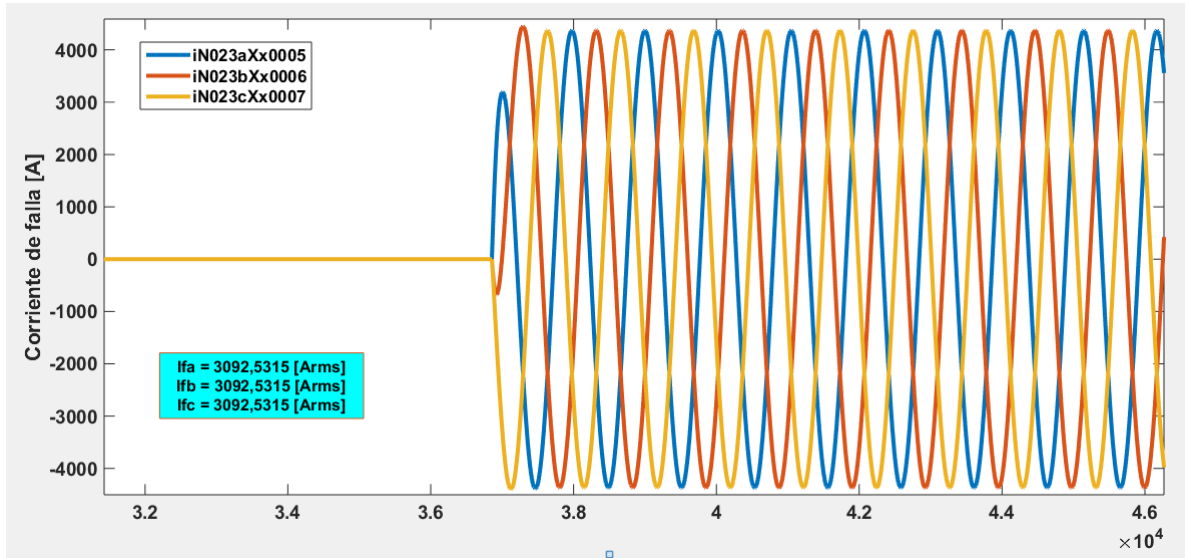
**Figura C37.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 23



**Figura C38.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es trifásica en el nodo 23



**Figura C39.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 23



**Tabla C13.** Resultados falla trifásica en el nodo 23

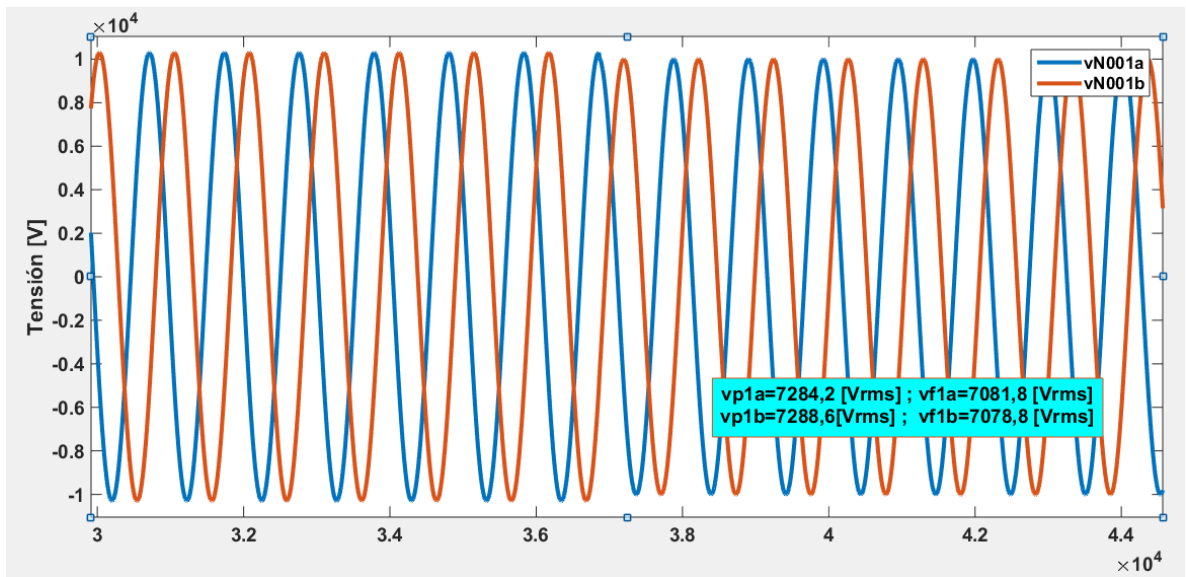
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>24</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>24</sub>
A	5967,98123	6978,2954	0	9762,62148	3042,932133
B	5967,98123	6978,2954	0	9762,62148	3042,932133
C	5967,98123	6978,2954	0	9762,62148	3042,932133

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>241</sub>	I <sub>12</sub>	I <sub>242</sub>	I <sub>122</sub>	I <sub>2422</sub>	I <sub>123</sub>	I <sub>2423</sub>	I <sub>124</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>22</sub>	δ <sub>23</sub>	δ <sub>24</sub>
A	70644	3003,9	11122	3014,6	6046,4	3037,4	3091,4	3048,3	86,1805369	72,9913685	50,1422334	1,74678139	0,17609379
B	70687	3076,4	11129	3087,3	6050,1	3110,7	3093,2	3121,8	86,1889435	72,3569054	48,9710914	0,56257434	2,52635873
C	70678	3024	11127	3034,7	6049,3	3057,7	3092,8	3068,6	86,1871849	72,8228633	49,8338651	1,13489395	0,83646832
Resultado suma deltas δt									258,556665	218,171137	148,94719	3,44424968	3,53892084

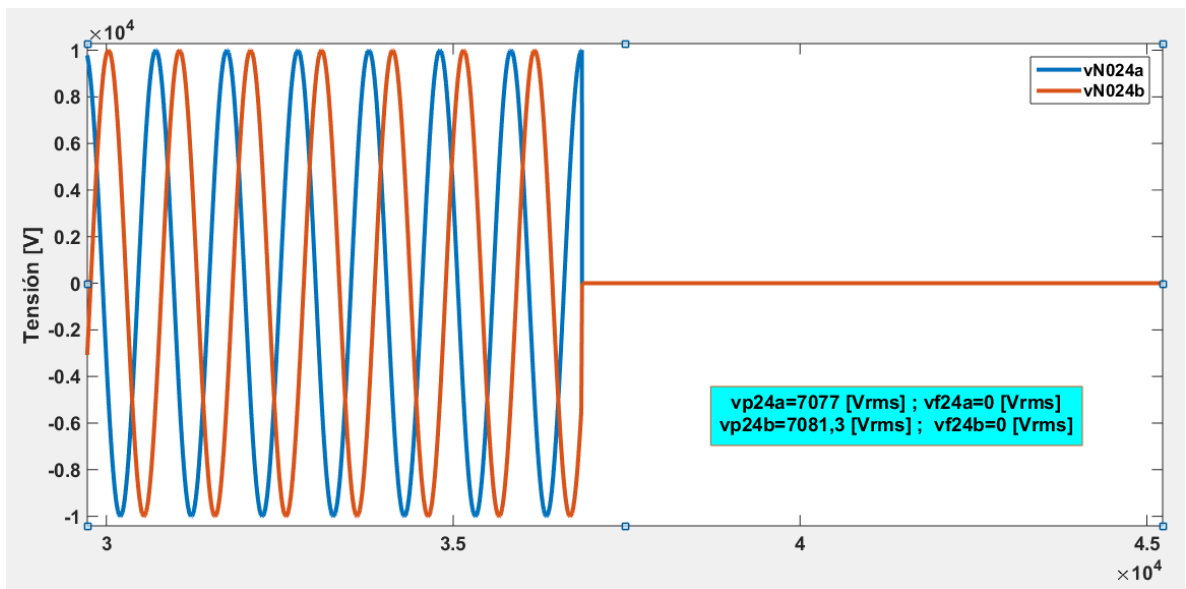
### C.3.5 Nodo eléctrico 24

#### Falla bifásica en el nodo 24

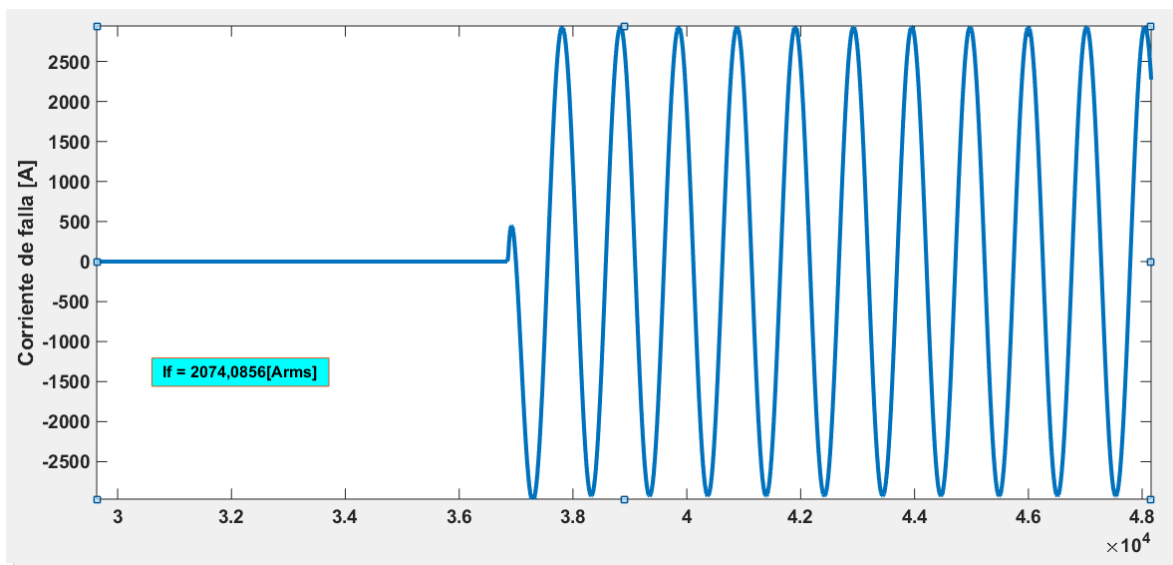
**Figura C40.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 24



**Figura C41.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es bifásica en el nodo 24



**Figura C42.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 24



**Tabla C14.** Resultados falla bifásica en el nodo 24

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{24}$	$I_1$	$I_{24}$
A	5967,98123	7080,96731	0	10754,7356	3087,7029
B	5967,98123	7080,96731	0	10754,7356	3087,7029

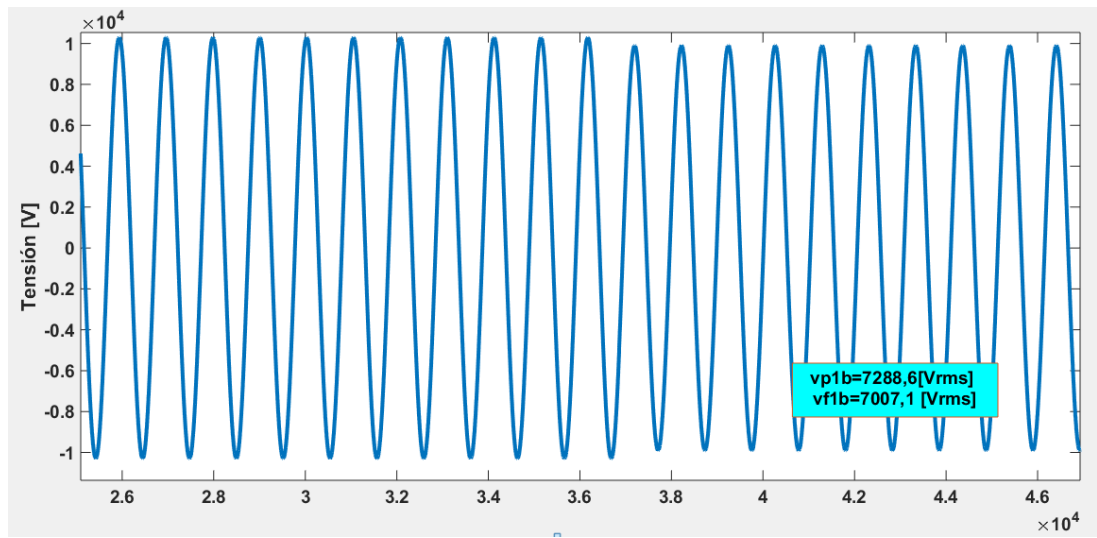
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{241}$	$I_{12}$	$I_{242}$	$I_{122}$	$I_{2422}$	$I_{123}$	$I_{2423}$	$I_{124}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{22}$	$\delta_{23}$	$\delta_{24}$
A	70645	1991,1	11122	1998,1	6046,4	2013,3	3091,4	2020,5	84,7763669	82,0976443	66,9538899	34,874167	34,5630048
B	70687	2064	11129	2071,3	6050,1	2087	3093,2	2094,5	84,7854123	81,4538593	65,7642022	32,5294194	32,1664011
Resultado suma deltas $\delta_t$									169,561779	163,551504	132,718092	67,4035864	66,7294059

#### C.4 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 4

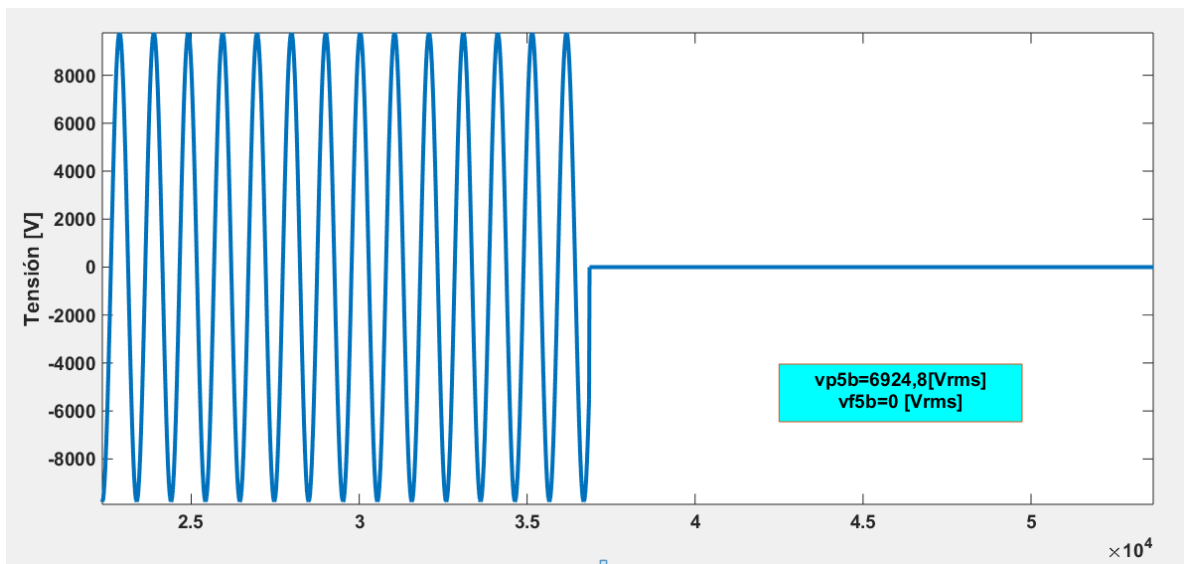
### C.4.1 Nodo eléctrico 5

#### Falla monofásica en el nodo 5

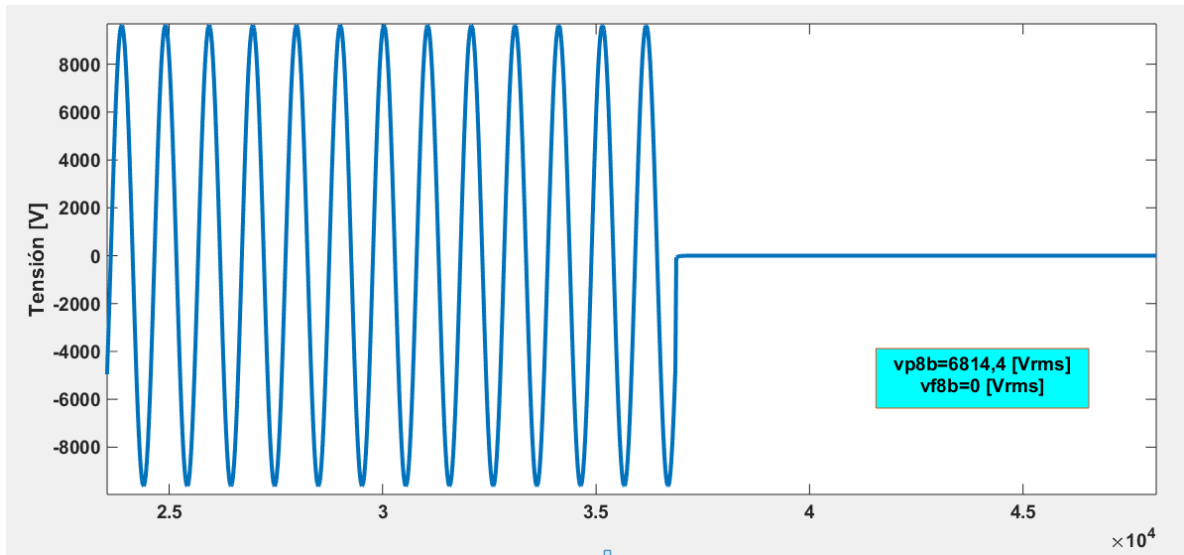
**Figura C43.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



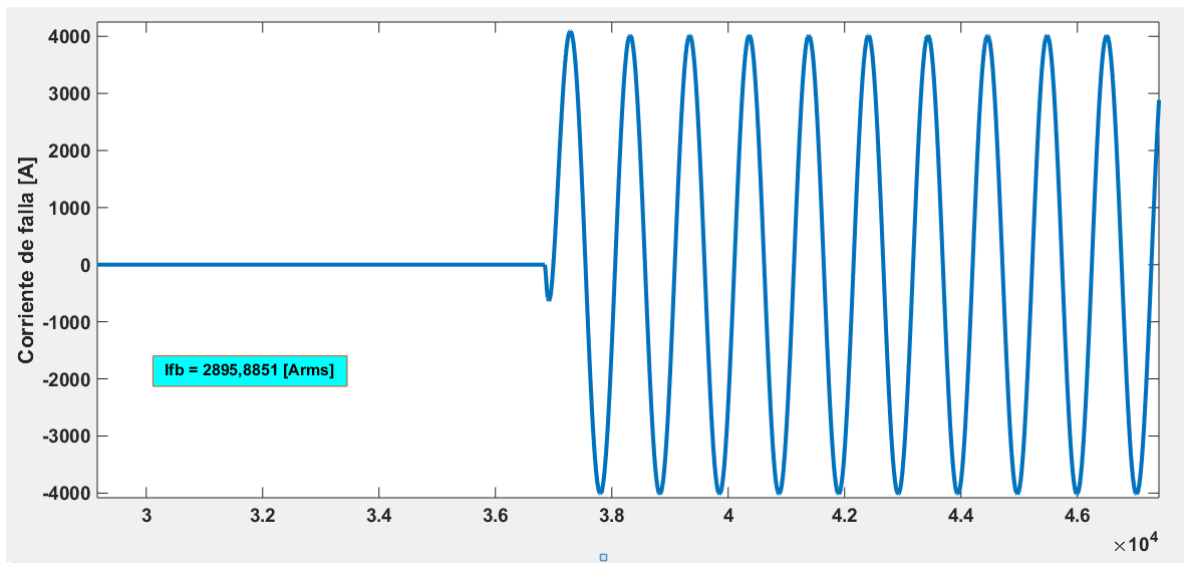
**Figura C44.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura C45.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura C46.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 5



**Tabla C15.** Resultados falla monofásica en el nodo 5

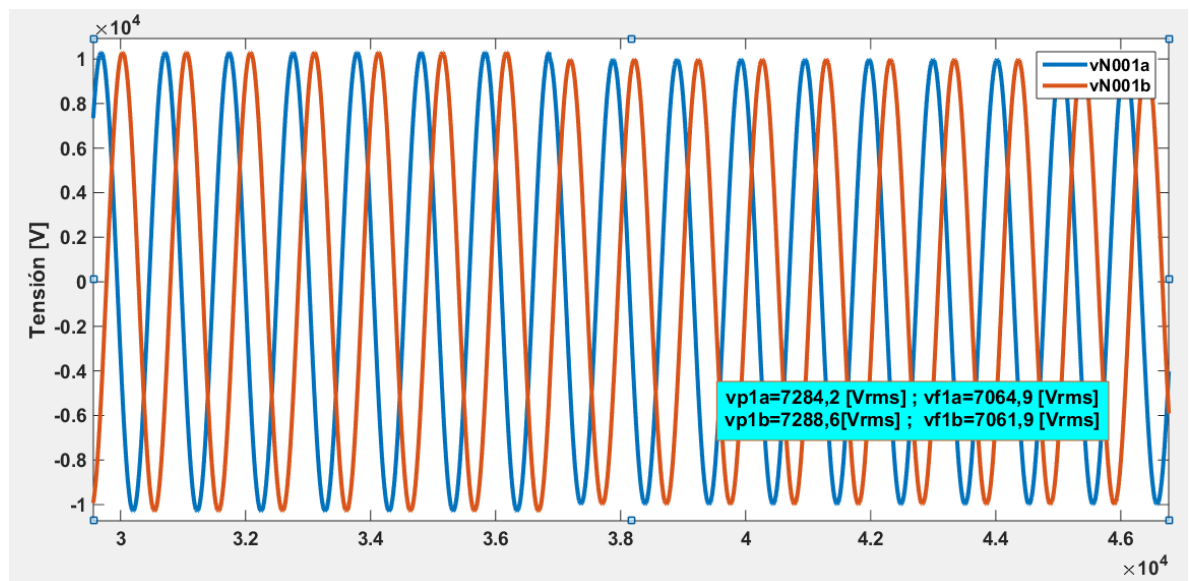
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>
B	7009,54952	0	0	4153,00236	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>85</sub>	I <sub>56</sub>	I <sub>86</sub>	I <sub>57</sub>	I <sub>87</sub>	I <sub>58</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>
B	2843,4	2854,3	2348,9	2869,5	1902,9	2889,5	31,5338699	17,7066181	33,685311	100

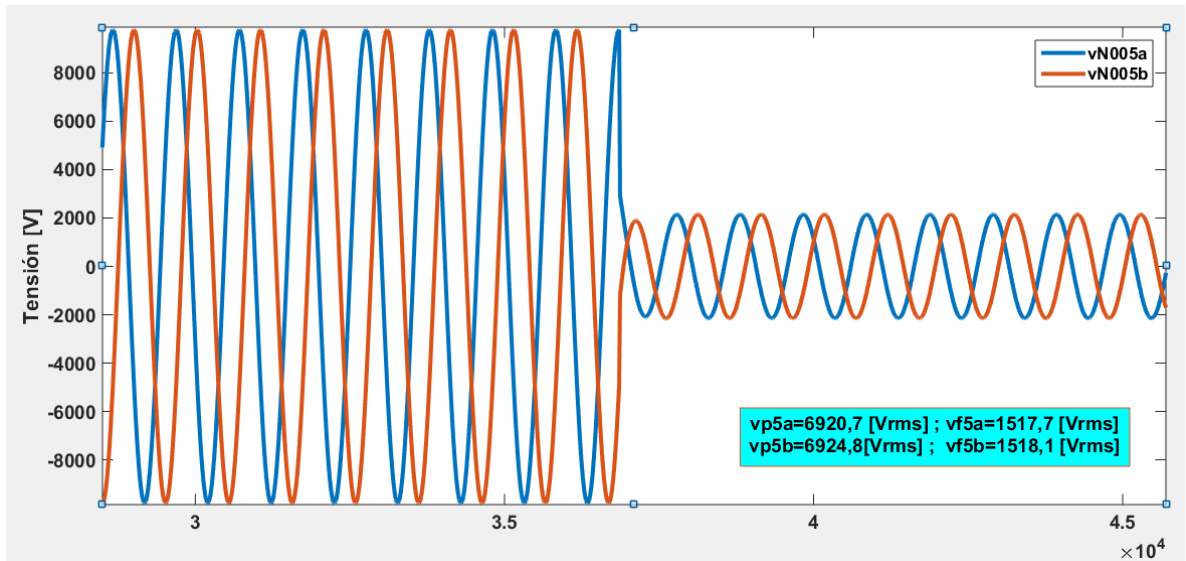
### C.4.2 Nodo eléctrico 6

#### Falla bifásica en el nodo 6

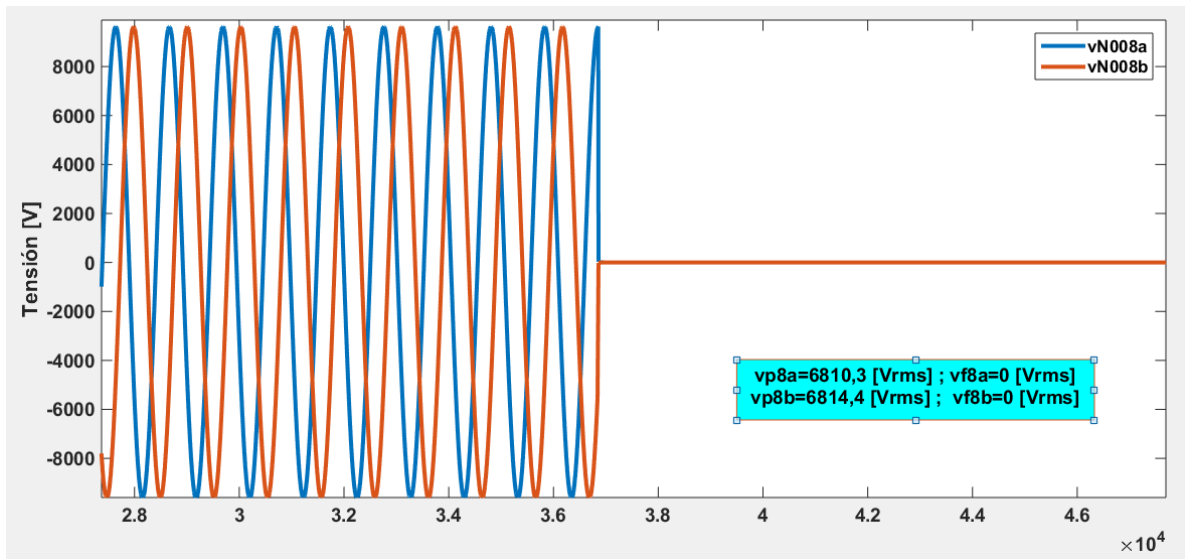
**Figura C47.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



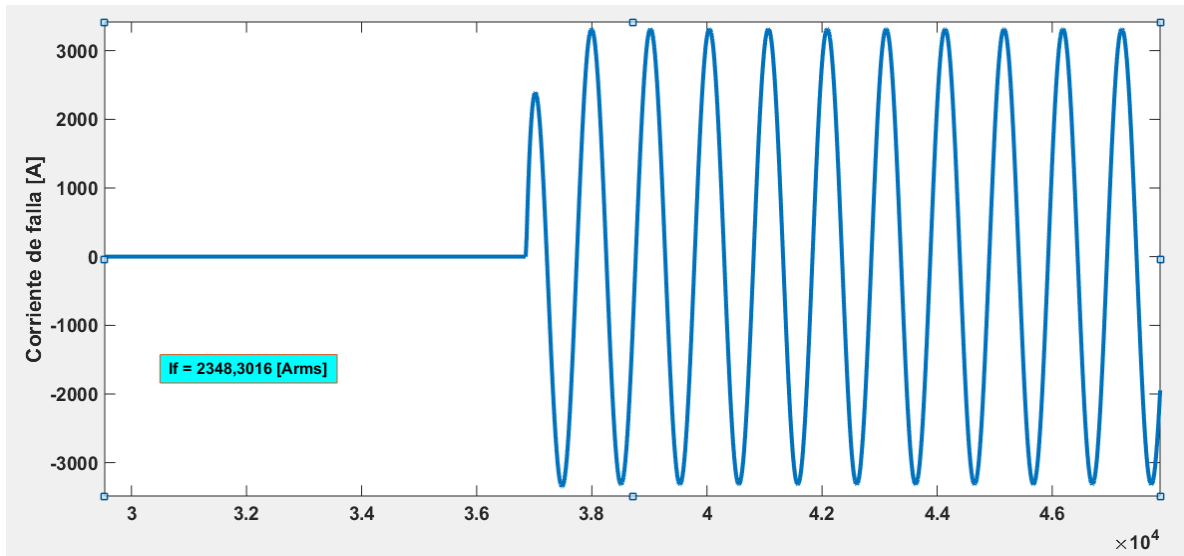
**Figura C48.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



**Figura C49.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica en el nodo 6



**Figura C50.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 6



**Tabla C16.** Resultados falla bifásica en el nodo 6

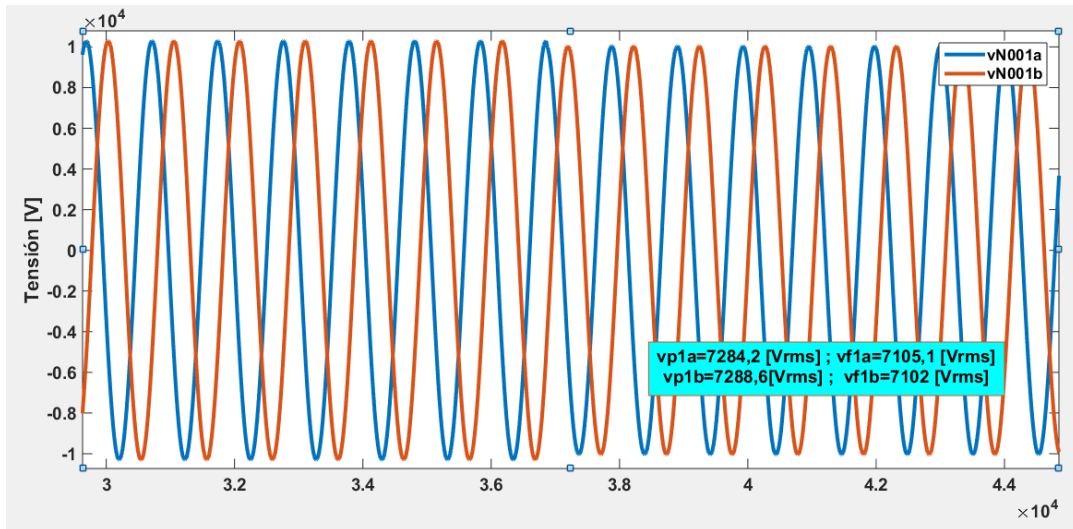
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>
A	7062,72395	1518,15826	0	3285,03199	606,7778814
B	7062,72395	1518,15826	0	3285,03199	606,7778814

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>85</sub>	I <sub>86</sub>	I <sub>87</sub>	I <sub>88</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>90</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>
A	2841,7	2227	2347,5	2238,9	1901,8	2254,5	13,4955152	5,13312034	15,056501	73,0859223
B	2843,4	2228,6	2348,9	2240,5	1902,9	2256,1	13,4437653	5,12154626	15,0680652	73,1050095
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							26,9392806	10,2546666	30,1245661	146,190932

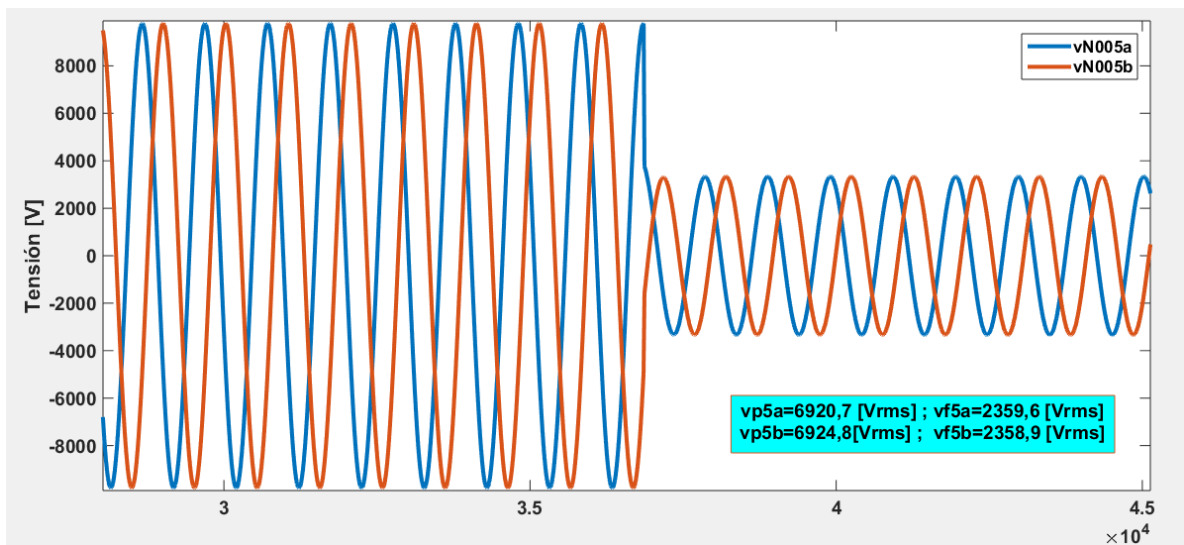
### C.4.3 Nodo eléctrico 7

#### Falla bifásica a tierra en el nodo

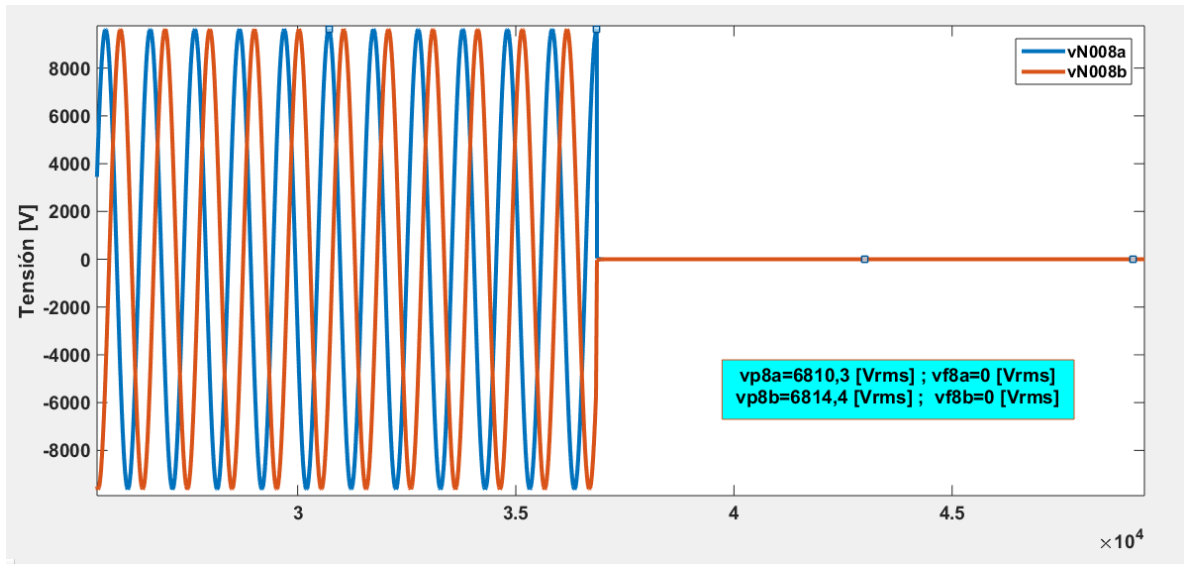
**Figura C51.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



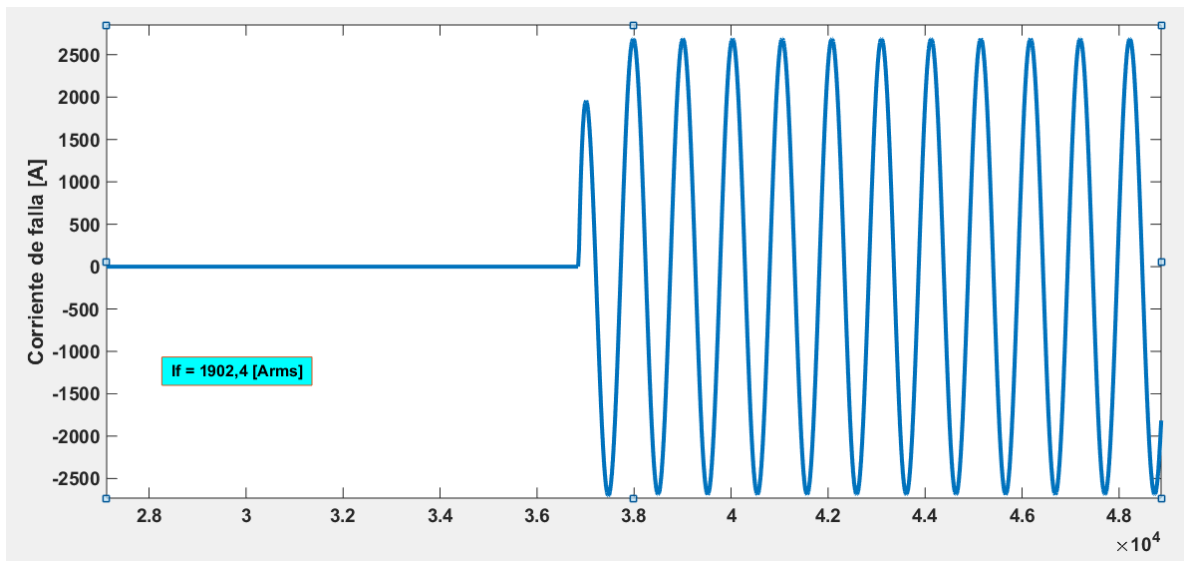
**Figura C52.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



**Figura C53.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 7



**Figura C54.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 7



**Tabla C17.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 7

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>
A	7104,30183	2359,61533	0	2811,12134	943,0916582
B	7104,30183	2359,61533	0	2811,12134	943,0916582

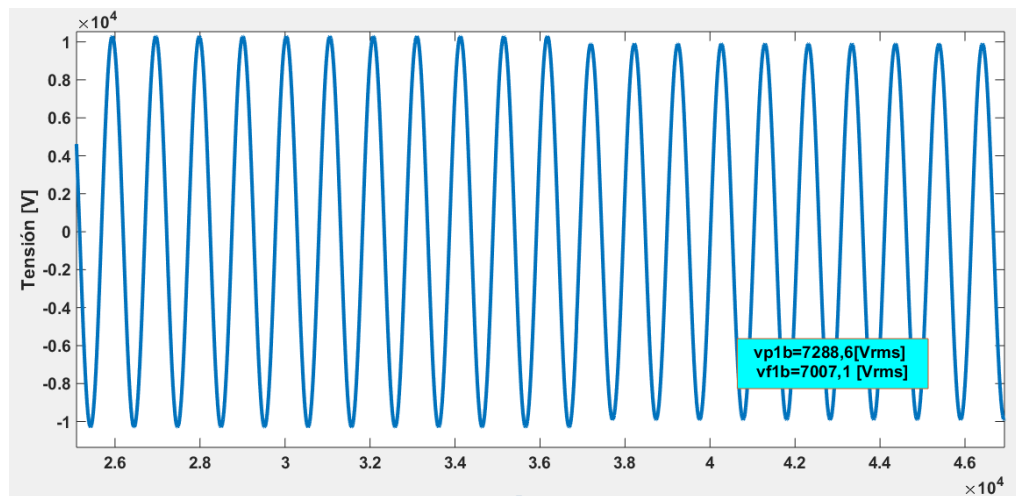
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>85</sub>	I <sub>56</sub>	I <sub>86</sub>	I <sub>57</sub>	I <sub>87</sub>	I <sub>58</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>
A	2841,7	1880	2347,5	1890	1901,8	1903,2	1,07606917	19,914803	0,62046482	50,4470545
B	2843,4	1882	2348,9	1892,1	1902,9	1905,2	1,1352134	19,8773894	0,56755478	50,4990732
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							2,21128257	39,7921924	1,18801961	100,946128

## C.5 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 5

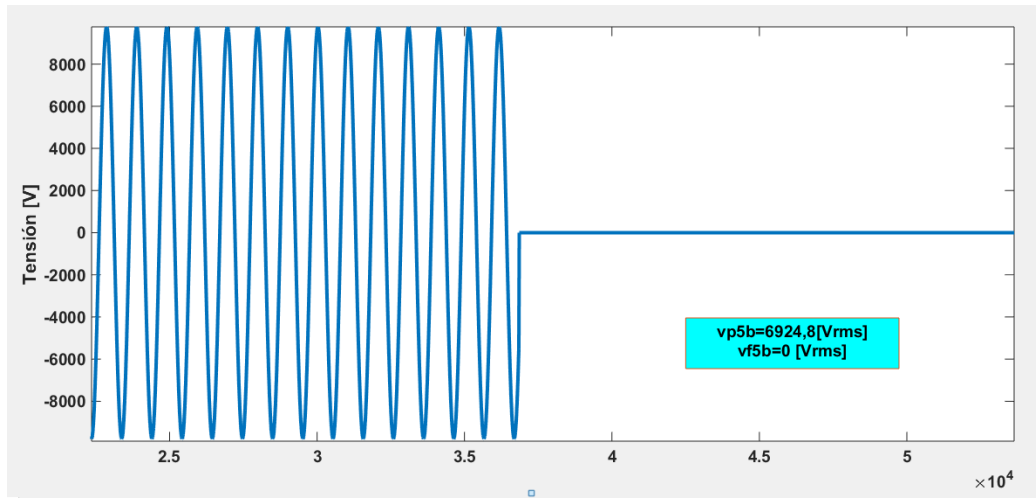
### C.5.1 Nodo eléctrico 5

#### Falla monofásica en el nodo 5

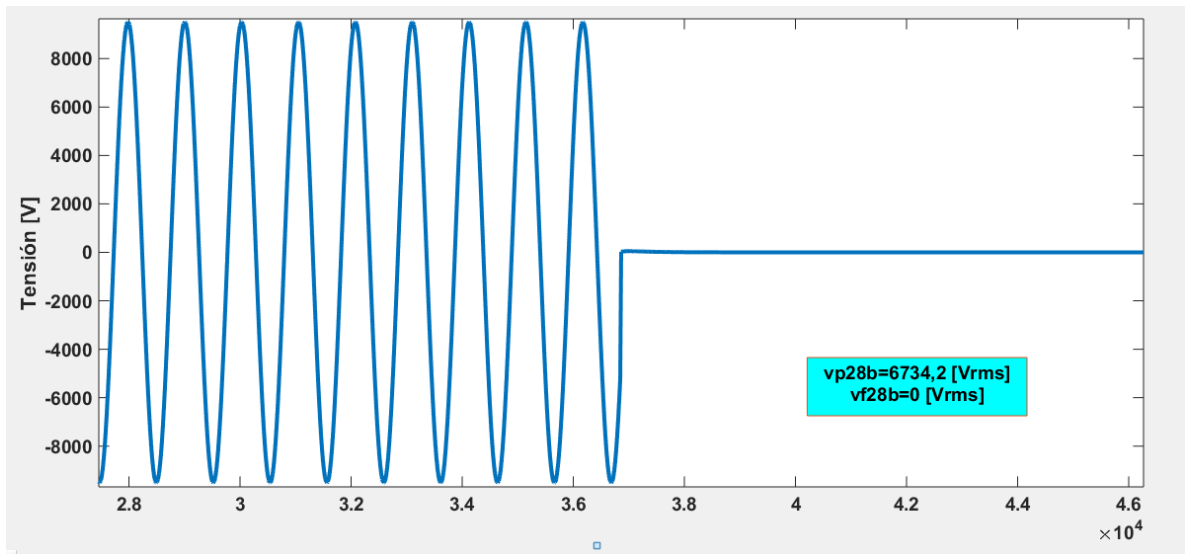
**Figura C55.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



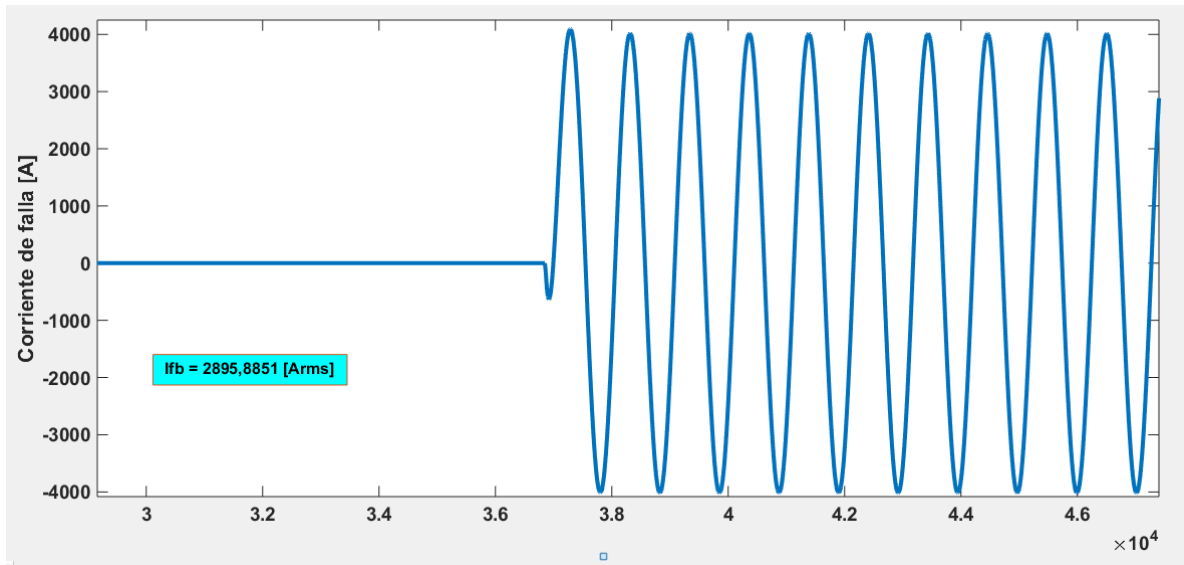
**Figura C56.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura C57.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es monofásica en el nodo 5



**Figura C58.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 5



**Tabla C18.** Resultados falla monofásica en el nodo 5

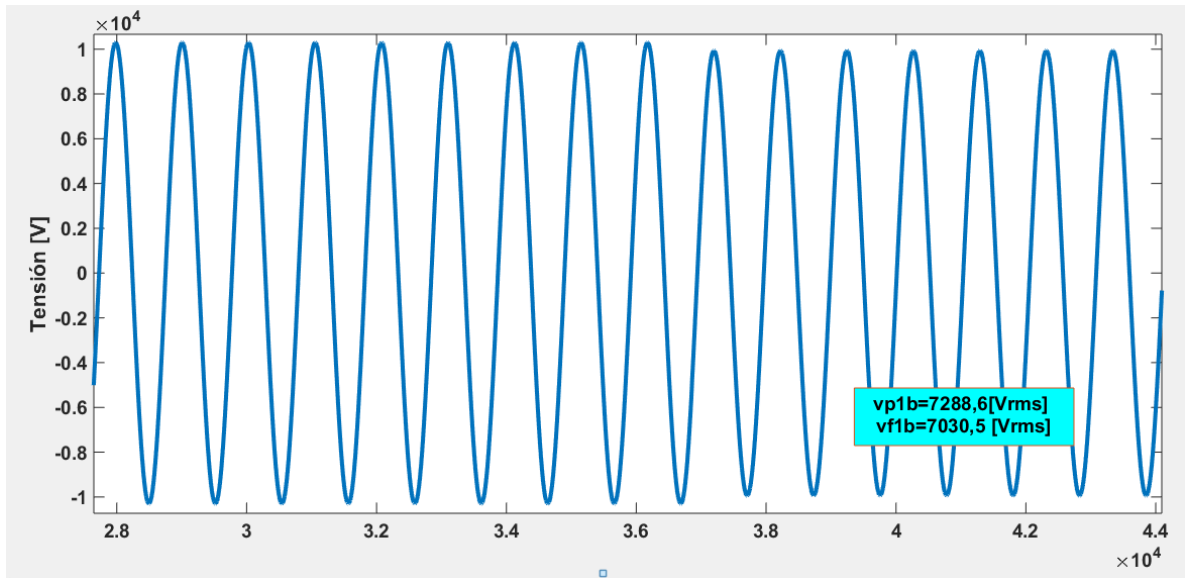
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_1$	$V_5$	$V_{28}$	$I_5$	$I_{28}$
B	7009,54952	0	0	4153,00236	0

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]							Deltas					
	$I_{285}$	$I_{525}$	$I_{2825}$	$I_{526}$	$I_{2826}$	$I_{527}$	$I_{2827}$	$I_{528}$	$\delta_5$	$\delta_{25}$	$\delta_{26}$	$\delta_{27}$	$\delta_{28}$
B	2843,5	2849,6	2606,6	2858	2333,8	2896	1597,5	2924	31,5314621	8,52751263	18,3414976	44,8377072	100

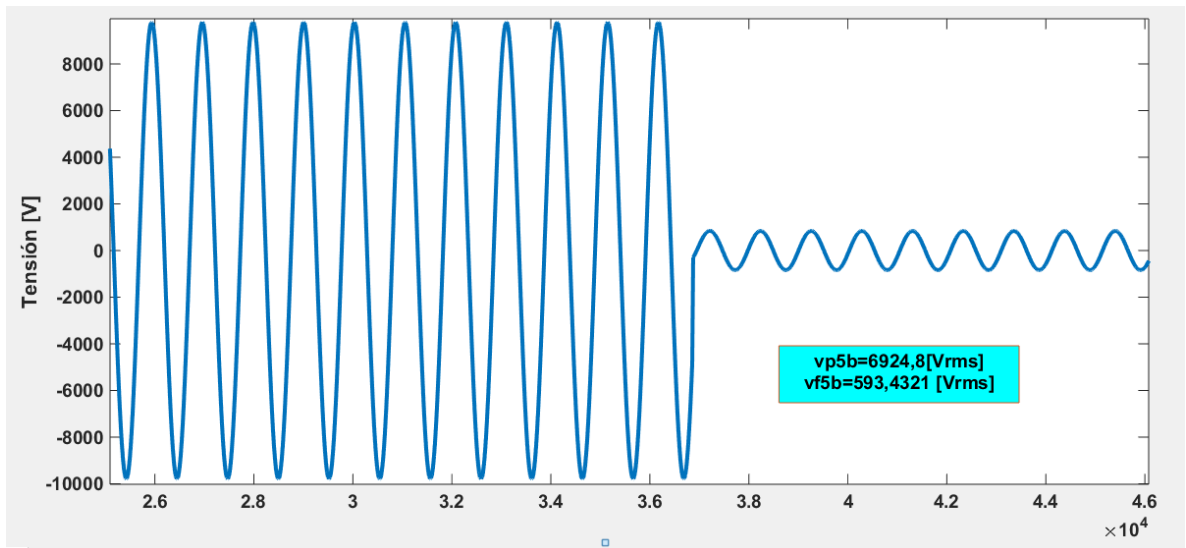
### C.5.2 Nodo eléctrico 25

#### Falla monofásica en el nodo 25

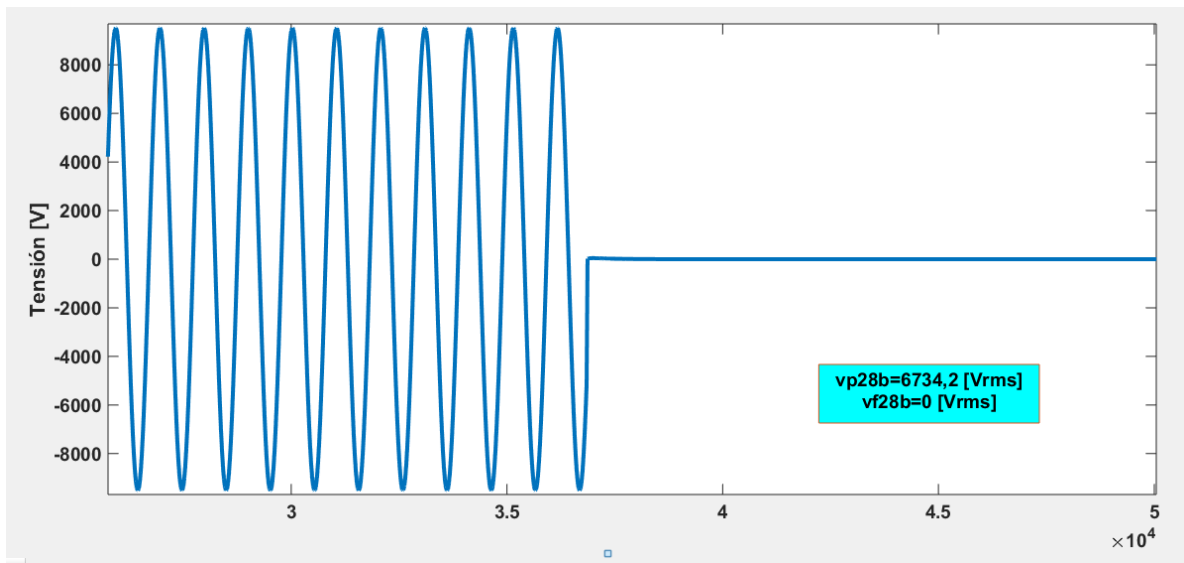
**Figura C59.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica en el nodo 25



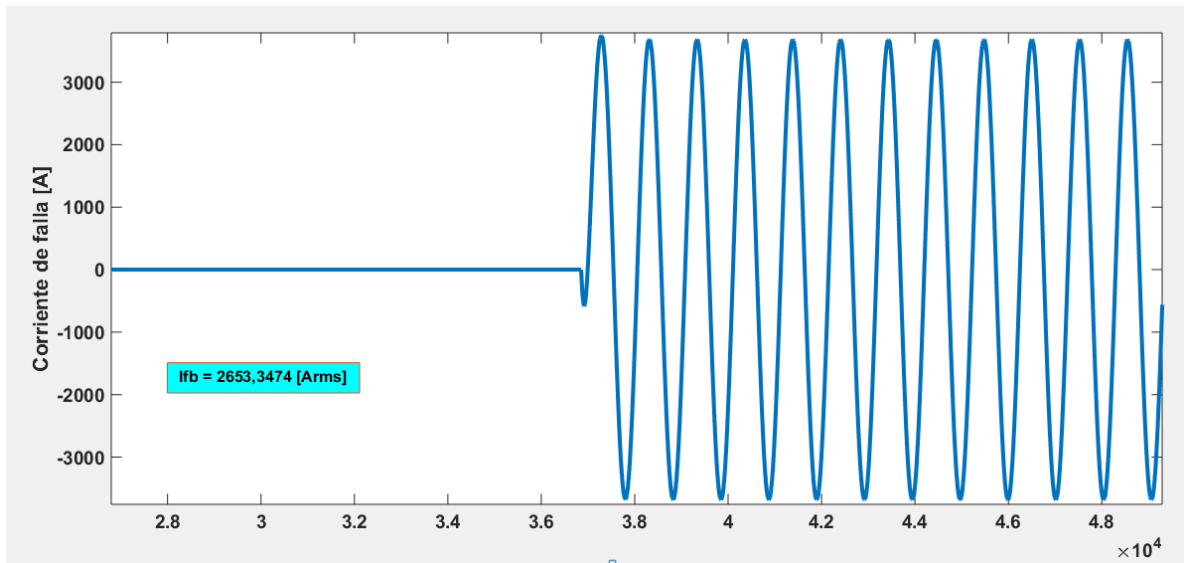
**Figura C60.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 25



**Figura C61.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es monofásica en el nodo 25



**Figura C62.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 25



**Tabla C19.** Resultados falla monofásica en el nodo 25

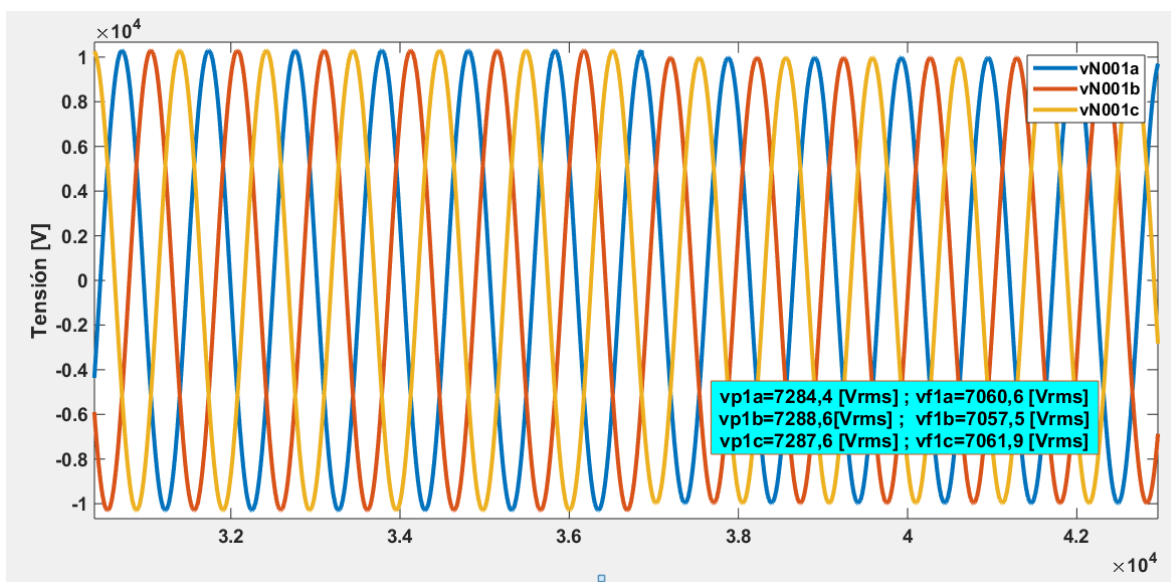
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>28</sub>
B	7032,17694	593,644427	0	3814,68747	197,1402284

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>285</sub>	I <sub>525</sub>	I <sub>2825</sub>	I <sub>526</sub>	I <sub>2826</sub>	I <sub>527</sub>	I <sub>2827</sub>	I <sub>528</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>25</sub>	δ <sub>26</sub>	δ <sub>27</sub>	δ <sub>28</sub>
B	2843,5	2605,4	2606,6	2613,1	2333,8	2647,8	1597,5	2673,4	25,4591622	0,04603698	10,6884543	39,6668933	92,6258611

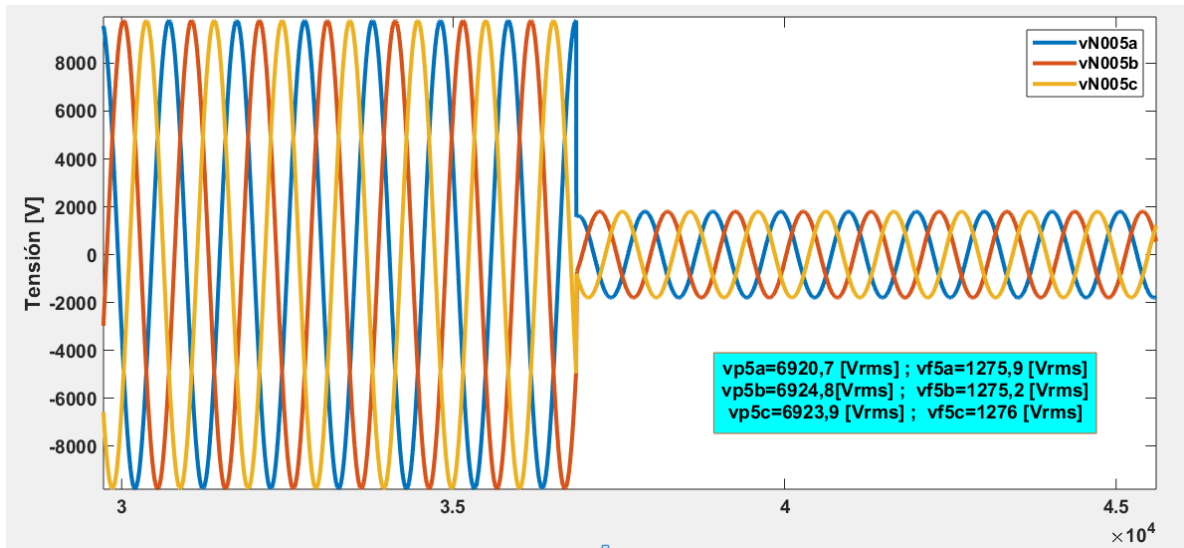
## C.5.2 Nodo eléctrico 26

### Falla trifásica en el nodo 26

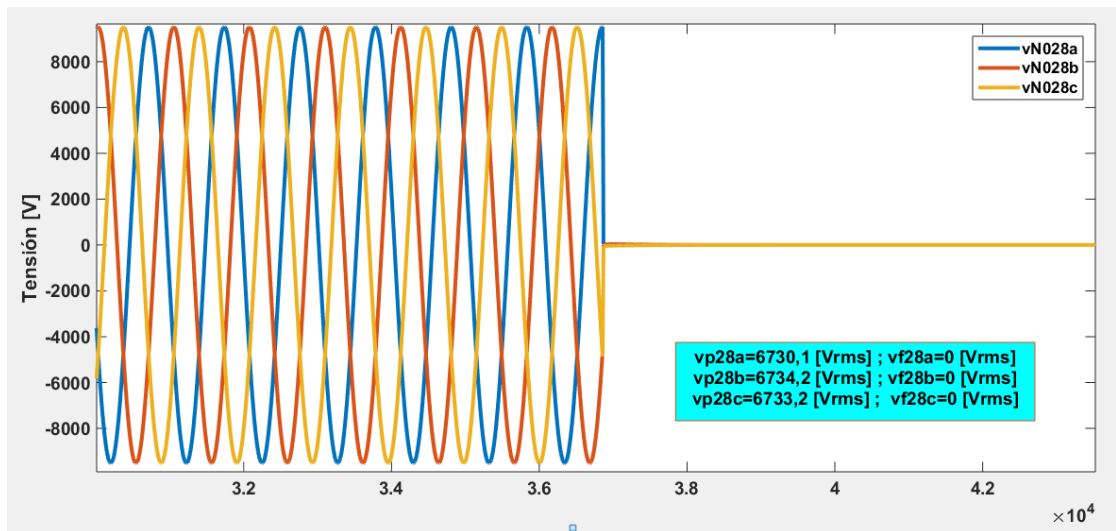
**Figura C63.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica en el nodo 26



**Figura C64.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica en el nodo 26



**Figura C65.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es trifásica en el nodo 26



**Figura C66.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 26

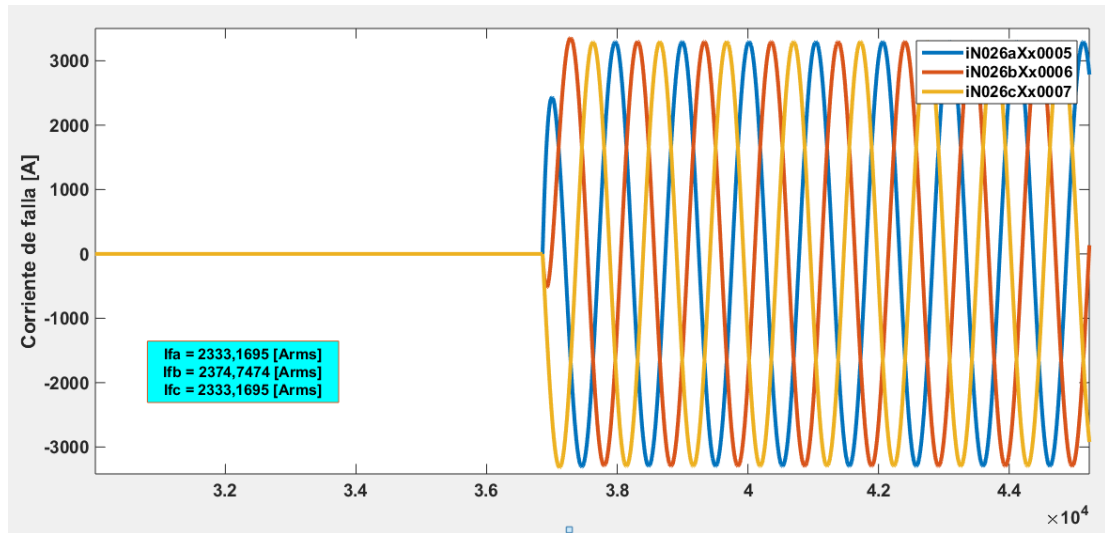


Tabla C19. Resultados falla trifásica en el nodo 26

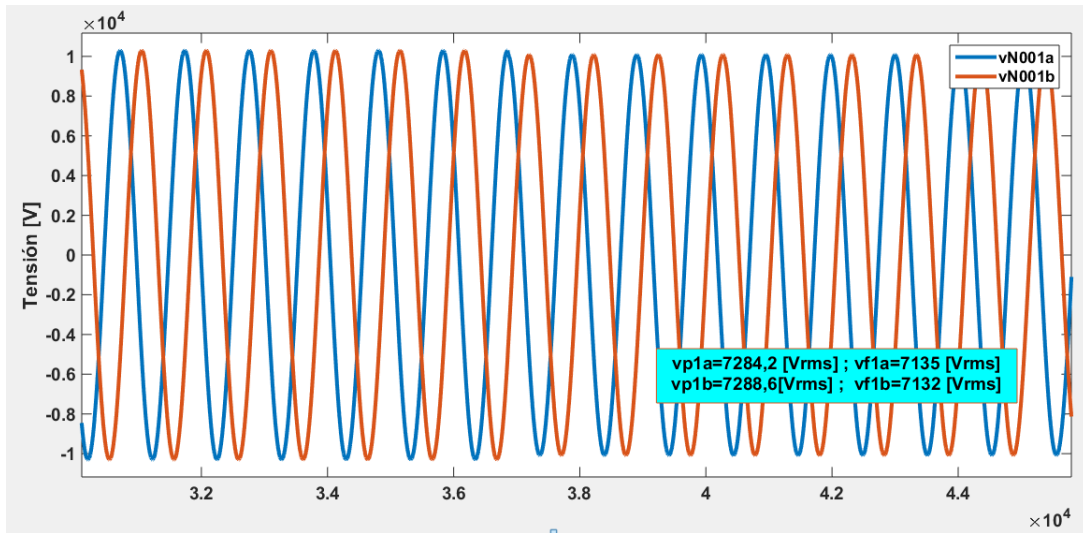
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_1$	$V_5$	$V_{28}$	$I_5$	$I_{28}$
A	7059,96624	1275,69134	0	3427,05437	423,6375707
B	7059,96624	1275,69134	0	3427,05437	423,6375707
C	7059,96624	1275,69134	0	3427,05437	423,6375707

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{285}$	$I_{525}$	$I_{2825}$	$I_{526}$	$I_{2826}$	$I_{527}$	$I_{2827}$	$I_{528}$	$\delta_5$	$\delta_{25}$	$\delta_{26}$	$\delta_{27}$	$\delta_{28}$
A	2841,8	2322,9	2605	2329,7	2332,4	2360,7	1596,5	2383,5	17,0774754	10,8291747	0,11576059	32,3717541	82,22624
B	2843,5	2324,9	2606,6	2331,7	2333,8	2362,7	1597,5	2385,6	17,0278701	10,8071818	0,089982	32,3866763	82,2418859
C	2843,1	2324,1	2606,2	2331	2333,5	2362	1597,3	2384,8	17,039542	10,8241885	0,1071352	32,3751058	82,2359288
Resultado suma deltas $\delta_i$									51,1448875	32,4605449	0,3128778	97,1335362	246,704055

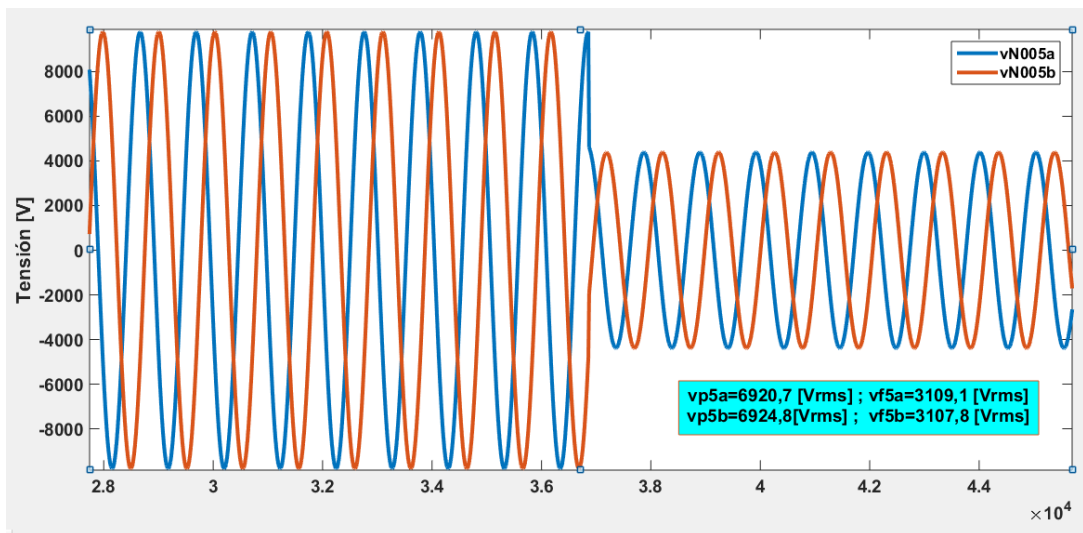
### C.5.3 Nodo eléctrico 27

#### Falla bifásica en el nodo

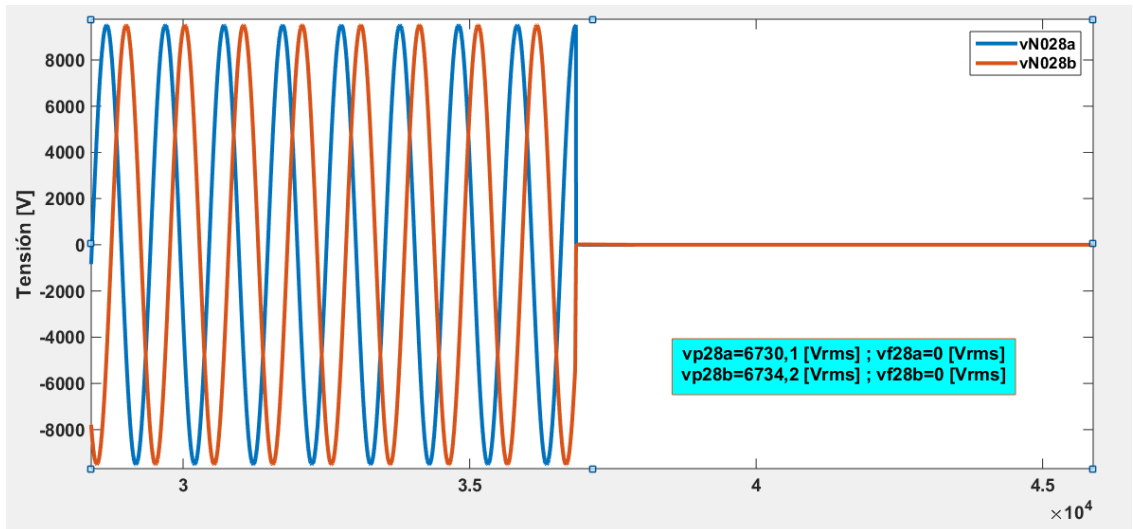
**Figura C67.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica en el nodo 27



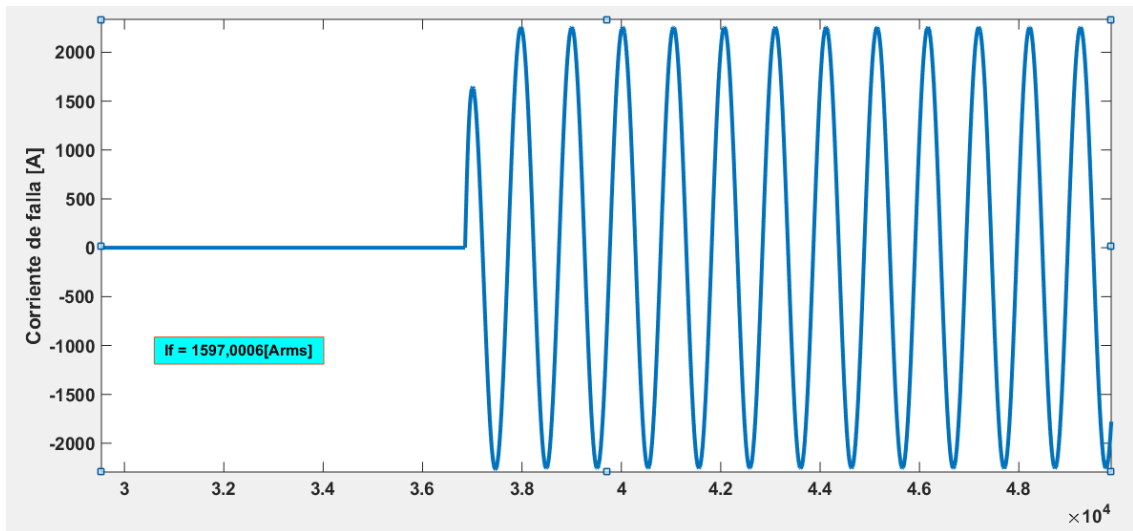
**Figura C68.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica en el nodo 27



**Figura C69.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica en el nodo 27



**Figura C70.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 27



**Tabla C20.** Resultados falla bifásica en el nodo 27

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>28</sub>
A	7134,70742	3108,86567	0	2385,2218	1032,406709
B	7134,70742	3108,86567	0	2385,2218	1032,406709

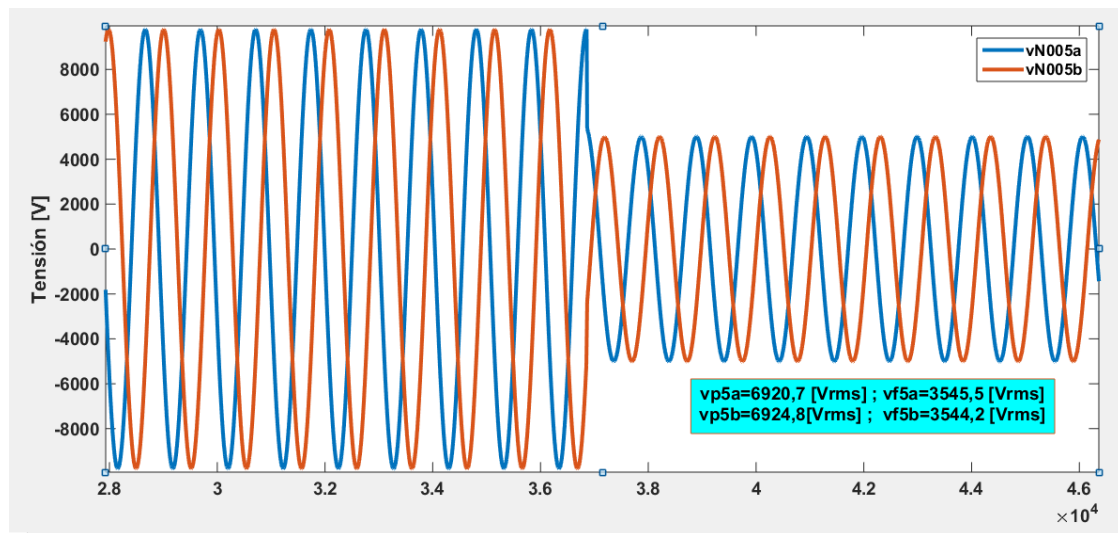
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>285</sub>	I <sub>525</sub>	I <sub>2825</sub>	I <sub>526</sub>	I <sub>2826</sub>	I <sub>527</sub>	I <sub>2827</sub>	I <sub>528</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>25</sub>	δ <sub>26</sub>	δ <sub>27</sub>	δ <sub>28</sub>
A	2841,8	1568,5	2605	1573,1	2332,4	1594	1596,5	1609,5	16,0665143	39,7888676	32,5544504	0,15659255	35,855439
B	2843,5	1570,7	2606,6	1575,3	2333,8	1596,3	1597,5	1611,7	16,1166944	39,7414256	32,5006427	0,07511737	35,9429975
Resultado suma deltas δ:									32,1832087	79,5302932	65,0550931	0,23170992	71,7984366

## C.6 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 6

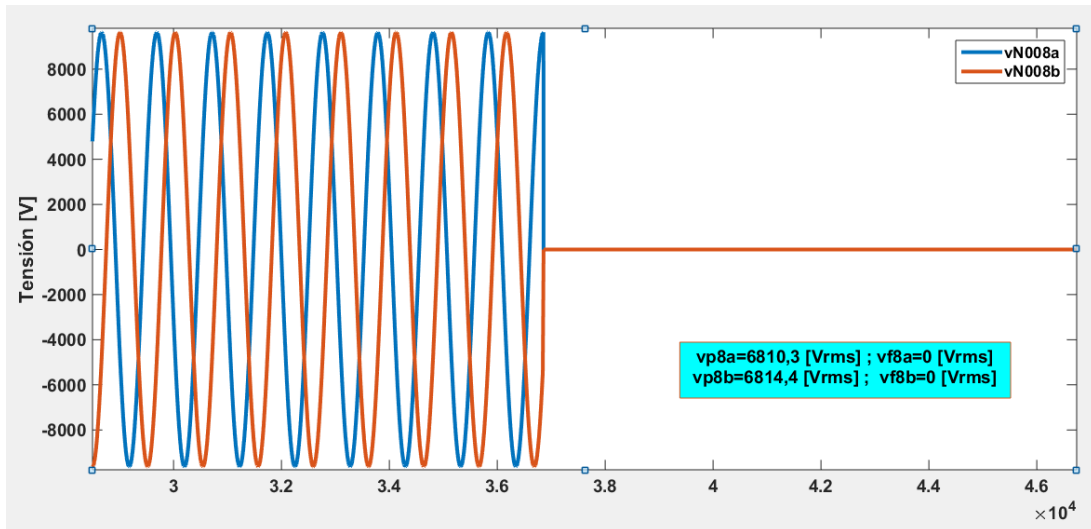
### C.6.1 Nodo eléctrico 8

#### Falla bifásica a tierra en el nodo 8

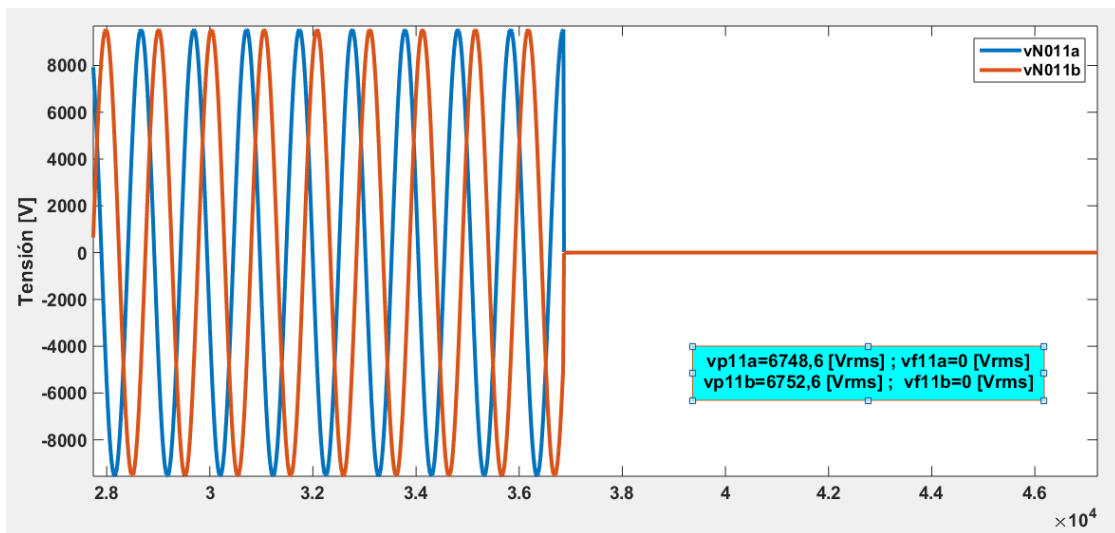
**Figura C71.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



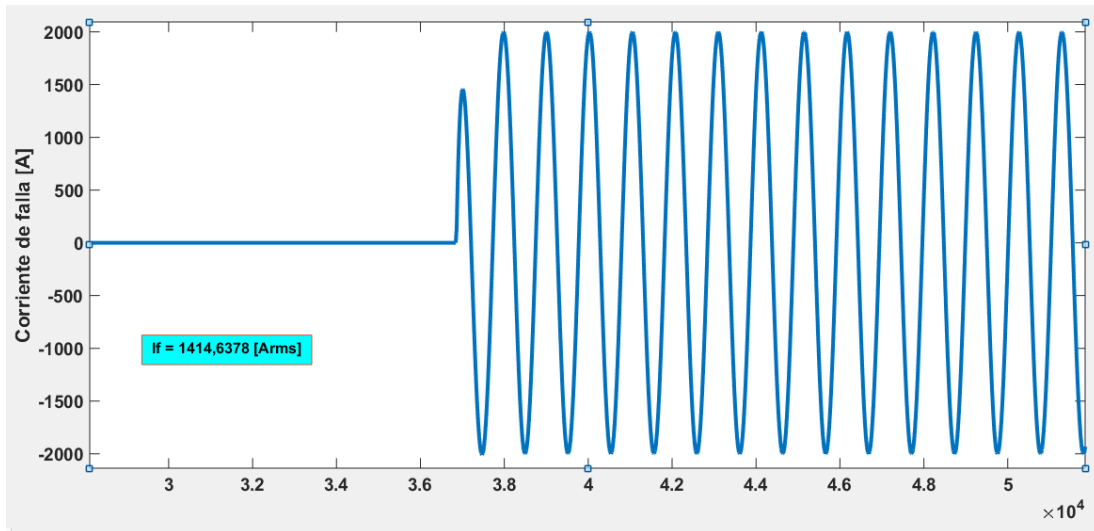
**Figura C72.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



**Figura C73.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 8



**Figura C74.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 8



**Tabla C21.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 8

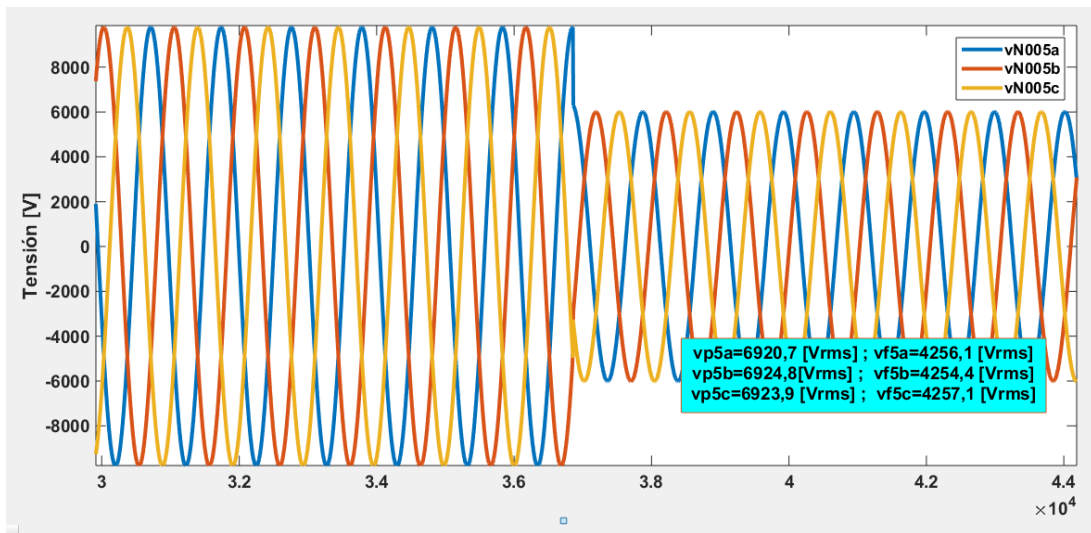
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
A	3545,36269	0	0	1417,01147	0
B	3545,36269	0	0	1417,01147	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
A	1414,2	1423,4	1123	1424,7	1088,3	1427,1	0,1984082	21,1043979	23,6119885	100
B	1415	1424,2	1123,7	1425,6	1089	1428	0,14195135	21,0995647	23,6111111	100
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							0,34035955	42,2039626	47,2230996	200

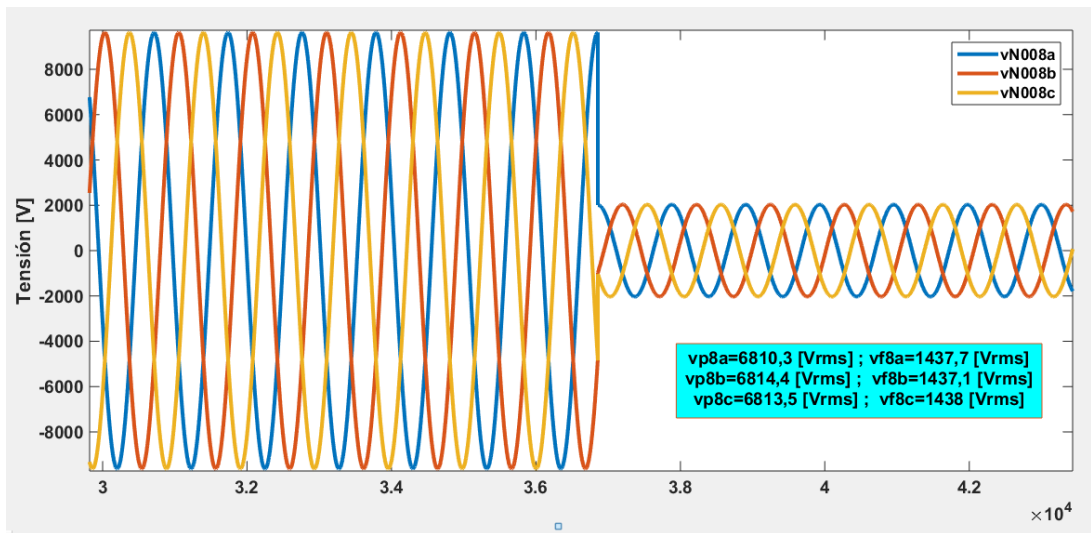
## C.6.2 Nodo eléctrico 9

### Falla trifásica en el nodo 9

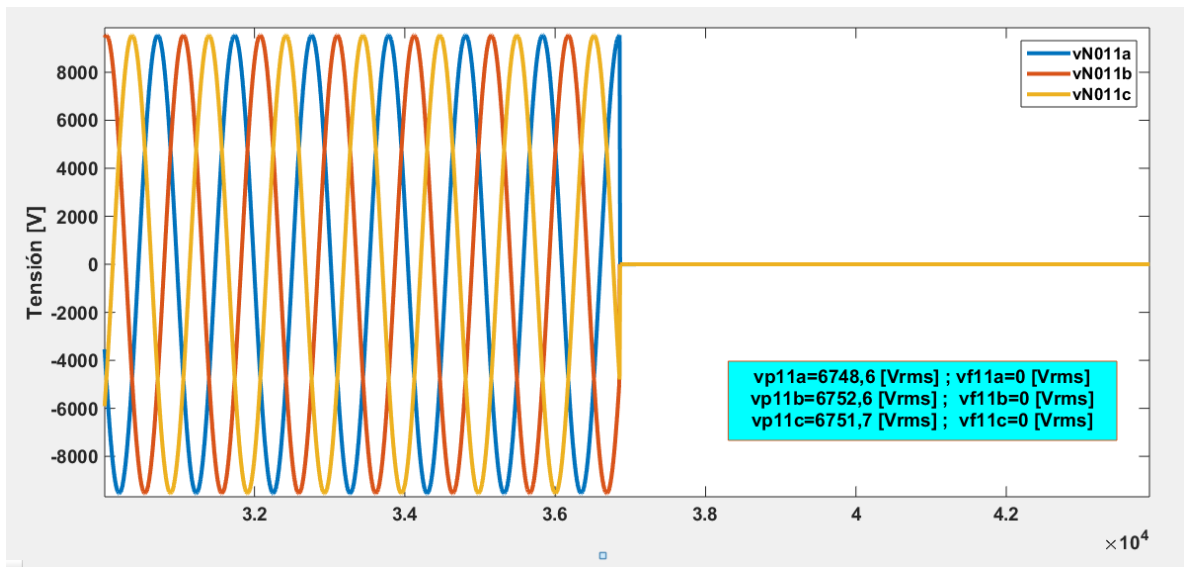
**Figura C75.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



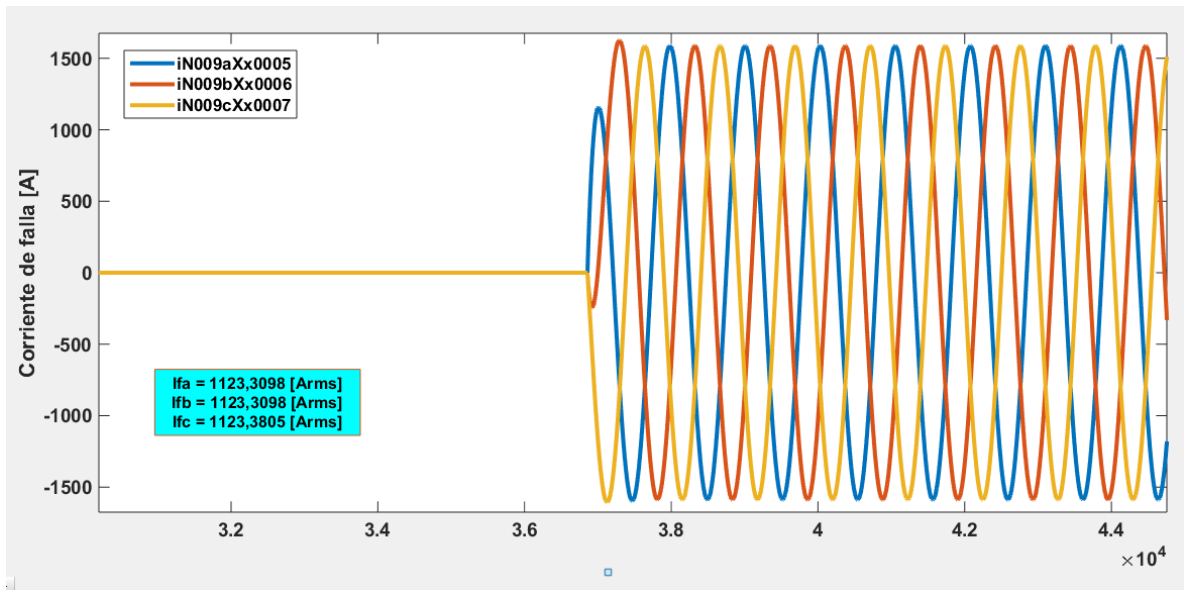
**Figura C76.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



**Figura C77.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es trifásica en el nodo 9



**Figura C78.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 9



**Tabla C22.** Resultados falla trifásica en el nodo 9

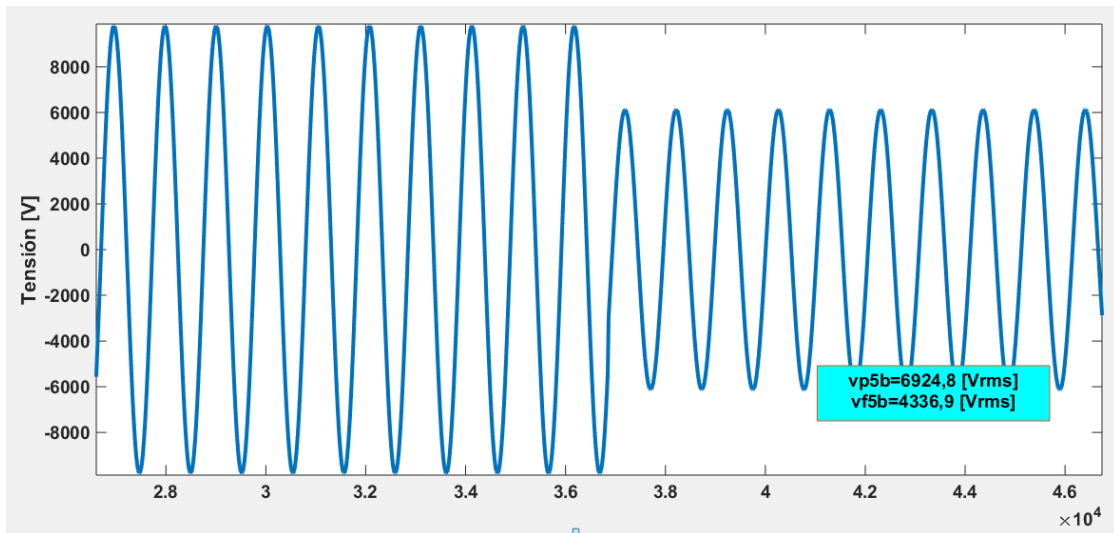
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
A	4255,86358	1437,54809	0	1126,42506	771,6170815
B	4255,86358	1437,54809	0	1126,42506	771,6170815
C	4255,86358	1437,54809	0	1126,42506	771,6170815

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
A	1414,2	1122,9	1123	1124	1088,3	1125,8	20,3489564	0,00890472	3,17615658	31,4605541
B	1415	1123,9	1123,7	1124,9	1089	1126,8	20,3939888	0,01779518	3,19139479	31,5213808
C	1414,8	1123,5	1123,5	1124,6	1088,8	1126,5	20,3827354	0	3,18335408	31,5031441
Resultado suma deltas δ <sub>i</sub>							61,1256806	0,0266999	9,55090546	94,485079

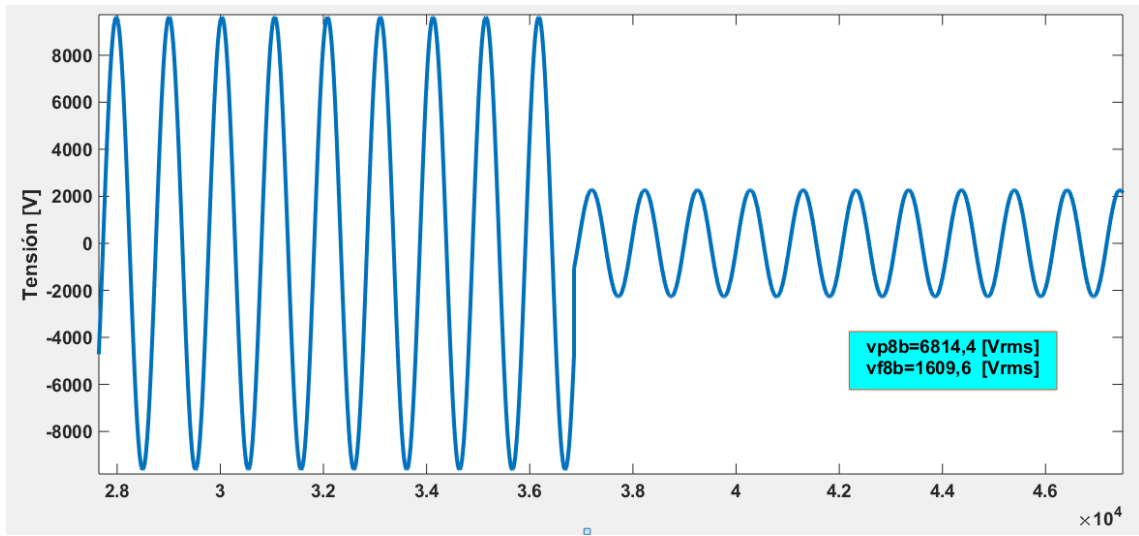
### C.6.3 Nodo eléctrico 10

#### Falla monofásica en el nodo 10

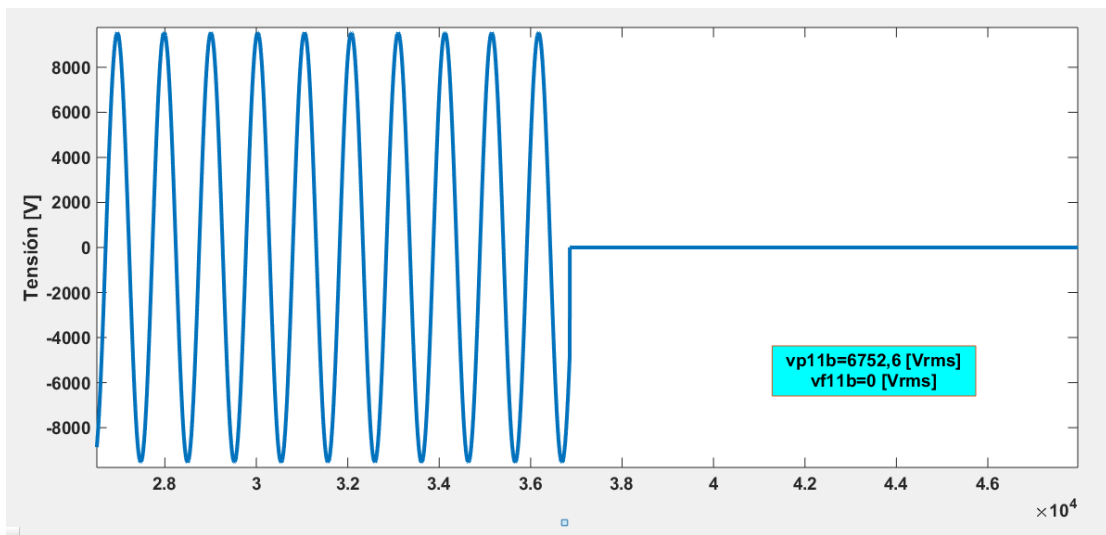
**Figura C79.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



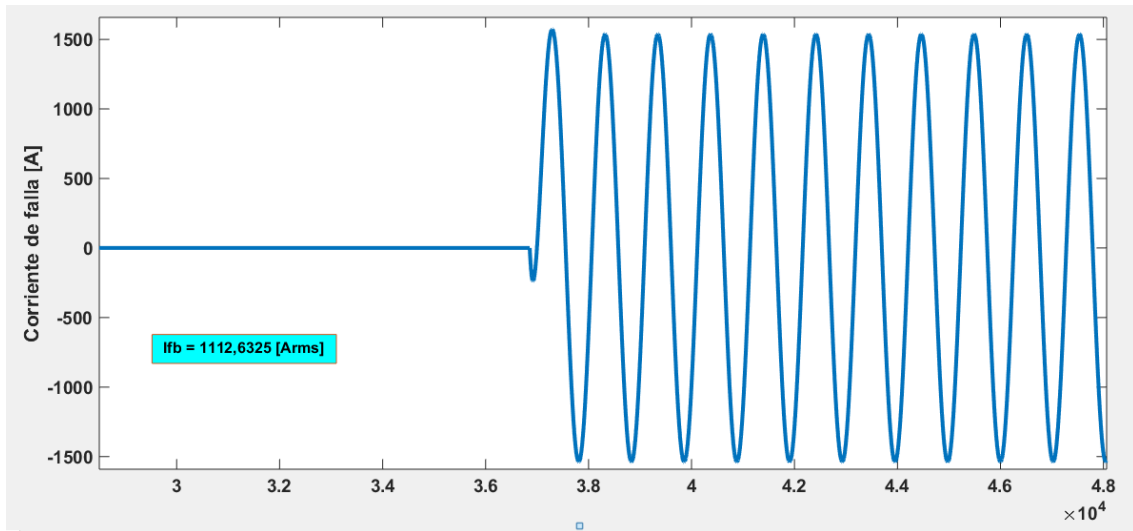
**Figura C80.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



**Figura C81.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es monofásica en el nodo 10



**Figura C82.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 10



**Tabla C23.** Resultados falla monofásica en el nodo 10

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_5$	$V_8$	$V_{11}$	$I_8$	$I_{11}$
B	4338,38295	1610,15285	0	1090,4197	864,2642677

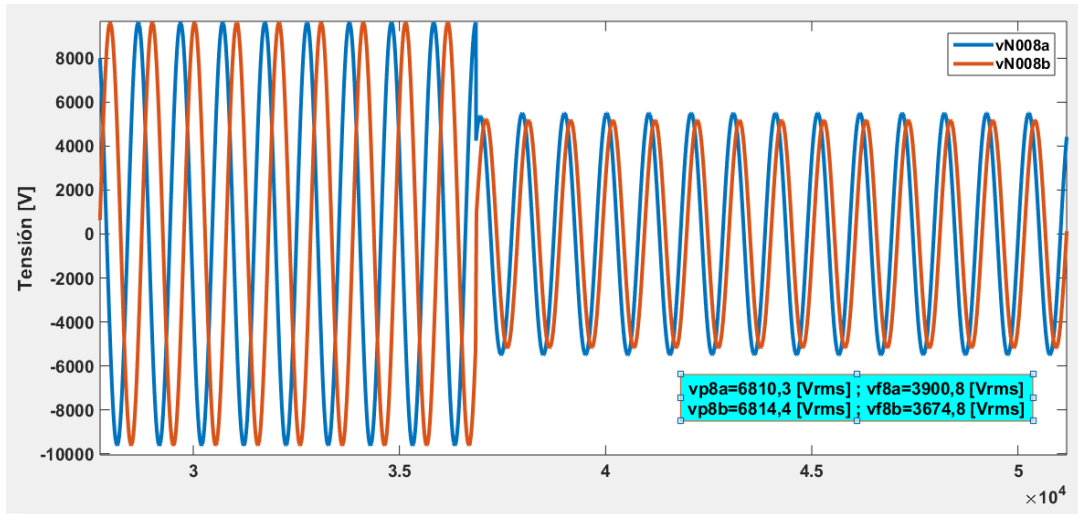
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	$I_{118}$	$I_{89}$	$I_{119}$	$I_{810}$	$I_{1110}$	$I_{811}$	$\delta_8$	$\delta_9$	$\delta_{10}$	$\delta_{11}$
B	1415	1087,8	1123,7	1088,8	1089	1090,7	22,938537	3,19480288	0,01836547	20,7605879

## C.7 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 7

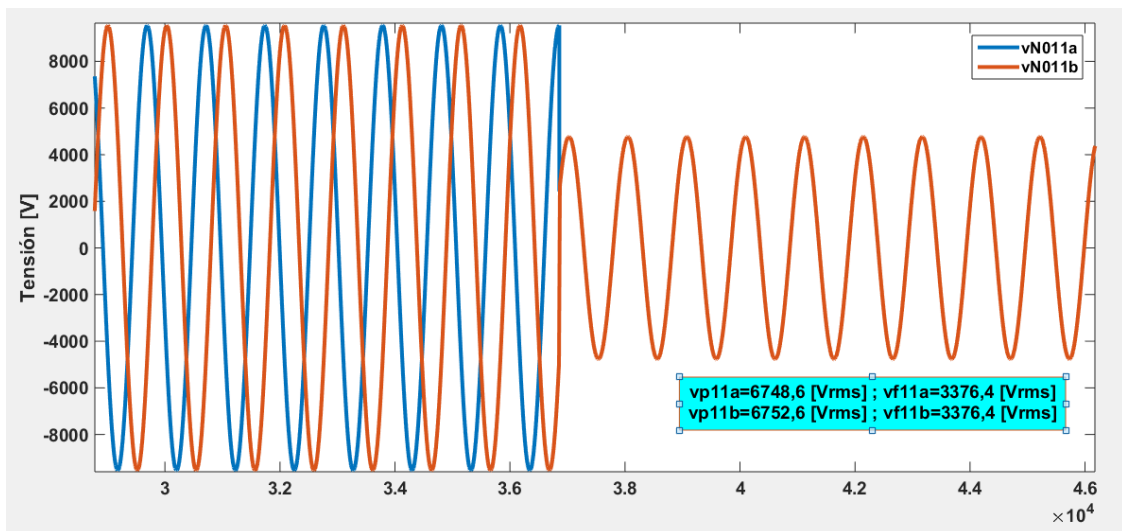
### C.7.1 Nodo eléctrico 11

#### Falla bifásica en el nodo 11

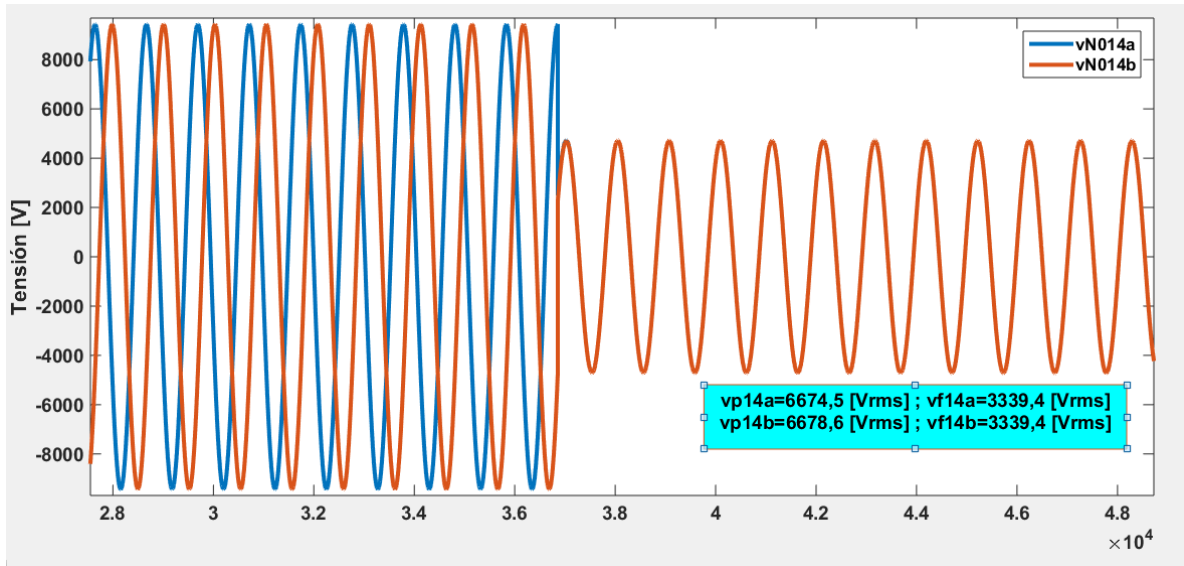
**Figura C83.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica en el nodo 11



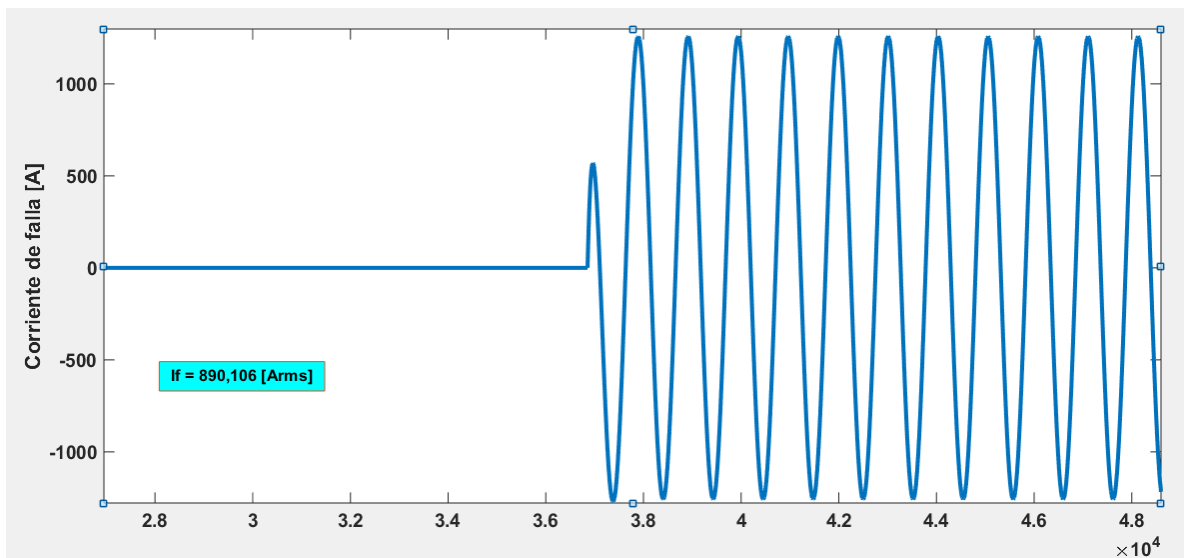
**Figura C84.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica en el nodo 11



**Figura C85.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica en el nodo 11



**Figura C86.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 11



**Tabla C24.** Resultados falla bifásica en el nodo 11

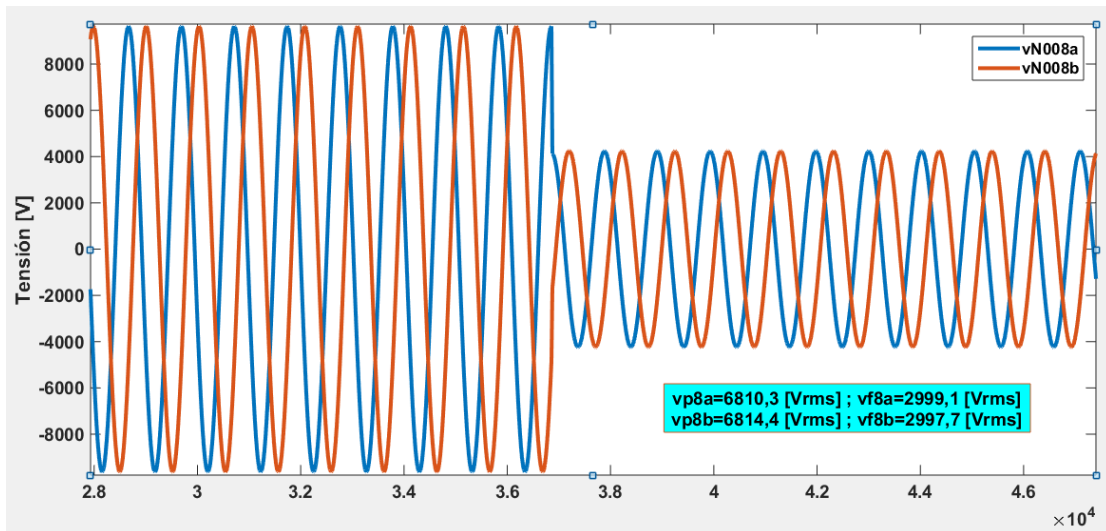
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>14</sub>
A	39254,6794	3375,51564	3338,46325	19258,4693	10,48259107
B	3674,97536	3375,51564	3338,46325	160,737744	10,48259107

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1411</sub>	I <sub>1112</sub>	I <sub>1412</sub>	I <sub>1113</sub>	I <sub>1413</sub>	I <sub>1114</sub>	δ <sub>11</sub>	δ <sub>12</sub>	δ <sub>13</sub>	δ <sub>14</sub>
A	513,4036	516,9421	402,0511	518,2686	365,4385	519,0958	97,3341412	22,2251196	29,4885895	97,9806057
B	514,0215	517,5651	402,535	518,8932	365,8784	519,7214	68,7293733	22,2252428	29,4886886	97,9830365
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							166,063515	44,4503624	58,9772781	195,963642

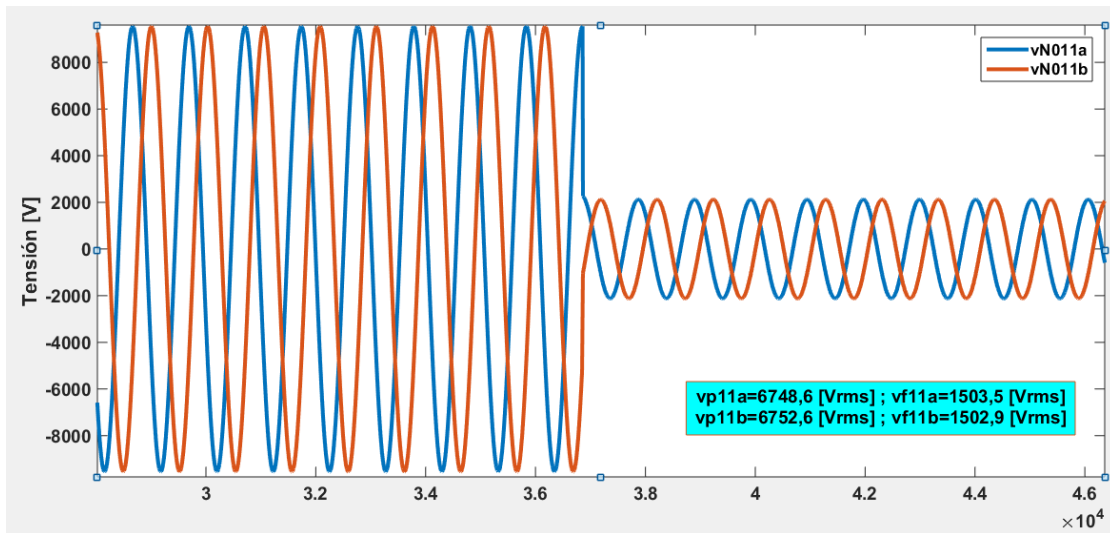
## C.7.2 Nodo eléctrico 12

### Falla bifásica a tierra en el nodo 12

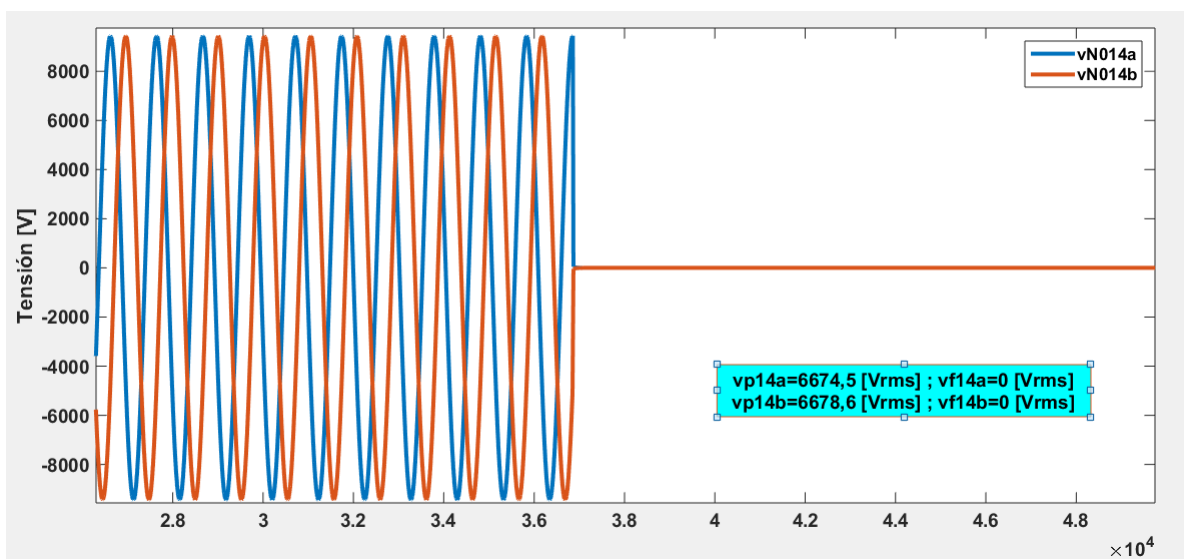
**Figura C87.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 12



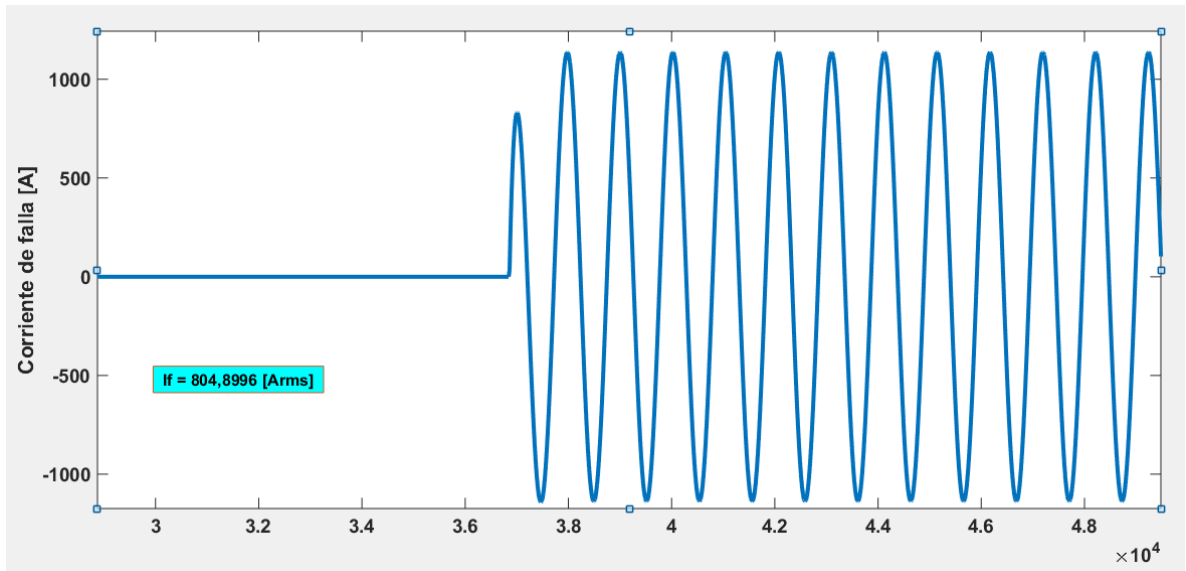
**Figura C88.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 12



**Figura C89.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 12



**Figura C90.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 12



**Tabla C25.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 12

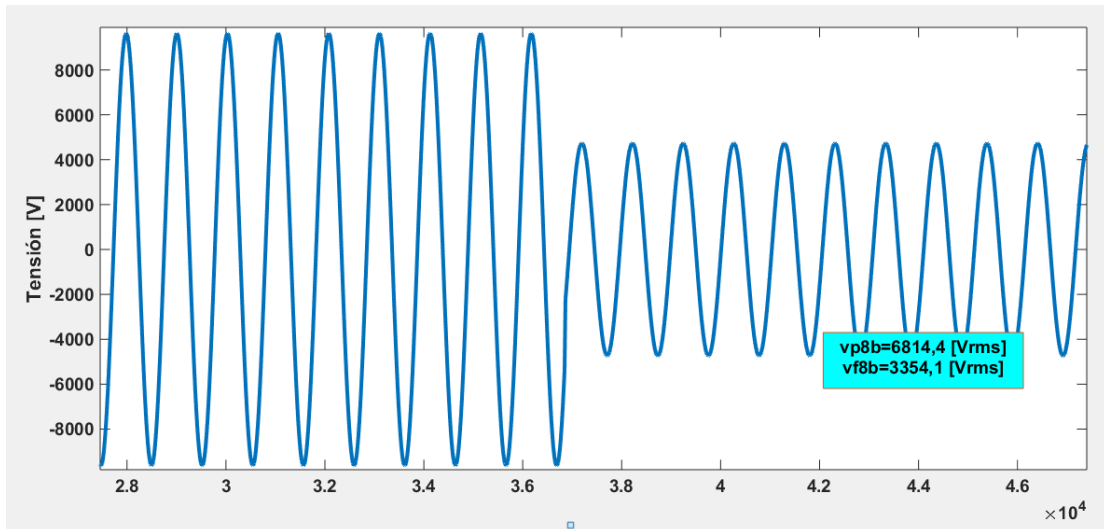
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>14</sub>
A	2998,76915	1503,45044	0	802,625992	425,3451359
B	2998,76915	1503,45044	0	802,625992	425,3451359

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1411</sub>	I <sub>1112</sub>	I <sub>1412</sub>	I <sub>1113</sub>	I <sub>1413</sub>	I <sub>1114</sub>	δ <sub>11</sub>	δ <sub>12</sub>	δ <sub>13</sub>	δ <sub>14</sub>
A	1027,4	804,048	804,6031	806,1113	731,3323	807,3978	21,8779451	0,06899054	9,27651058	47,3190123
B	1028,1	804,7581	805,0869	806,8232	731,772	808,108	21,9311359	0,04084031	9,30206271	47,3653106
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							43,8090809	0,10983085	18,5785733	94,6843229

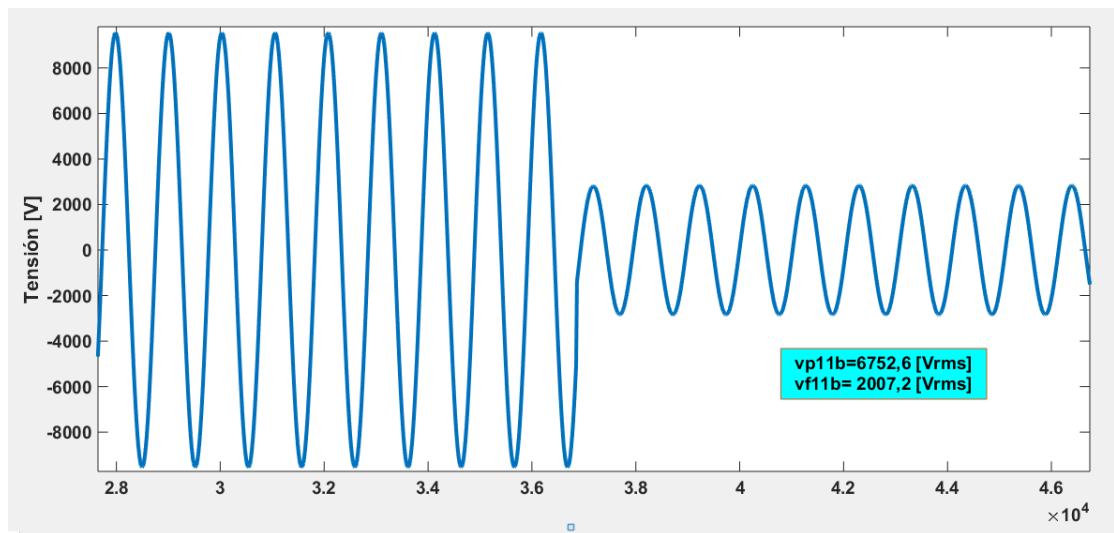
### C.7.3 Nodo eléctrico 13

#### Falla monofásica en el nodo 13

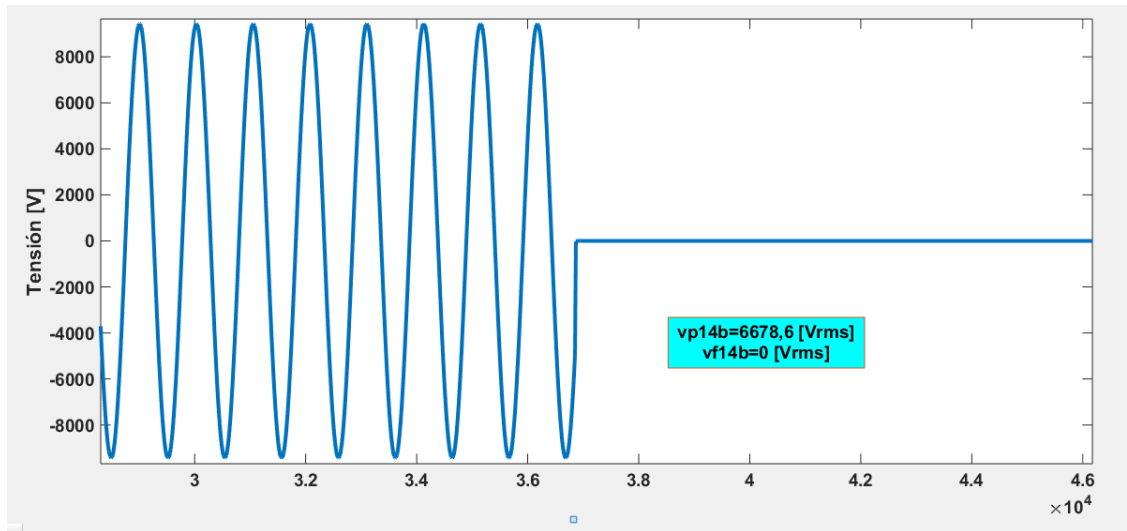
**Figura C91.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es monofásica en el nodo 13



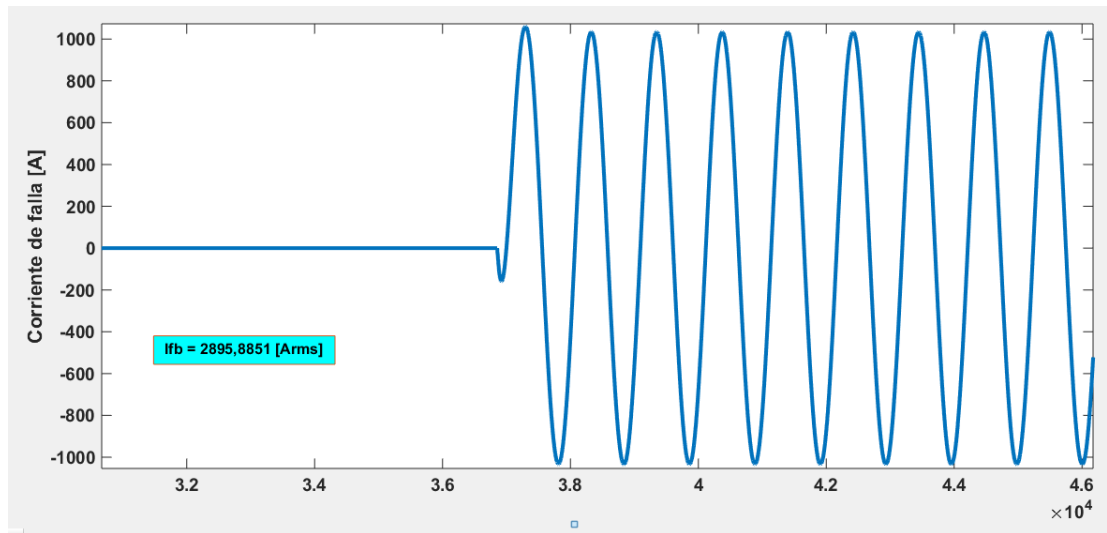
**Figura C92.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es monofásica en el nodo 13



**Figura C93.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es monofásica en el nodo 13



**Figura C94.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 13



**Tabla C26.** Resultados falla monofásica en el nodo 13

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>14</sub>
B	3355,22168	2007,82971	0	723,224962	568,040407

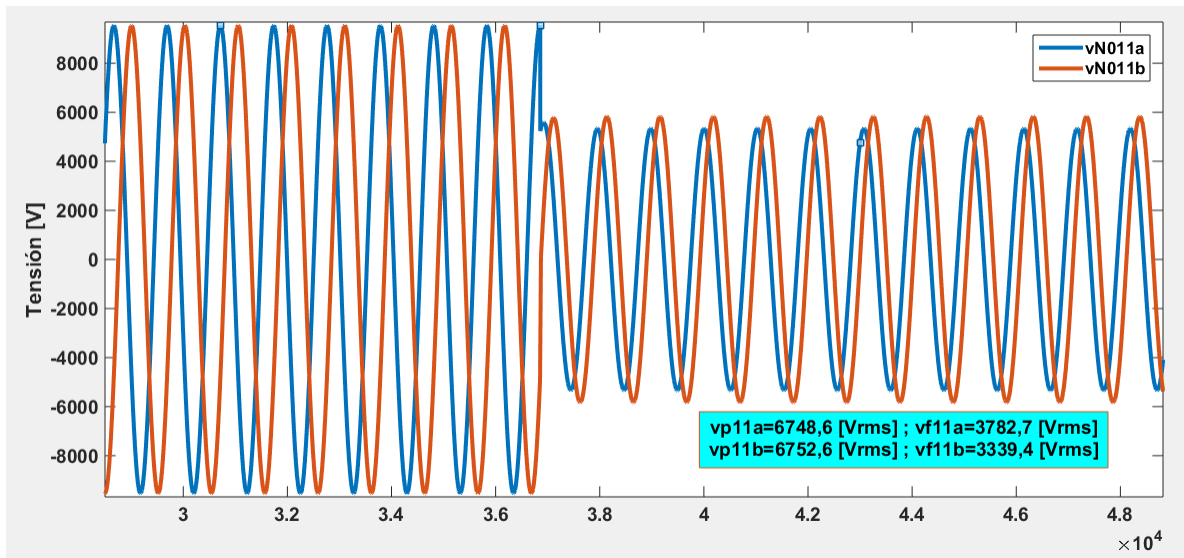
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1411</sub>	I <sub>1112</sub>	I <sub>1412</sub>	I <sub>1113</sub>	I <sub>1413</sub>	I <sub>1114</sub>	δ <sub>11</sub>	δ <sub>12</sub>	δ <sub>13</sub>	δ <sub>14</sub>
B	1028,1	727,4567	805,087	729,3235	731,7721	730,4875	29,6542202	9,64247342	0,33461237	22,2381756

## C.8 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 8

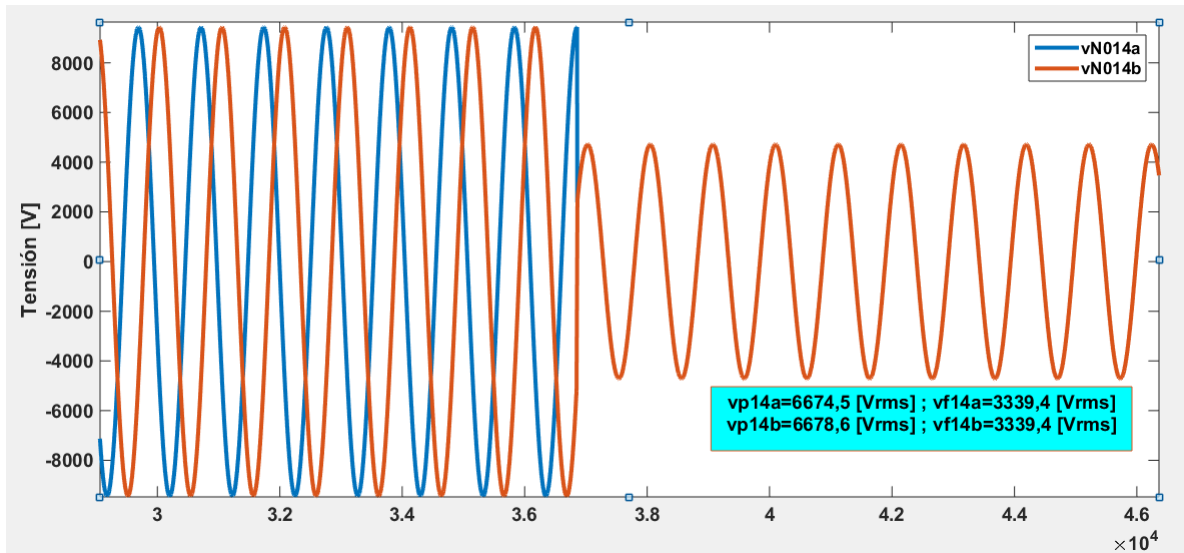
### C.8.1 Nodo eléctrico 14

#### Falla bifásica en el nodo 14

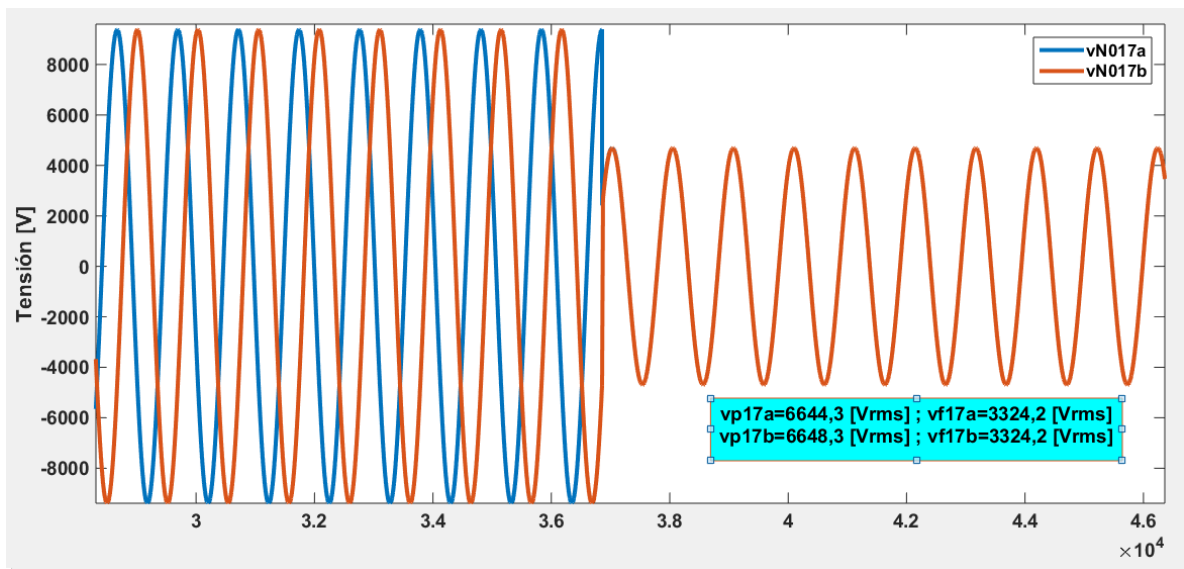
**Figura C95.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica en el nodo 14



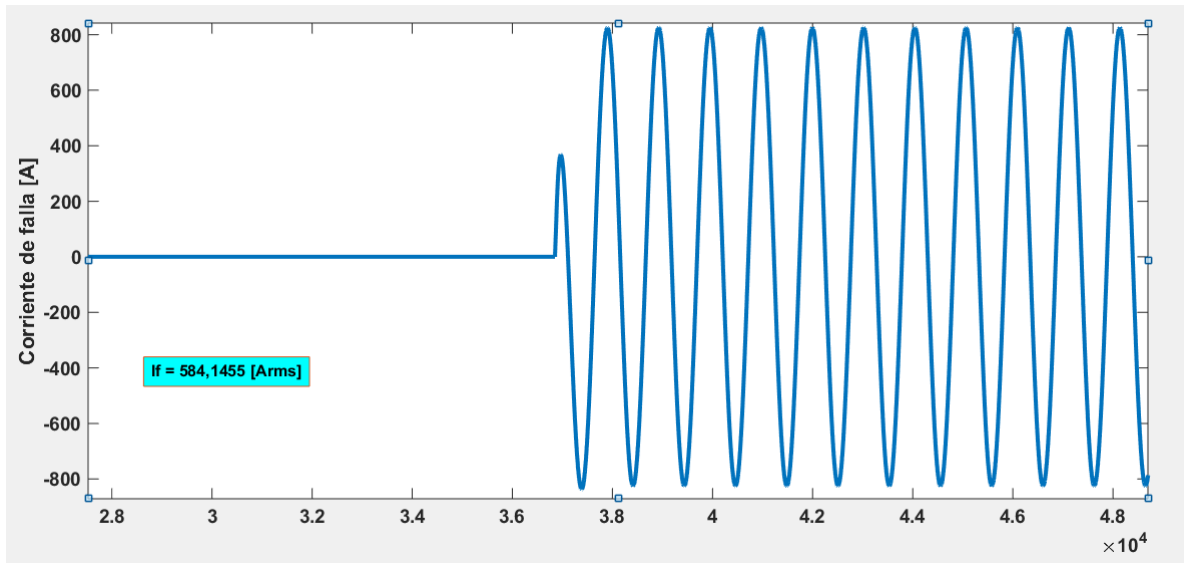
**Figura C96.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica en el nodo 14



**Figura C97.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es bifásica en el nodo 14



**Figura C98.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 14



**Tabla C27.** Resultados falla bifásica en el nodo 14

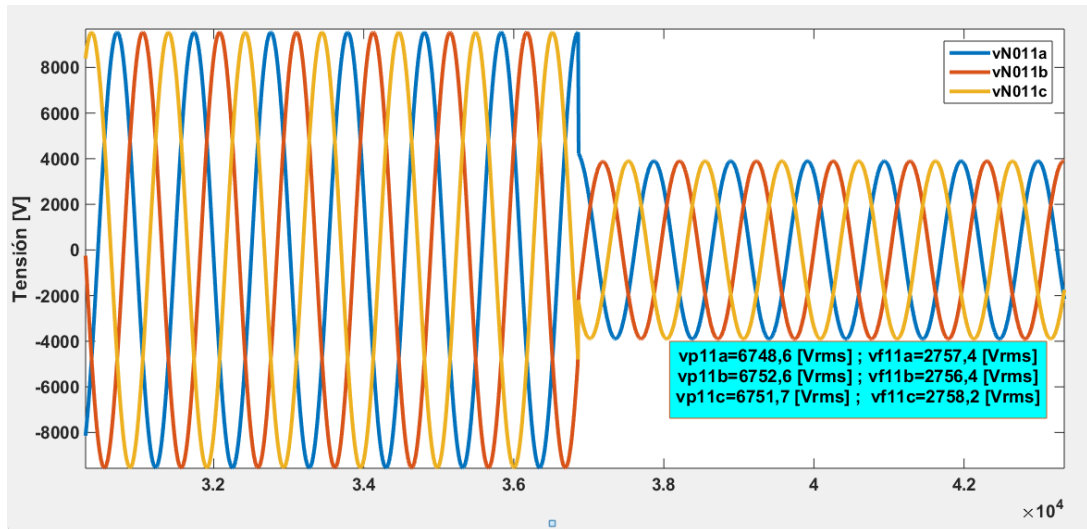
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	V11	V14	V17	I14	I17
A	3781,39493	3338,46325	3323,33116	125,310974	3,816135798
B	4127,31157	3338,46325	3323,33116	223,175164	3,816135798

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	I1714	I1415	I1715	I1416	I1716	I1417	$\delta_{14}$	$\delta_{15}$	$\delta_{16}$	$\delta_{17}$
A	336,9279	337,4498	308,5989	338,2296	259,3125	338,4615	62,8077775	8,5496865	23,332405	98,8725052
B	337,3323	337,856	308,9693	338,6367	259,6238	338,8689	33,8411519	8,55000355	23,3326453	98,8738607
Resultado suma deltas $\delta_t$							96,6489294	17,0996901	46,6650503	197,746366

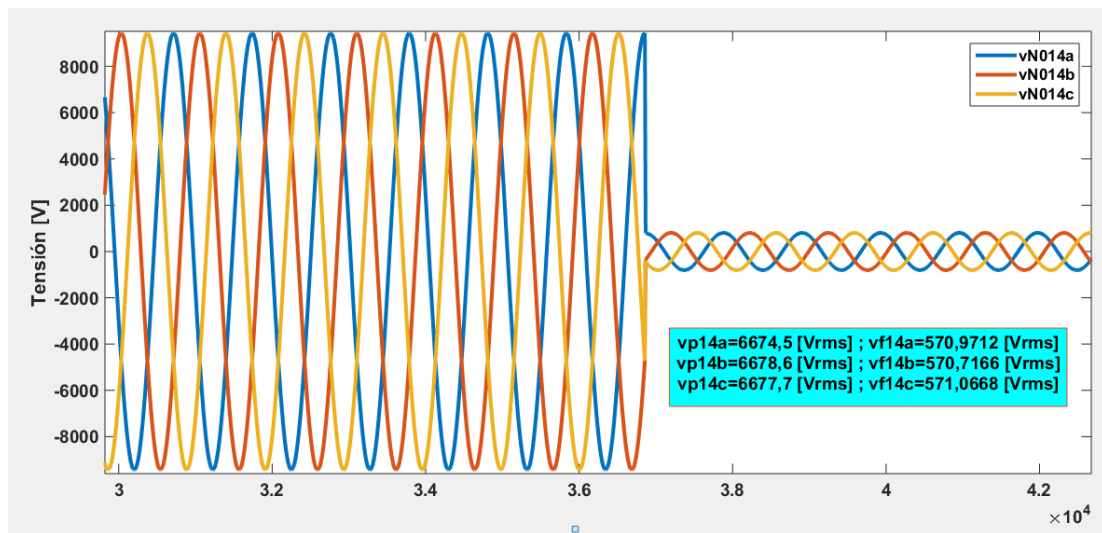
## C.8.2 Nodo eléctrico 15

### Falla trifásica en el nodo 15

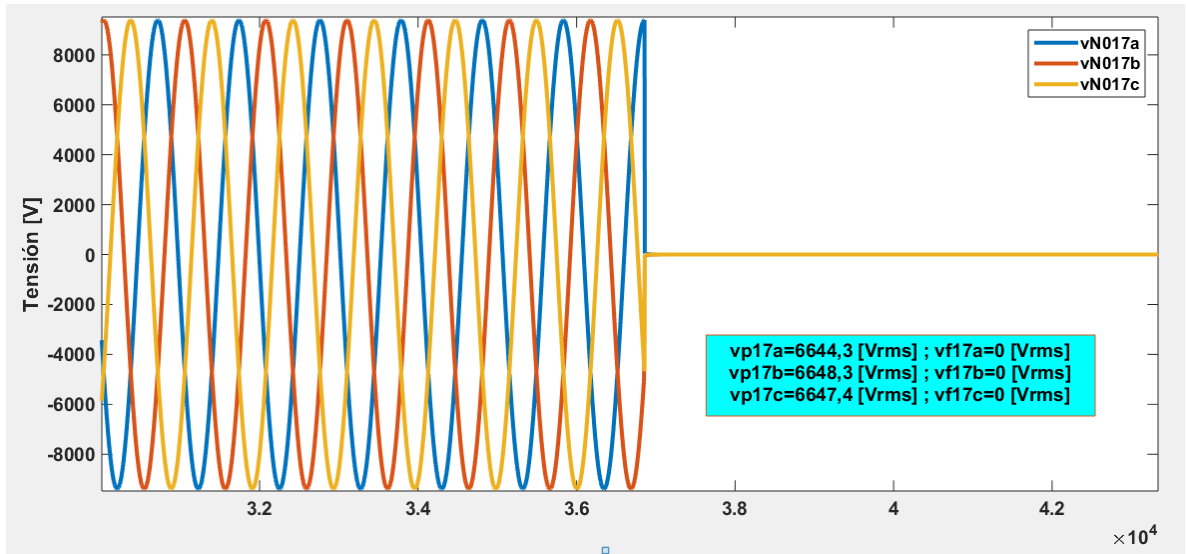
**Figura C99.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es trifásica en el nodo 15



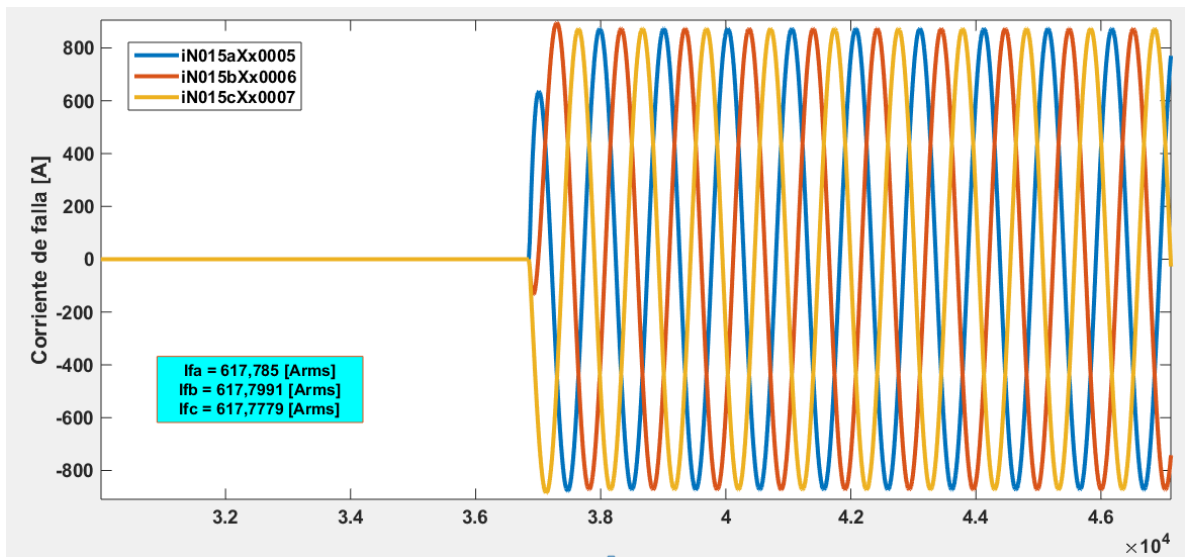
**Figura C100.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es trifásica en el nodo 15



**Figura C101.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es trifásica en el nodo 15



**Figura C102.** Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 15



**Tabla C28.** Resultados falla trifásica en el nodo 15

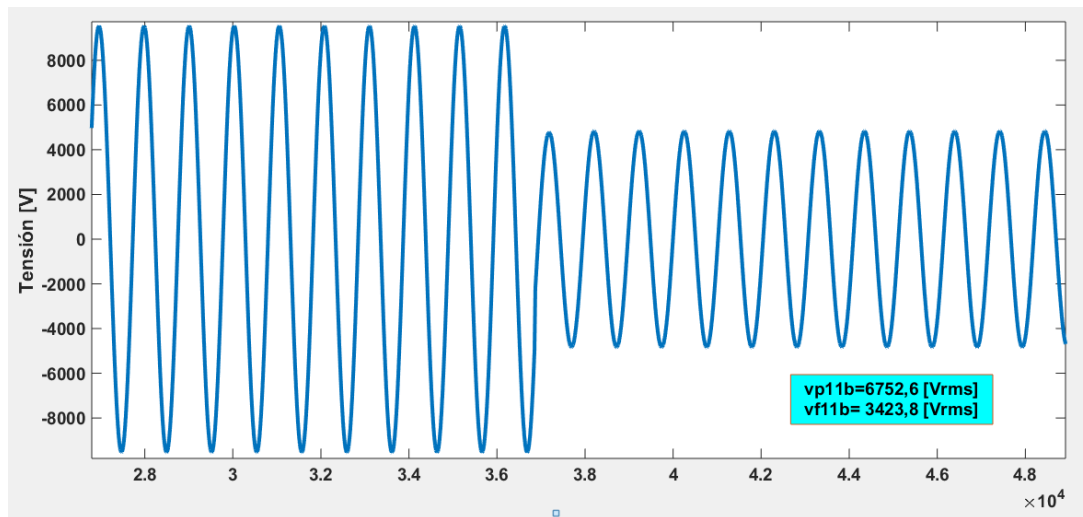
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	V <sub>17</sub>	I <sub>14</sub>	I <sub>17</sub>
A	2757,29218	570,918086	0	618,552873	143,9788984
B	2757,29218	570,918086	0	618,552873	143,9788984
C	2757,29218	570,917803	0	618,552953	143,978827

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1714</sub>	I <sub>1415</sub>	I <sub>1715</sub>	I <sub>1416</sub>	I <sub>1716</sub>	I <sub>1417</sub>	δ <sub>14</sub>	δ <sub>15</sub>	δ <sub>16</sub>	δ <sub>17</sub>
A	674,2746	617,5502	617,5815	618,9773	518,9474	619,4016	8,26395172	0,00506816	16,1605119	76,755162
B	674,679	617,9819	617,9519	619,4101	519,2586	619,8347	8,31893795	0,00485451	16,1688516	76,771404
C	674,5944	617,8598	617,8744	619,2877	519,1935	619,7122	8,30742849	0,00236294	16,1627948	76,7668239
Resultado suma deltas δt							24,8903182	0,01228561	48,4921583	230,29339

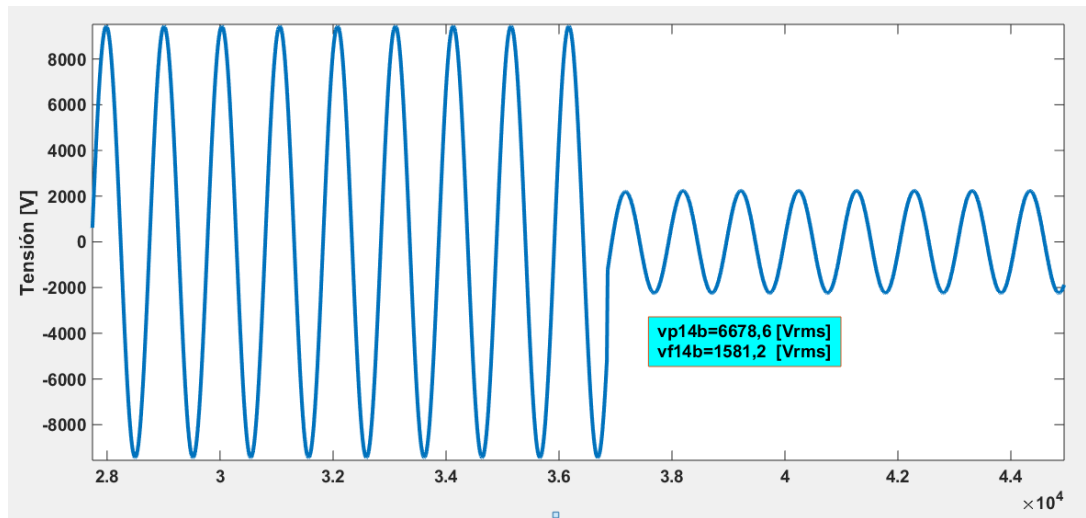
### C.8.3 Nodo eléctrico 16

#### Falla monofásica en el nodo 16

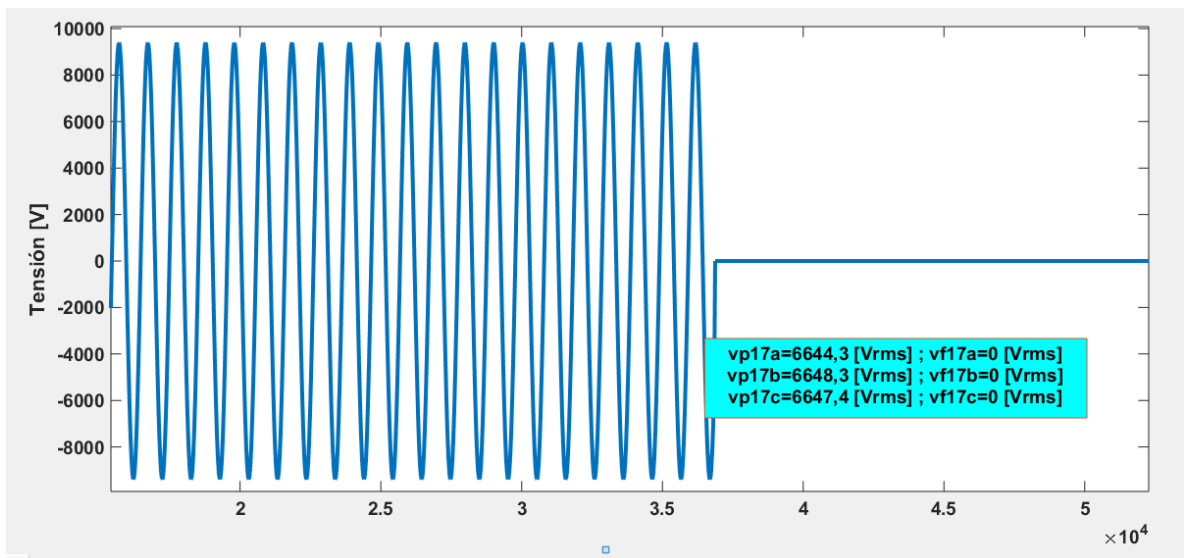
**Figura C103.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es monofásica en el nodo 16



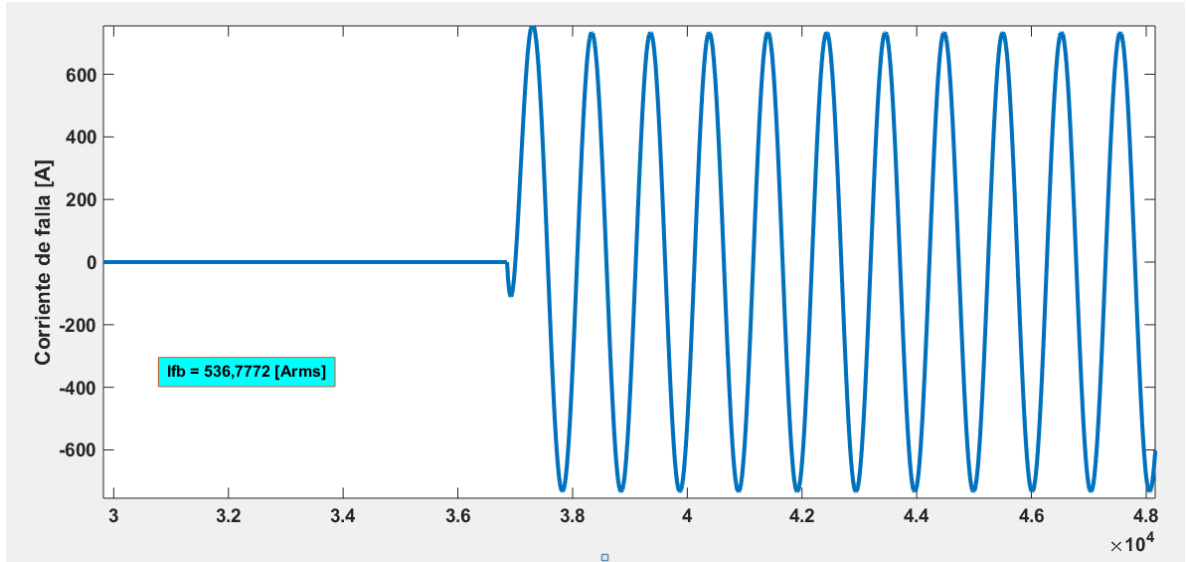
**Figura C104.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es monofásica en el nodo 16



**Figura C105.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es monofásica en el nodo 16



**Figura C106.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 16



**Tabla C29.** Resultados falla monofásica en el nodo 16

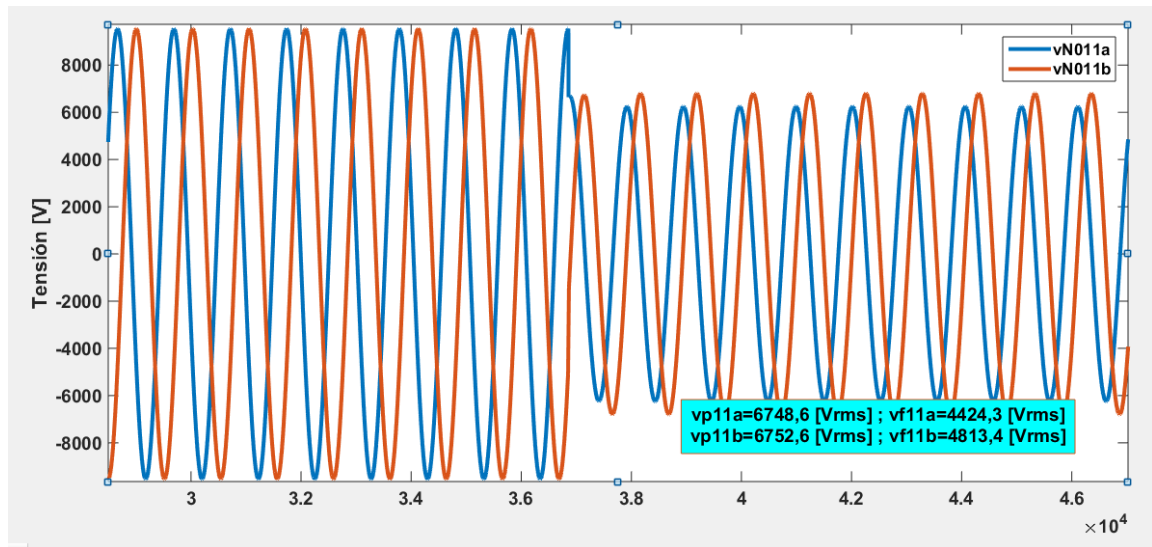
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	V11	V14	V17	I14	I17
B	3424,87169	1581,65645	0	521,468896	398,8753529

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	I1714	I1415	I1715	I1416	I1716	I1417	$\delta_{14}$	$\delta_{15}$	$\delta_{16}$	$\delta_{17}$
B	674,679	515,7443	617,9519	516,9362	519,2586	517,2905	22,7085924	16,5397339	0,44725306	22,8914212

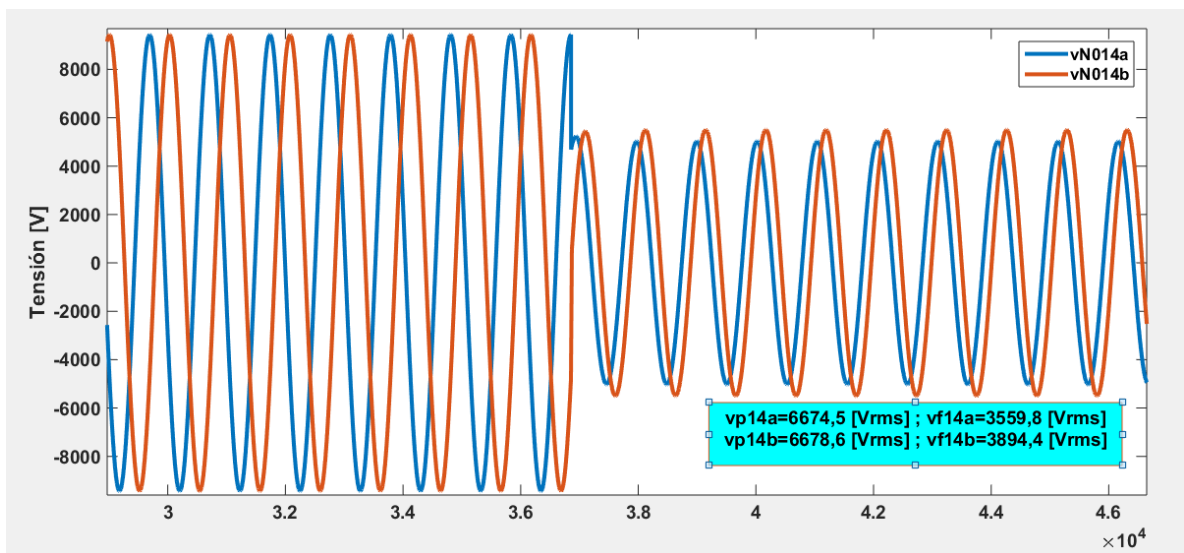
### C.8.4 Nodo eléctrico 17

#### Falla bifásica en el nodo 17

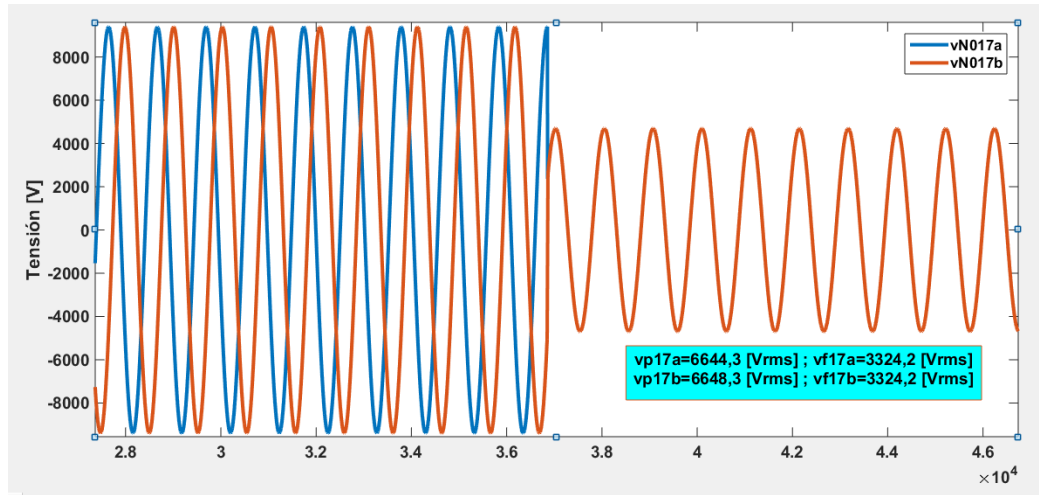
**Figura C107.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica en el nodo 17



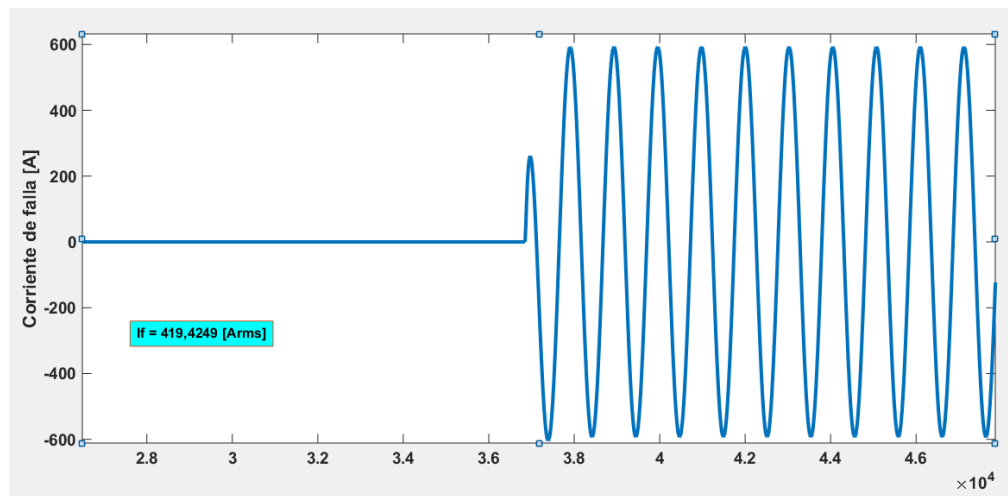
**Figura C108.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica en el nodo 17



**Figura C109.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es bifásica en el nodo 17



**Figura C110.** Gráfica de corriente de falla bifásica en el nodo 17



**Tabla C30.** Resultados falla bifásica en el nodo 17

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	V <sub>17</sub>	I <sub>14</sub>	I <sub>17</sub>
A	4422,95292	3558,51488	3323,33116	244,56045	59,31059656
B	4422,95292	3558,51488	3323,33116	244,56045	59,31059656

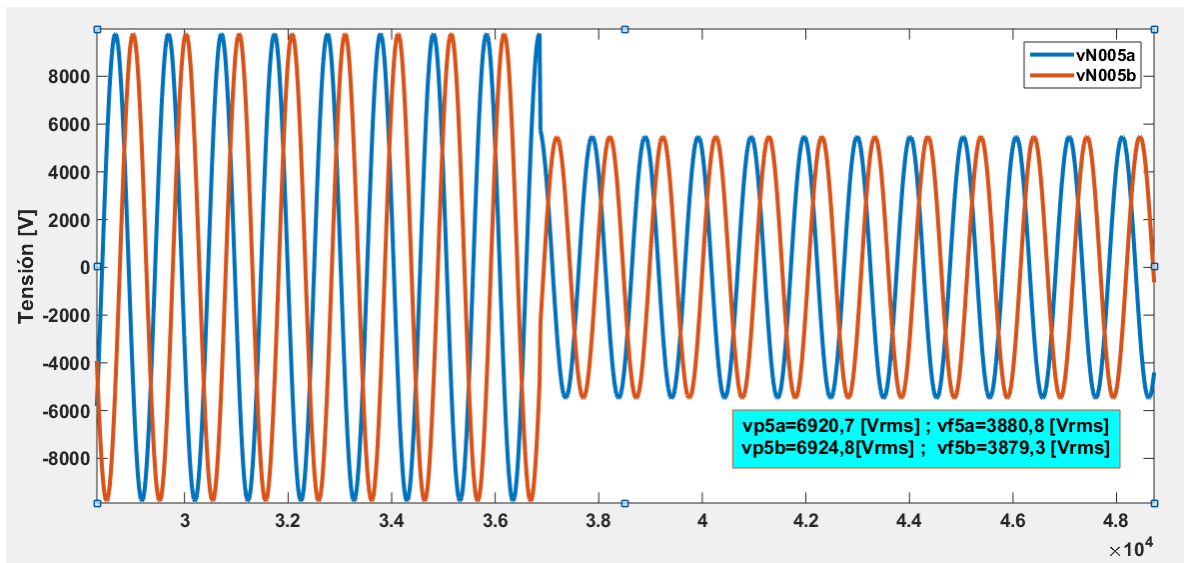
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1714</sub>	I <sub>1415</sub>	I <sub>1715</sub>	I <sub>1416</sub>	I <sub>1716</sub>	I <sub>1417</sub>	δ <sub>14</sub>	δ <sub>15</sub>	δ <sub>16</sub>	δ <sub>17</sub>
A	336,9279	315,1495	308,5989	315,8778	259,3125	316,0943	27,4146041	2,07856906	17,9073363	81,2364233
B	337,3323	281,6949	308,9693	282,346	259,6238	282,5395	27,5016208	8,82754371	8,04764367	79,0080337
Resultado suma deltas δt							54,916225	10,9061128	25,95498	160,244457

## C.9 Simulación de falla en los nodos eléctricos de la zona 9

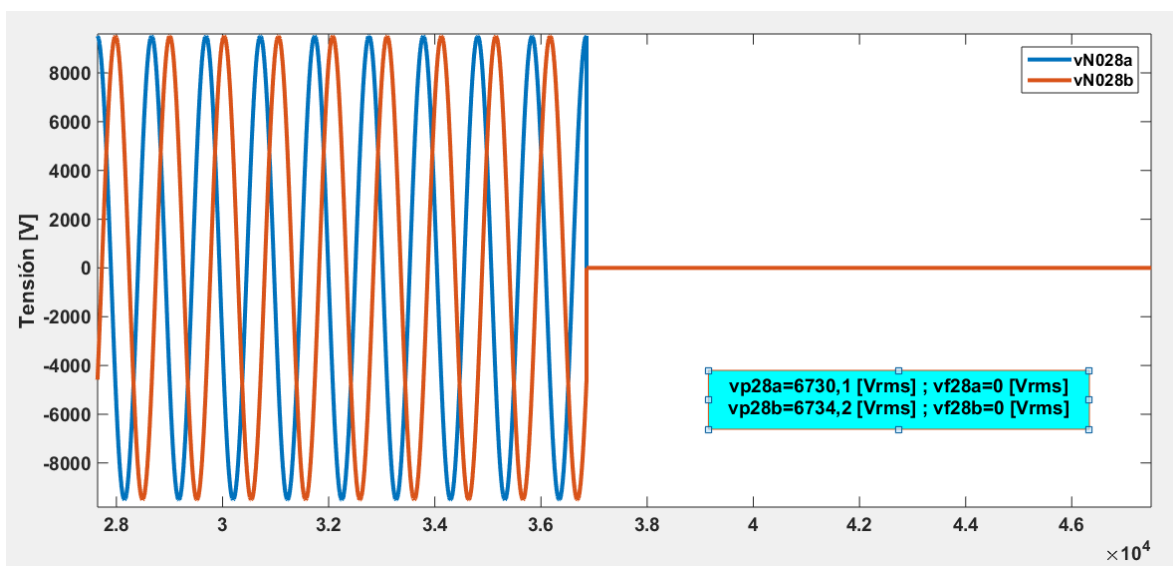
### C.9.1 Nodo eléctrico 28

#### Falla bifásica a tierra en el nodo 28

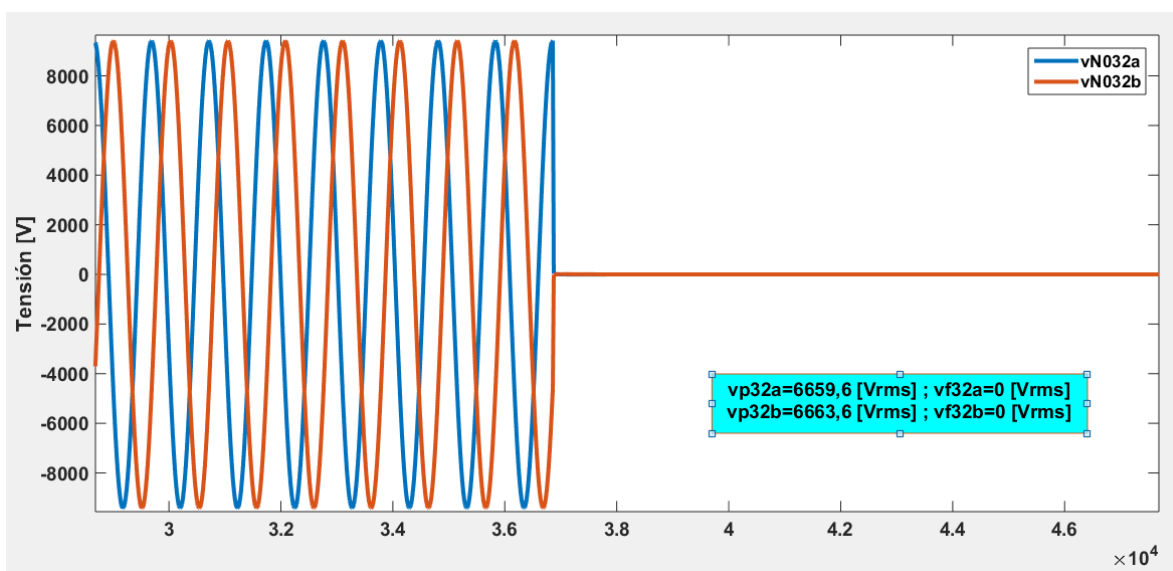
**Figura C111.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 28



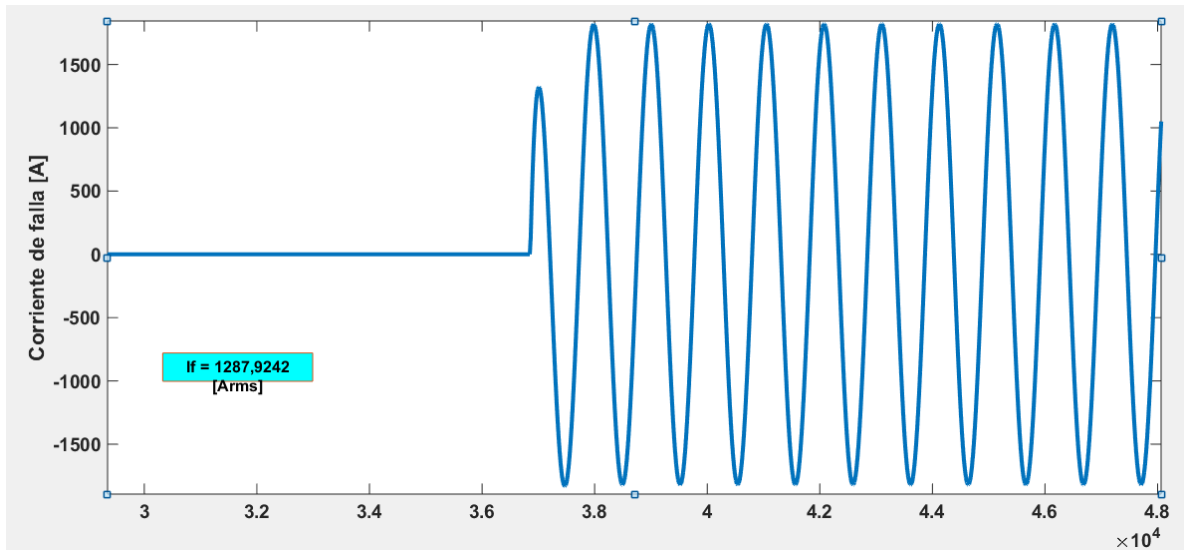
**Figura C112.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 28



**Figura C113.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 28



**Figura C114.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 28



**Tabla C31.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 28

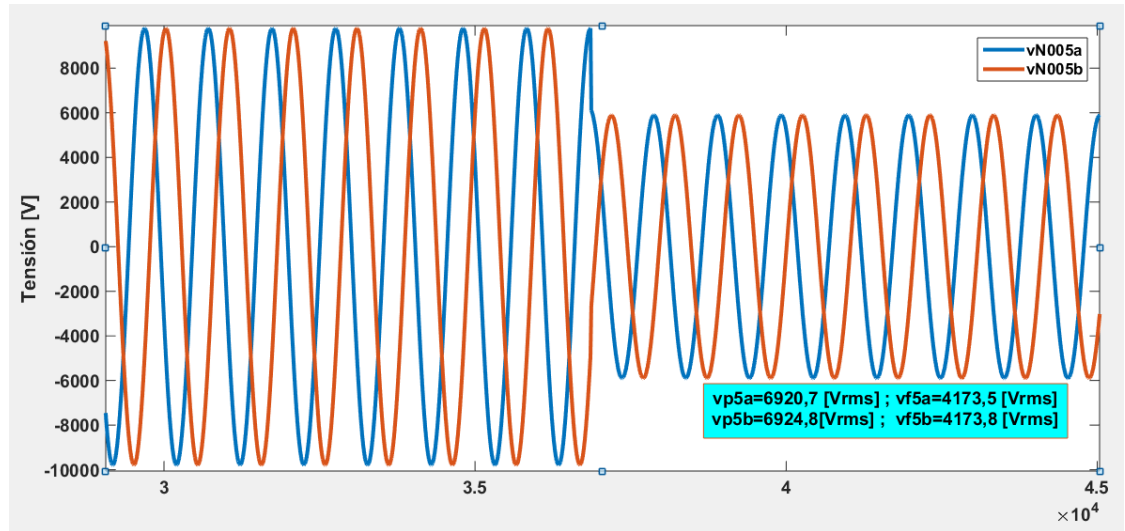
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>32</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>32</sub>
A	3880,60202	0	0	1288,68854	0
B	3880,60202	0	0	1288,68854	0

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>3228</sub>	I <sub>2829</sub>	I <sub>3229</sub>	I <sub>2830</sub>	I <sub>3230</sub>	I <sub>2831</sub>	I <sub>3231</sub>	I <sub>2832</sub>	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
A	1287,5	1292,9	1166,9	1299,3	947,6849	1300,7	889,5997	1301,1	0,09222835	9,7455333	27,0618872	31,6060813	100
B	1288,3	1293,7	1167,6	1300,1	948,2601	1301,5	890,1396	1301,9	0,03014973	9,74723661	27,062526	31,6066385	100
Resultado suma deltas δ:									0,12237808	19,4927699	54,1244131	63,2127198	200

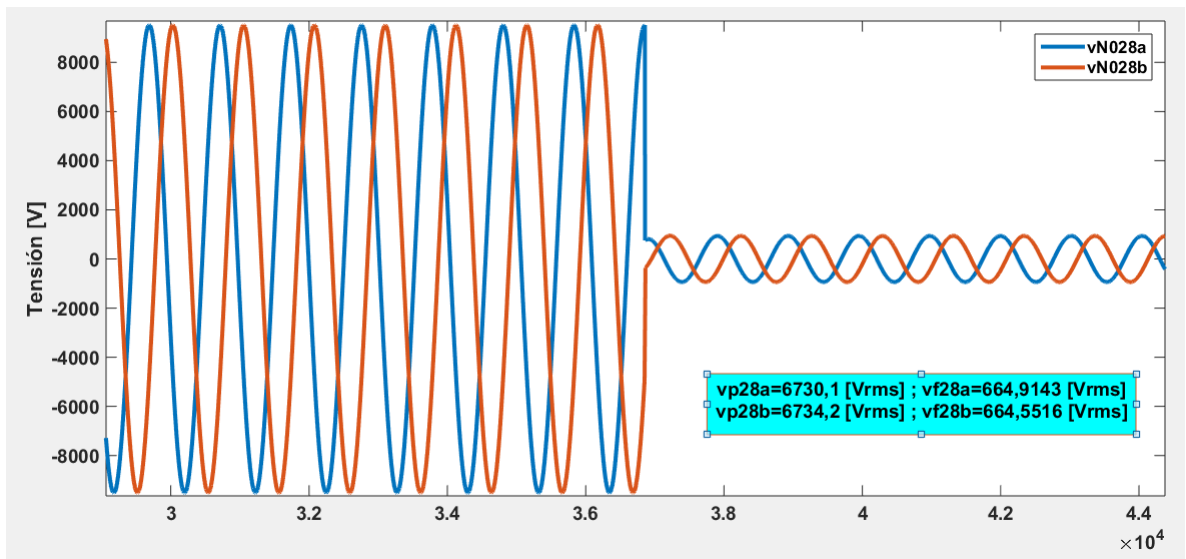
## C.9.2 Nodo eléctrico 29

### Falla bifásica a tierra en el nodo 29

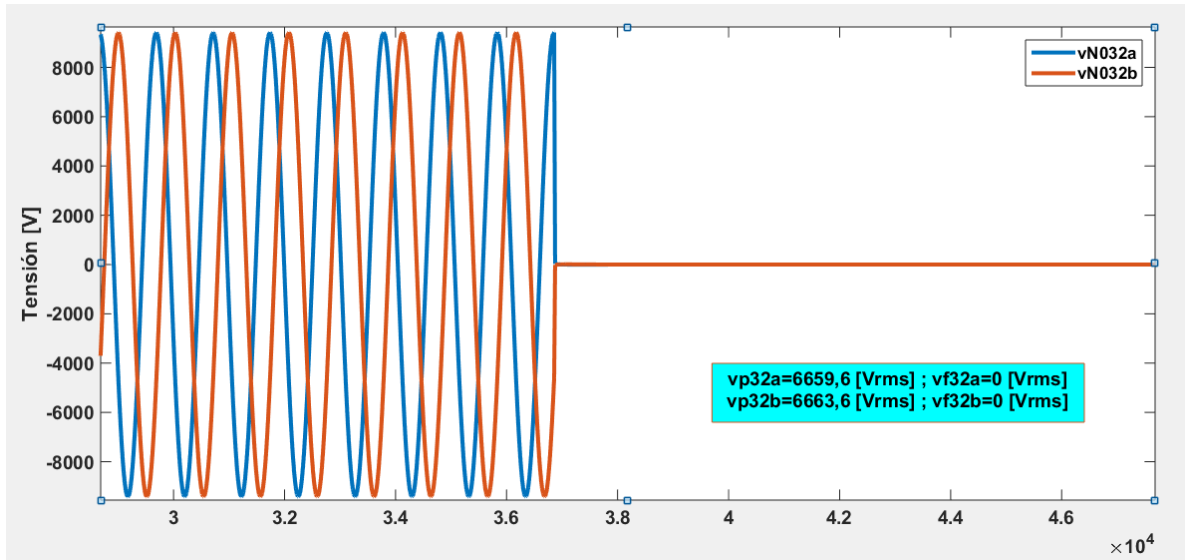
**Figura C115.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 29



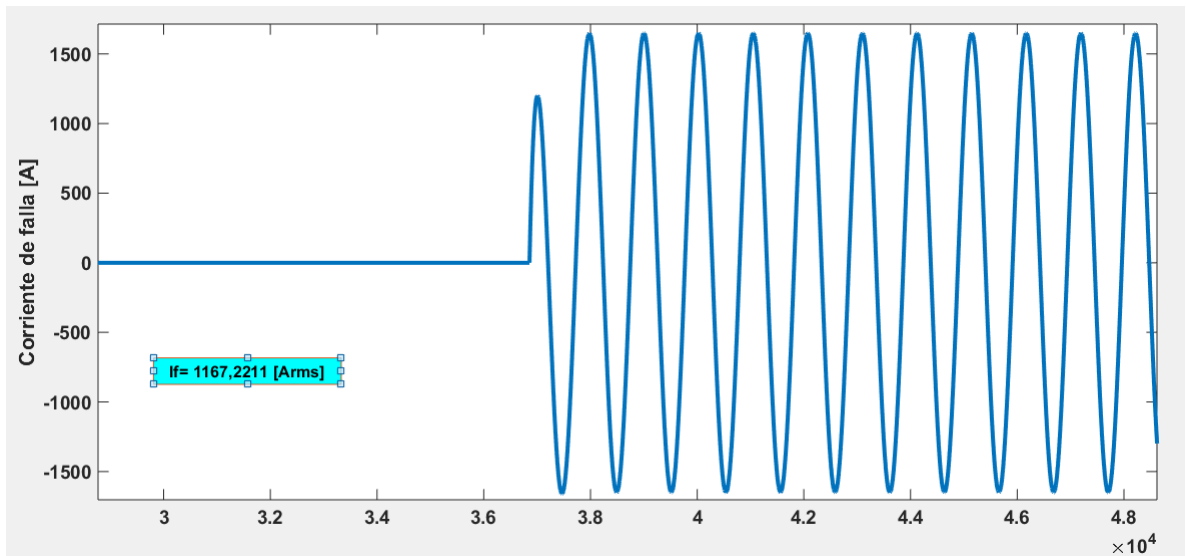
**Figura C116.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 29



**Figura C117.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 29



**Figura C118.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 29



**Tabla C32.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 29

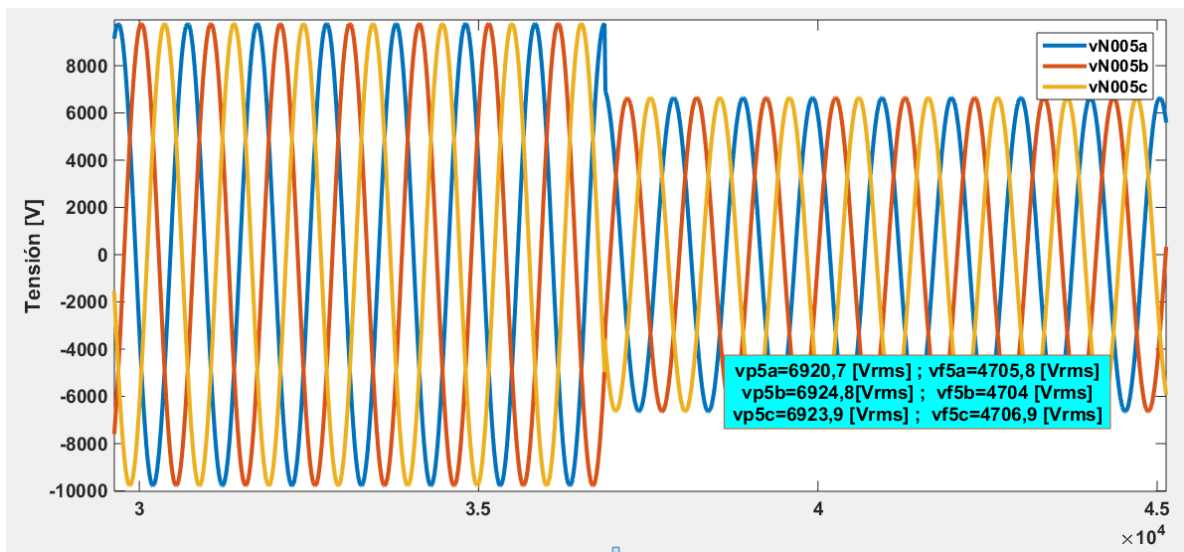
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>32</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>32</sub>
A	4173,27351	664,78644	0	1165,11486	221,3659974
B	4173,27351	664,78644	0	1165,11486	221,3659974

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]							Deltas					
	I <sub>3228</sub>	I <sub>2829</sub>	I <sub>3229</sub>	I <sub>2830</sub>	I <sub>3230</sub>	I <sub>2831</sub>	I <sub>3231</sub>	I <sub>2832</sub>	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
A	1287,5	1165,2	1166,9	1170,9	947,685	1172,2	889,5998	1172,6	9,50564205	0,14568515	19,0635409	24,108531	81,1217809
B	1288,3	1166	1167,6	1171,8	948,2601	1173	890,1396	1173,4	9,56183663	0,13703323	19,0766257	24,1142711	81,1346517
Resultado suma deltas δ:									19,0674787	0,28271838	38,1401666	48,2228021	162,256433

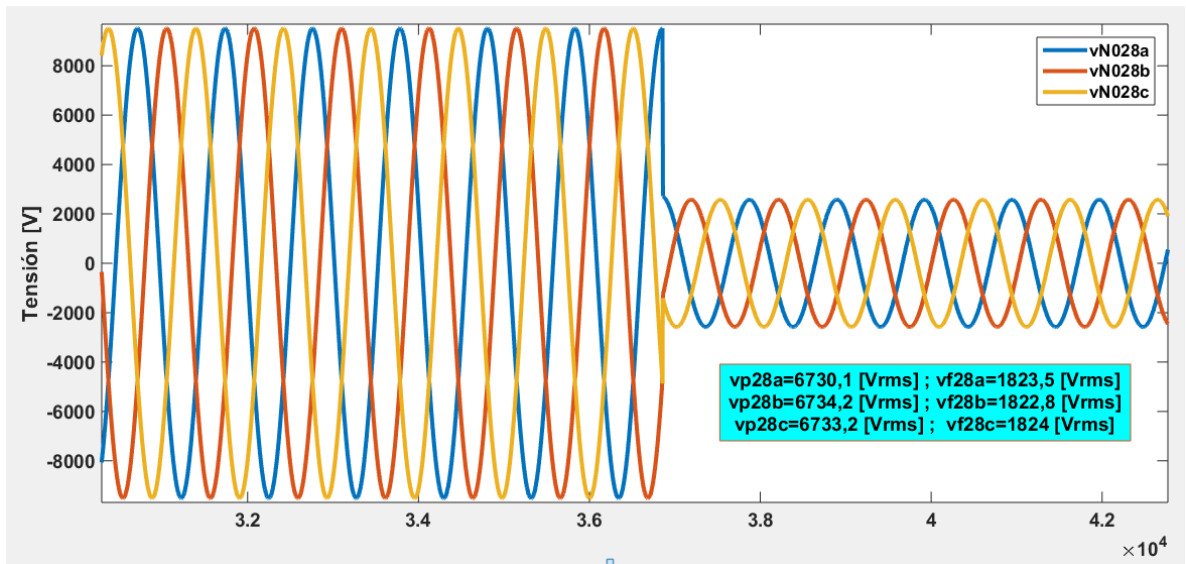
### C.9.3 Nodo eléctrico 30

#### Falla trifásica en el nodo 30

**Figura C119.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica en el nodo 30



**Figura C120.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es trifásica en el nodo 30



**Figura C121.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es trifásica en el nodo 30

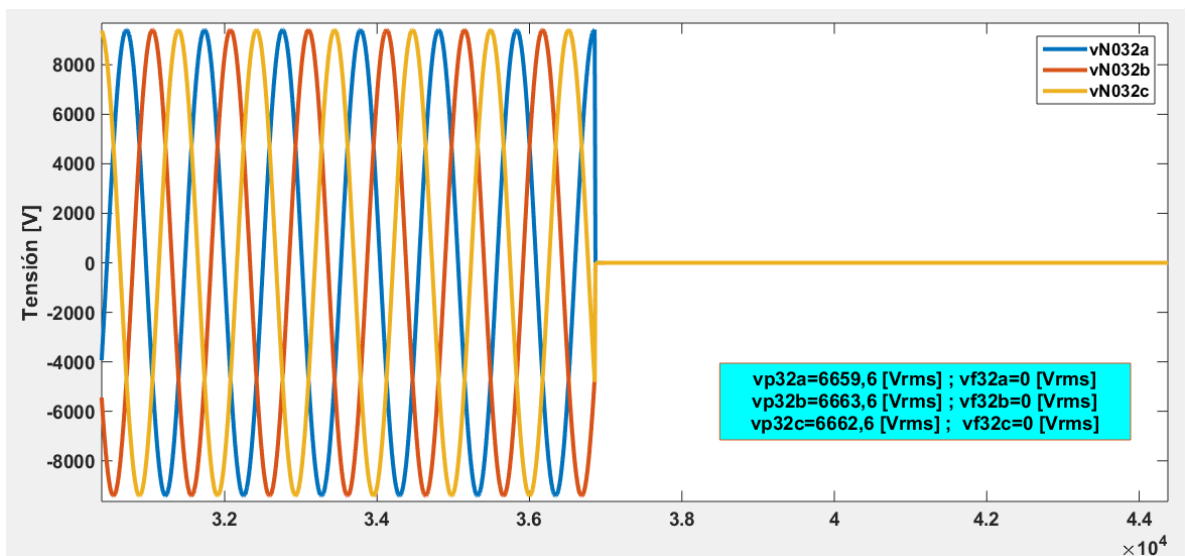


Figura C122. Gráfica de corriente de falla trifásica en el nodo 30

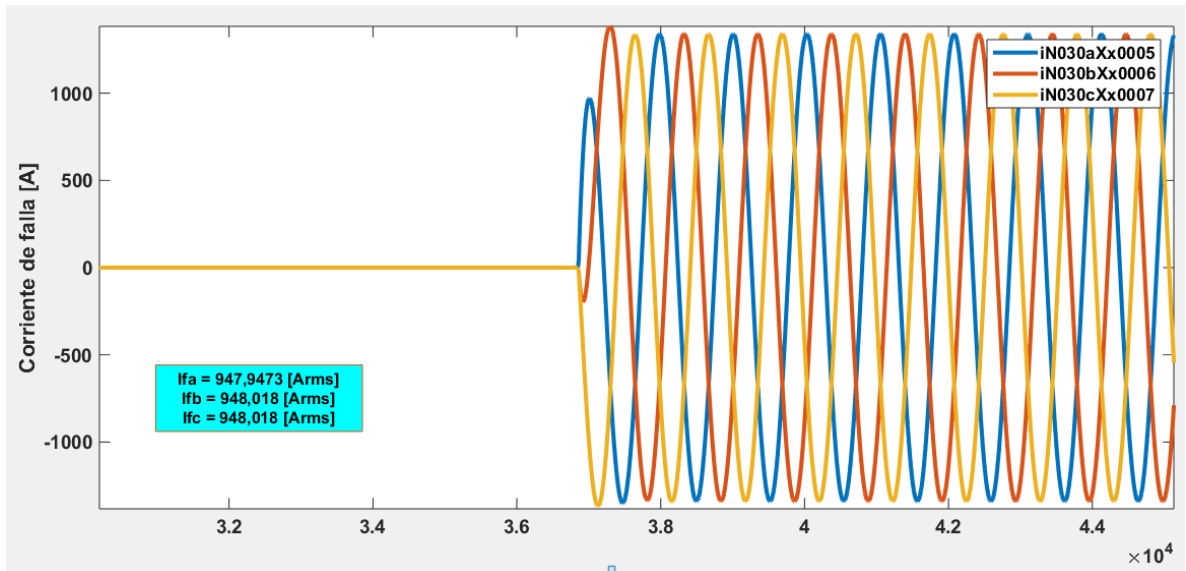


Tabla C33. Resultados falla trifásica en el nodo 30

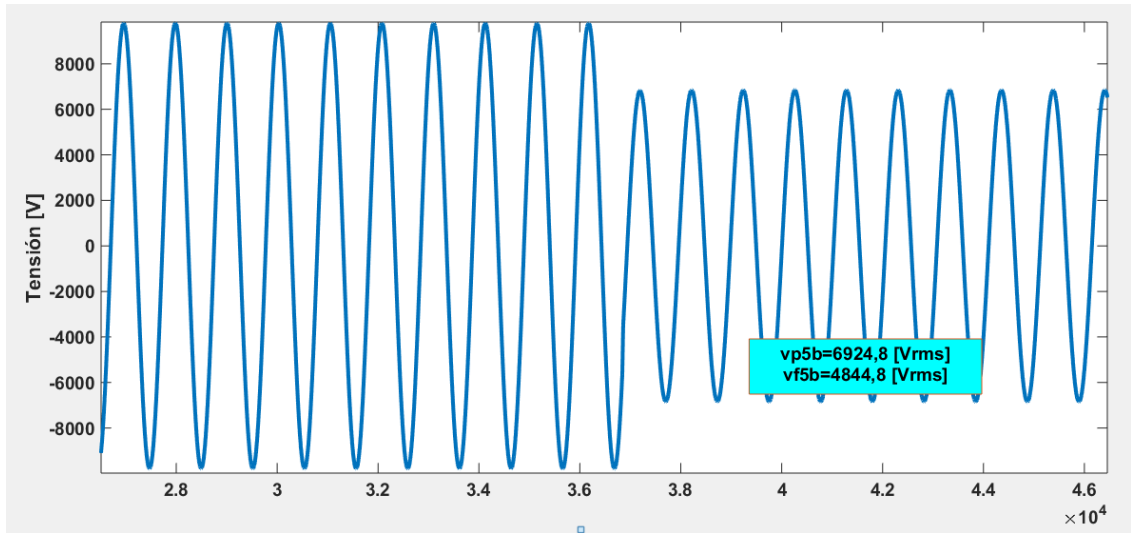
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>32</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>32</sub>
A	4705,5835	1823,41626	0	957,123629	607,1759798
B	4705,5835	1823,41626	0	957,123629	607,1759798
C	4705,5835	1823,41626	0	957,123629	607,1759798

Fase	Corrientes calculadas [Arms]								Deltas				
	I <sub>3228</sub>	I <sub>2829</sub>	I <sub>3229</sub>	I <sub>2830</sub>	I <sub>3230</sub>	I <sub>2831</sub>	I <sub>3231</sub>	I <sub>2832</sub>	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
A	1287,5	942,5764	1166,9	947,2324	947,685	948,2556	889,5998	948,5884	25,6603007	19,2238924	0,04775849	6,1856529	35,9916293
B	1288,3	943,4963	1167,6	948,1569	948,2601	949,181	890,1396	949,5142	25,7064637	19,1935337	0,01088309	6,22024672	36,054039
C	1288,1	943,0887	1167,4	947,7472	948,1221	948,7709	890,0101	949,1039	25,6949283	19,2146051	0,03954132	6,19336027	36,026395
Resultado suma deltas δi									77,0616927	57,6320312	0,0981829	18,5992599	108,072063

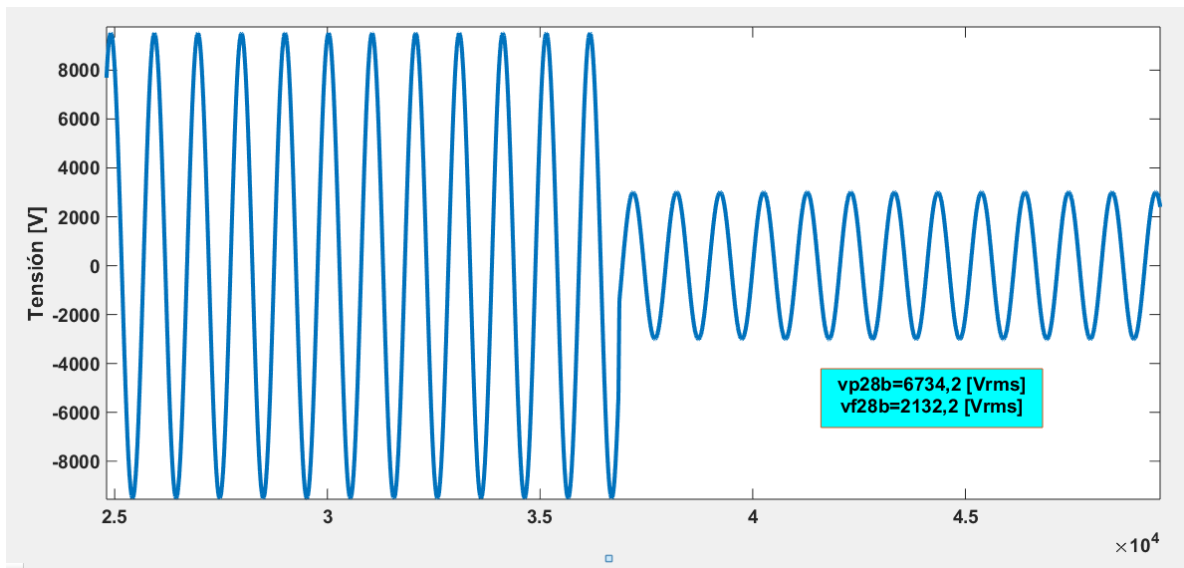
## C.9.4 Nodo eléctrico 31

### Falla monofásica en el nodo 31

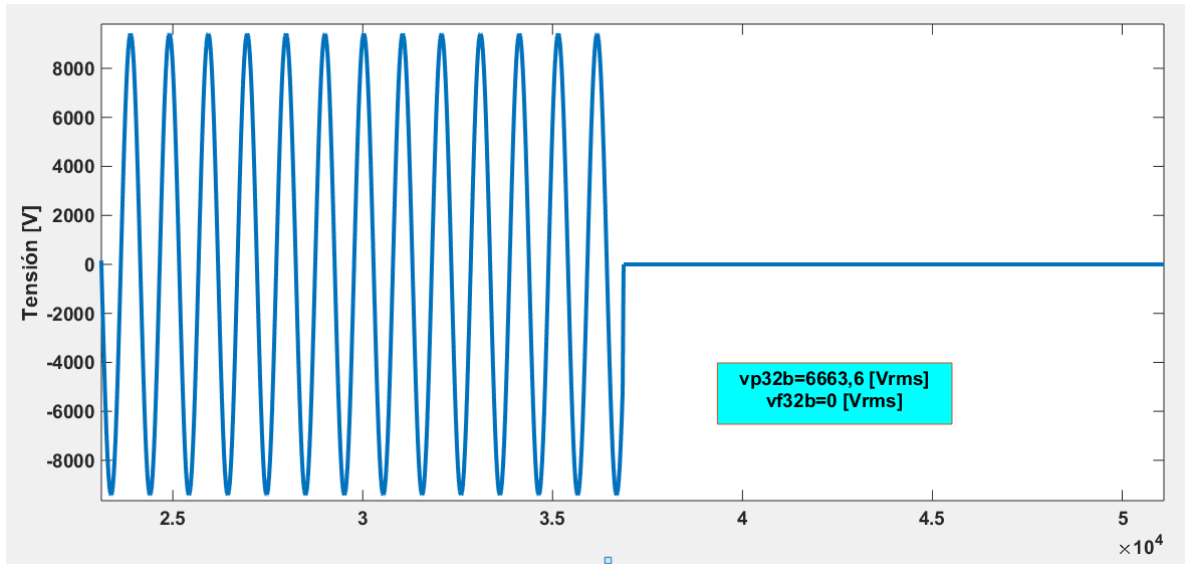
**Figura C123.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica en el nodo 31



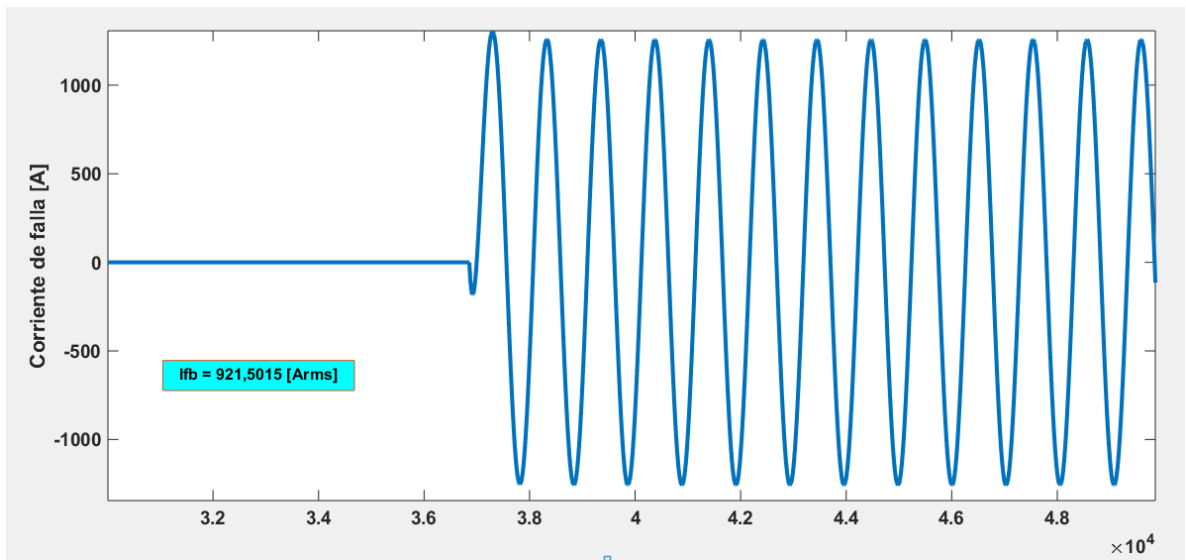
**Figura C124.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es monofásica en el nodo 31



**Figura C125.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es monofásica en el nodo 31



**Figura C126.** Gráfica de corriente de falla monofásica en el nodo 31



**Tabla C34.** Resultados falla monofásica en el nodo 31

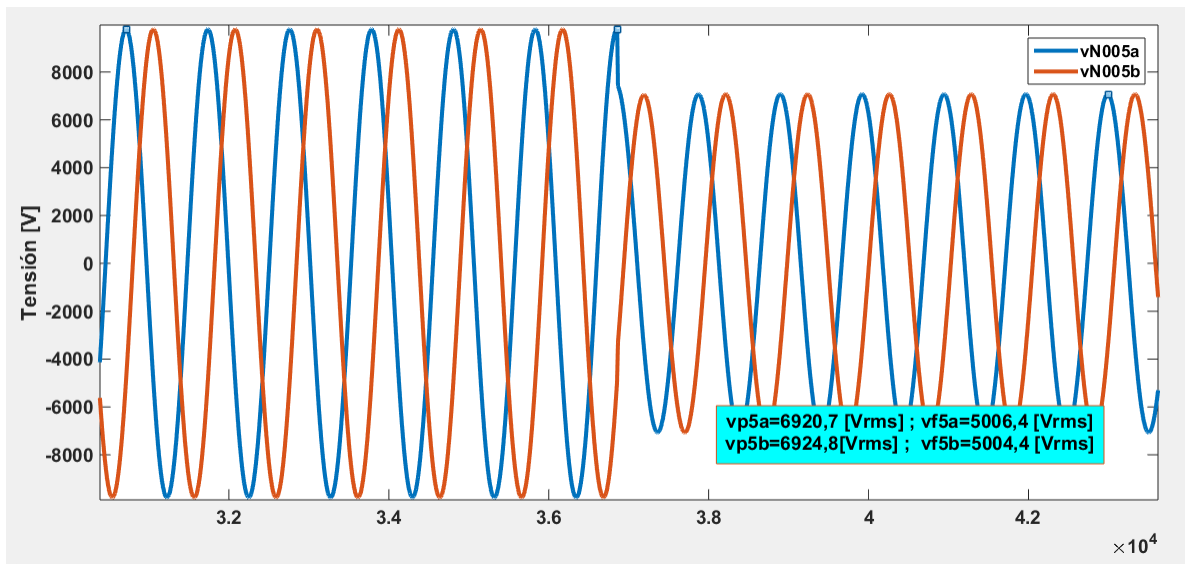
Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V5	V28	V32	I28	I32
B	4846,43917	2132,91689	0	901,119216	710,2360202

Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I3228	I2829	I3229	I2830	I3230	I2831	I3231	I2832	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
B	1288,3	884,0631	1167,6	888,4301	948,2601	889,3896	890,1396	889,7019	30,0536198	24,2837359	6,30945033	0,08425645	20,1714619

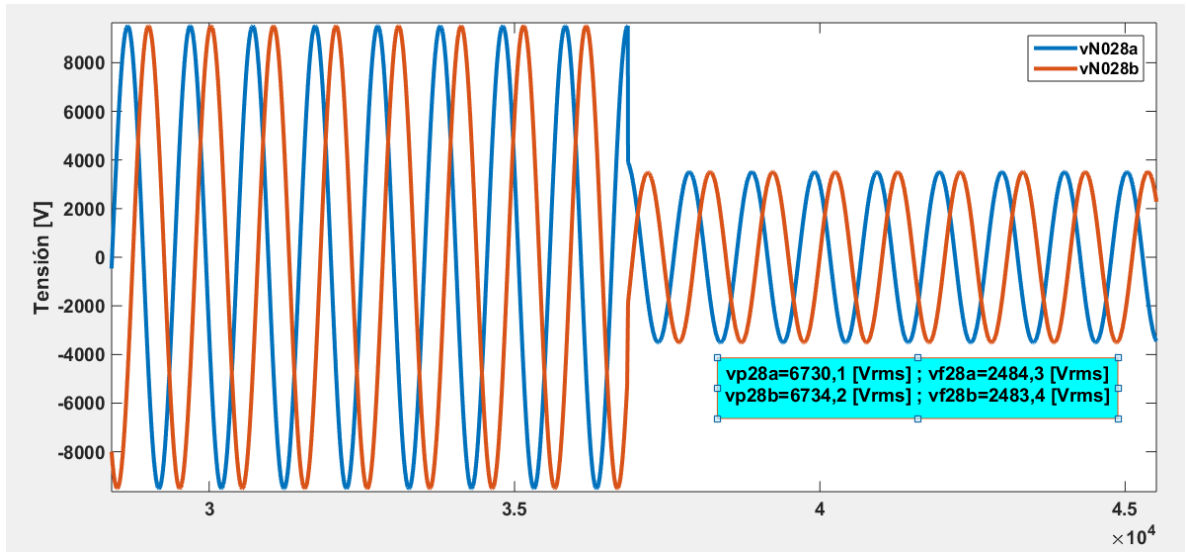
### C.9.5 Nodo eléctrico 32

#### Falla bifásica a tierra en el nodo 32

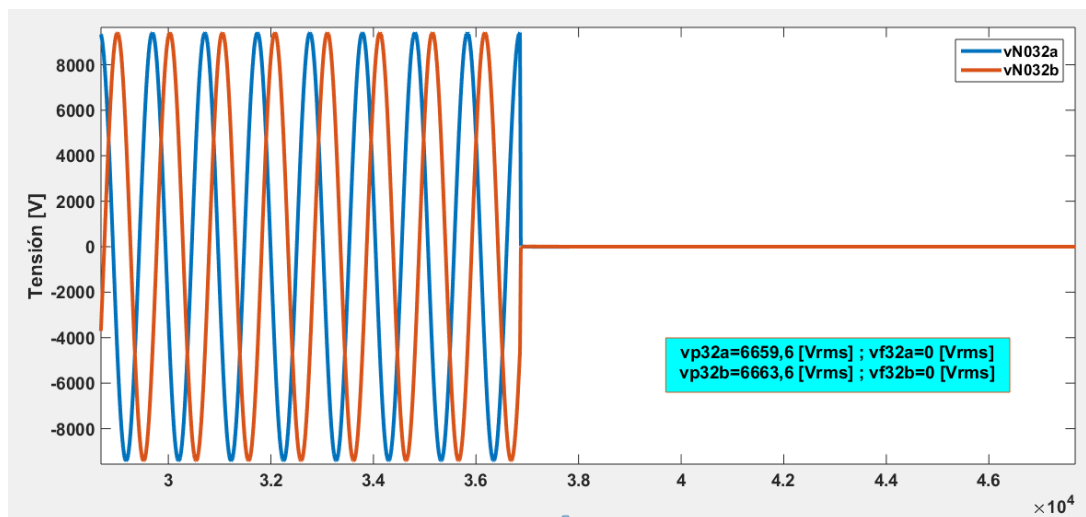
**Figura C127.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 32



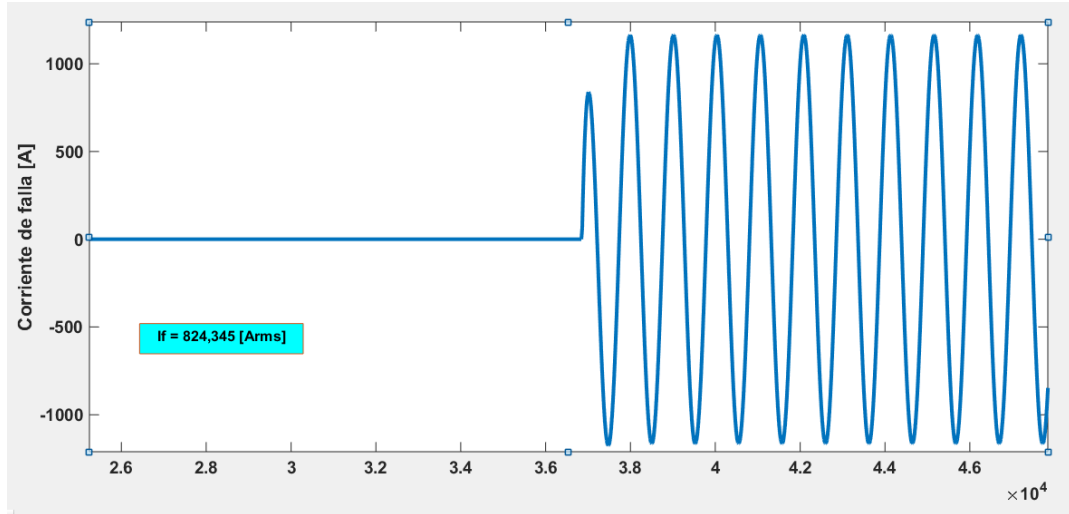
**Figura C128.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 32



**Figura C129.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es bifásica a tierra en el nodo 32



**Figura C130.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra en el nodo 32



**Tabla C35.** Resultados falla bifásica a tierra en el nodo 32

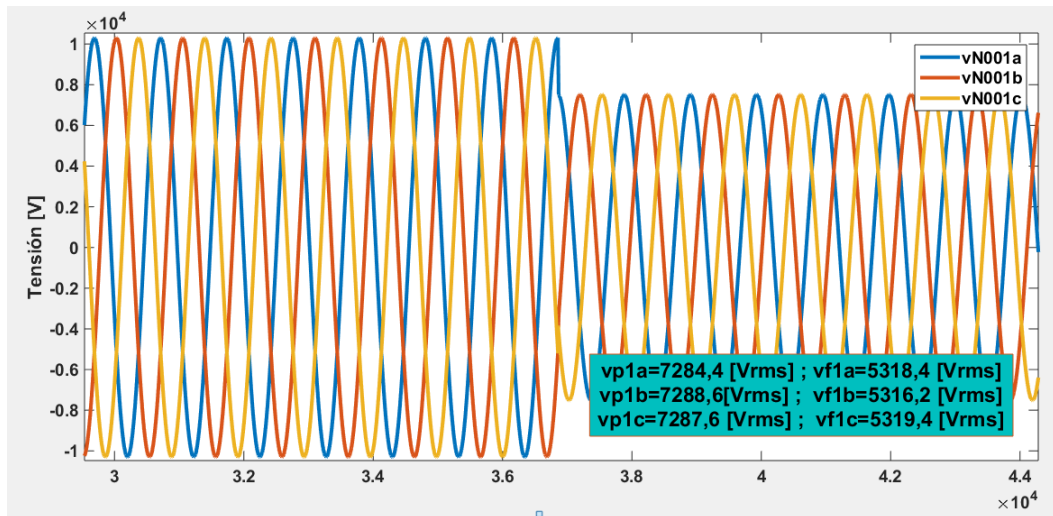
Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_5$	$V_{28}$	$V_{32}$	$I_{28}$	$I_{32}$
A	5006,10388	2484,20754	0	837,483175	827,2116385
B	5006,10388	2484,20754	0	837,483175	827,2116385

Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{3228}$	$I_{2829}$	$I_{3229}$	$I_{2830}$	$I_{3230}$	$I_{2831}$	$I_{3231}$	$I_{2832}$	$\delta_{28}$	$\delta_{29}$	$\delta_{30}$	$\delta_{31}$	$\delta_{32}$
A	1287,5	815,6491	1166,9	819,6782	947,685	820,5634	889,5998	820,8514	34,9527631	30,1011998	13,5073152	7,76038844	0,76887681
B	1288,3	816,5917	1167,6	820,6254	948,2601	821,5117	890,1396	821,8001	34,9931557	30,0623758	13,459883	7,70979069	0,65419032
Resultado suma deltas $\delta_i$ :									69,9459188	60,1635756	26,9671982	15,4701791	1,42306714

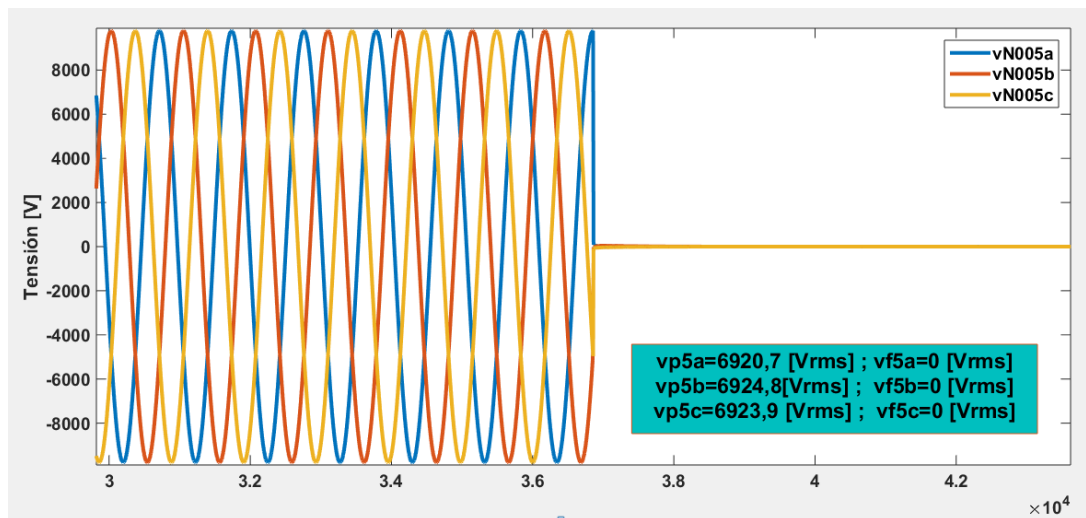
## C.10 Simulación de falla en tramos entre dos nodos eléctricos

### C.10.1 Falla trifásica entre los nodos eléctricos 1 y 2

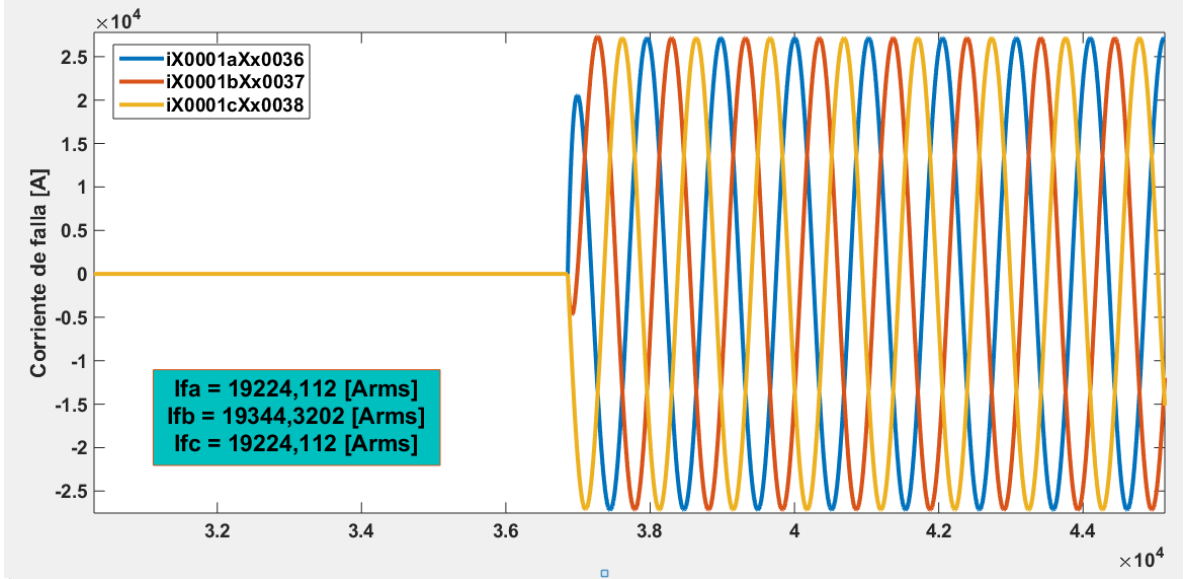
**Figura C131.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es trifásica entre los nodos 1 y 2



**Figura C132.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica entre los nodos 1 y 2



**Figura C133.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 1 y 2



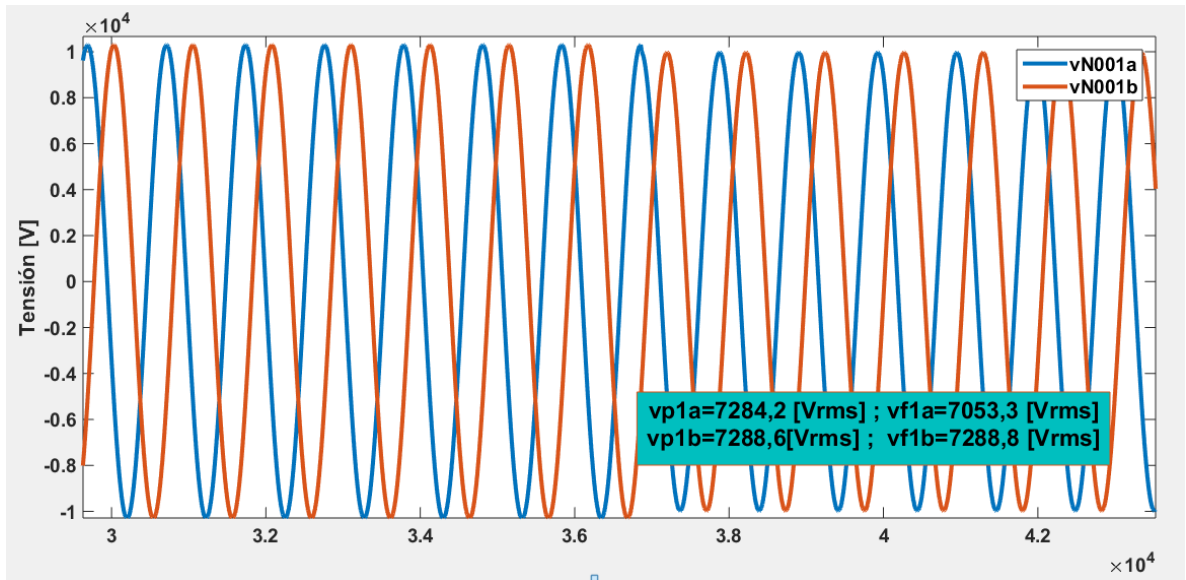
**Tabla C36.** Resultados falla trifásica entre los nodos 1 y 2

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	V <sub>f</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>5</sub>
A	5967,98123	5318,00868	0	6280,656218	3150,801996
B	5967,98123	5318,00868	0	6280,656218	3150,801996
C	5967,98123	5318,00868	0	6280,656218	3150,801996

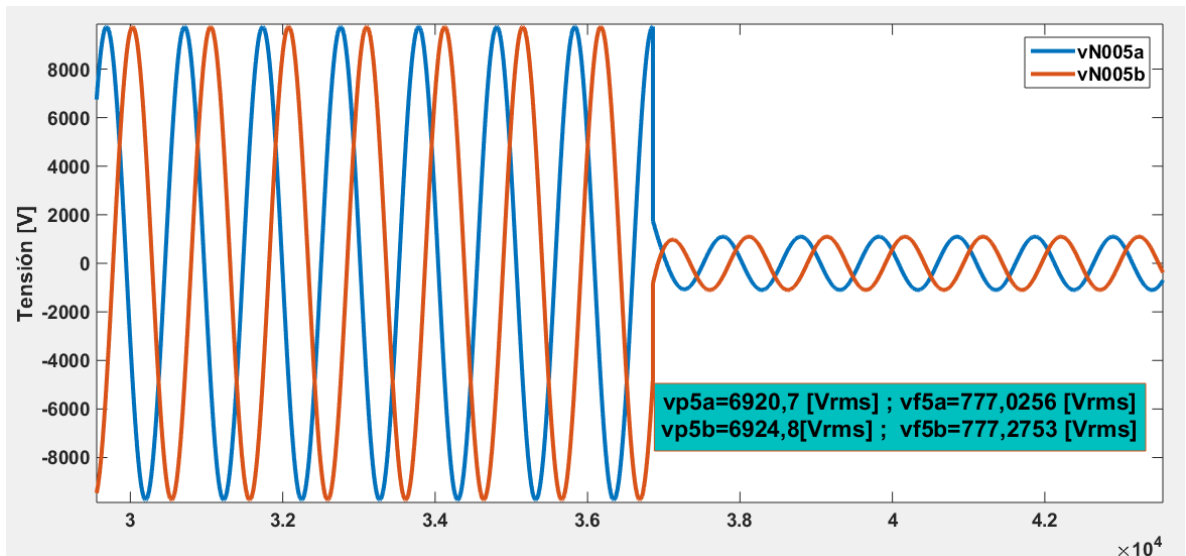
Fase	Corrientes calculadas [Arms]								Deltas				
	I <sub>s1</sub>	I <sub>s2</sub>	I <sub>s3</sub>	I <sub>s4</sub>	I <sub>s5</sub>	I <sub>s6</sub>	I <sub>s7</sub>	I <sub>s8</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	δ <sub>4</sub>	δ <sub>5</sub>
A	70348	19338	11078	19492	6803,1	19657	4851,3	20061	91,0720188	42,7138277	65,0979889	75,3202422	84,2938936
B	70390	19404	11085	19558	6807,3	19724	4854,3	20130	91,0773459	42,8726036	65,1942939	75,3888664	84,3477298
C	70381	19361	11083	19516	6806,3	19681	4853,6	20086	91,0762049	42,756056	65,1245132	75,3386515	84,3134422
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>									273,22557	128,342487	195,416796	226,04776	252,955066

### C.10.2 Falla bifásica entre los nodos eléctricos 5 y 6

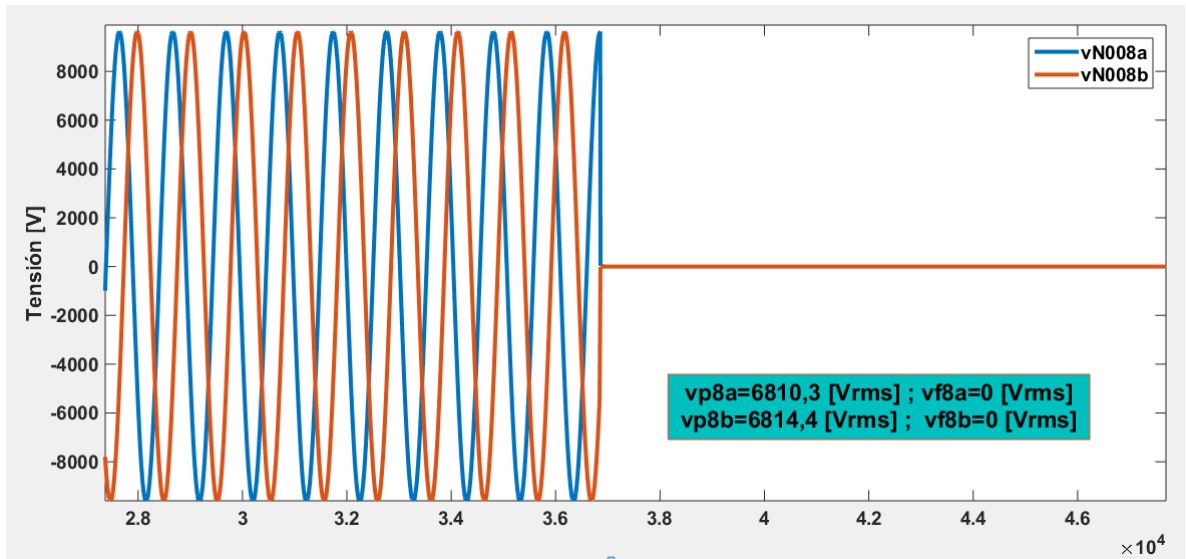
**Figura C134.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica entre los nodos 5 y 6



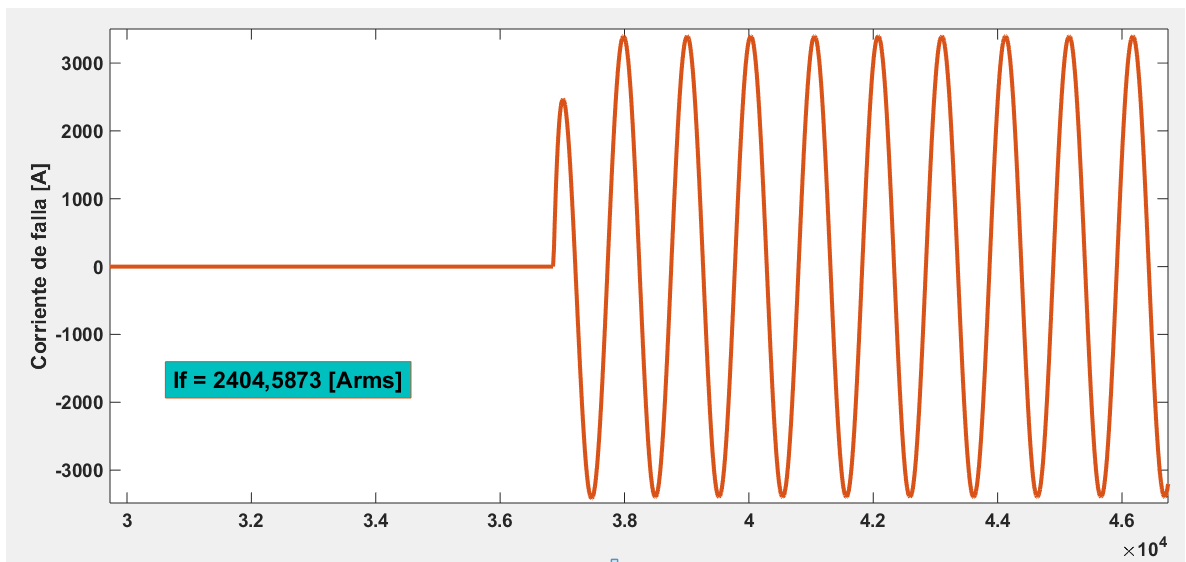
**Figura C135.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica entre los nodos 5 y 6



**Figura C136.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica entre los nodos 5 y 6



**Figura C137.** Gráfica de corriente de falla bifásica entre los nodos 5 y 6



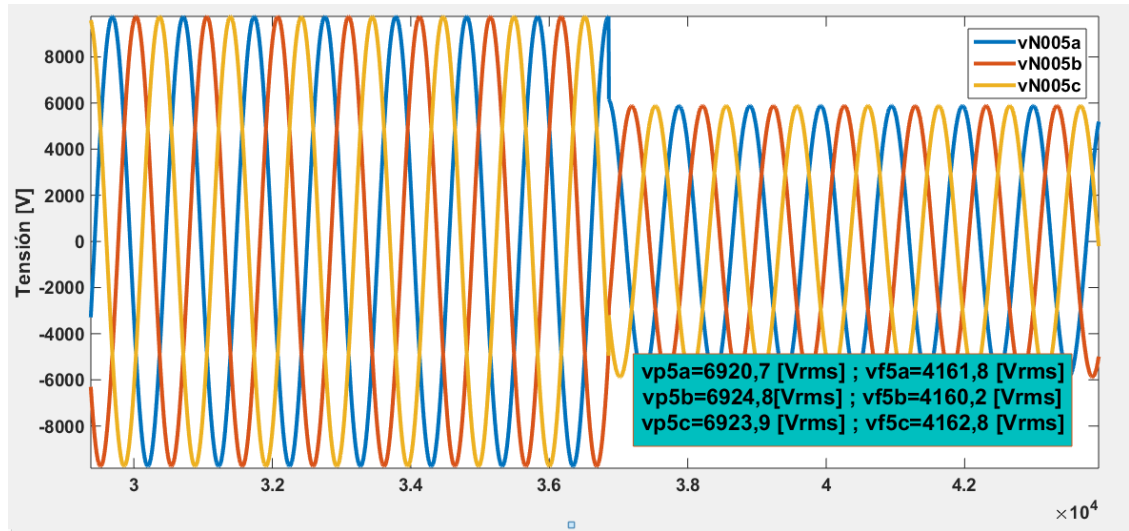
**Tabla C37.** Resultados falla bifásica entre los nodos 5 y 6

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>
A	7062,15827	777,251774	0	3723,667469	310,6521878
B	7062,15827	777,251774	0	3723,667469	310,6521878

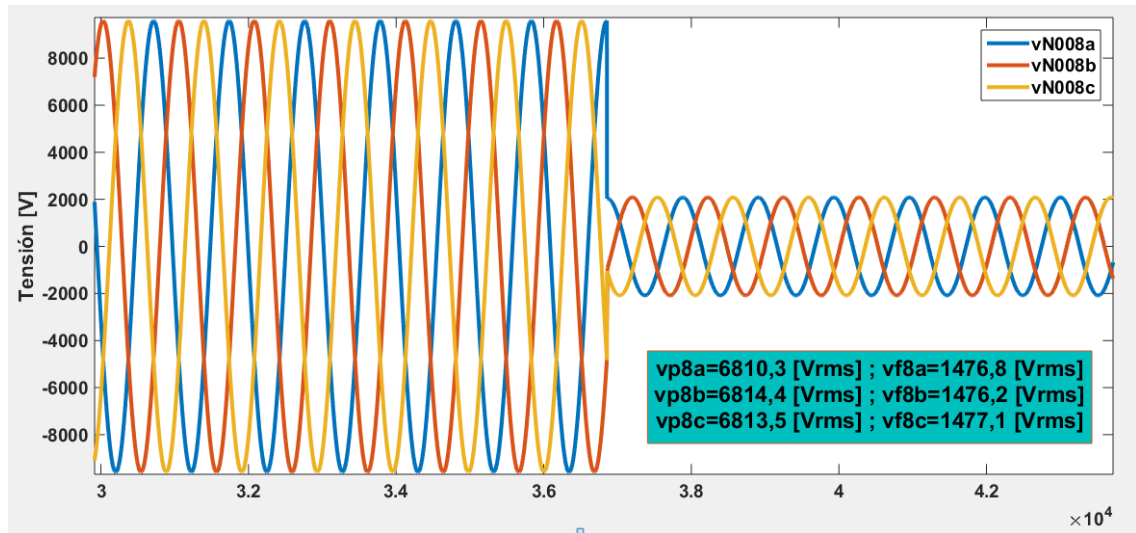
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>85</sub>	I <sub>56</sub>	I <sub>86</sub>	I <sub>57</sub>	I <sub>87</sub>	I <sub>58</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>6</sub>	δ <sub>7</sub>	δ <sub>8</sub>
A	2830,5	2521,1	2338,2	2534,5	1894,3	2552,2	23,9862307	7,25476974	25,25942	87,8280625
B	2832,2	2522,7	2339,6	2536,1	1895,4	2553,8	23,9405768	7,25809648	25,2631994	87,8356885
Resultado suma deltas δ <sub>i</sub>							47,9268074	14,5128662	50,5226194	175,663751

### C.10.3 Falla trifásica entre los nodos eléctricos 9 y 10

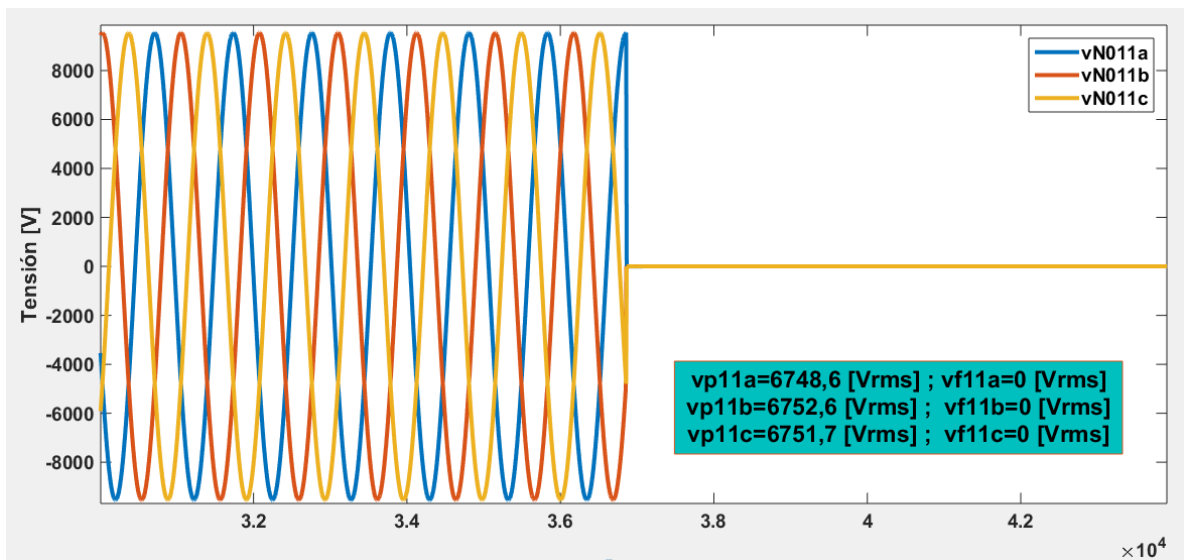
**Figura C138.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



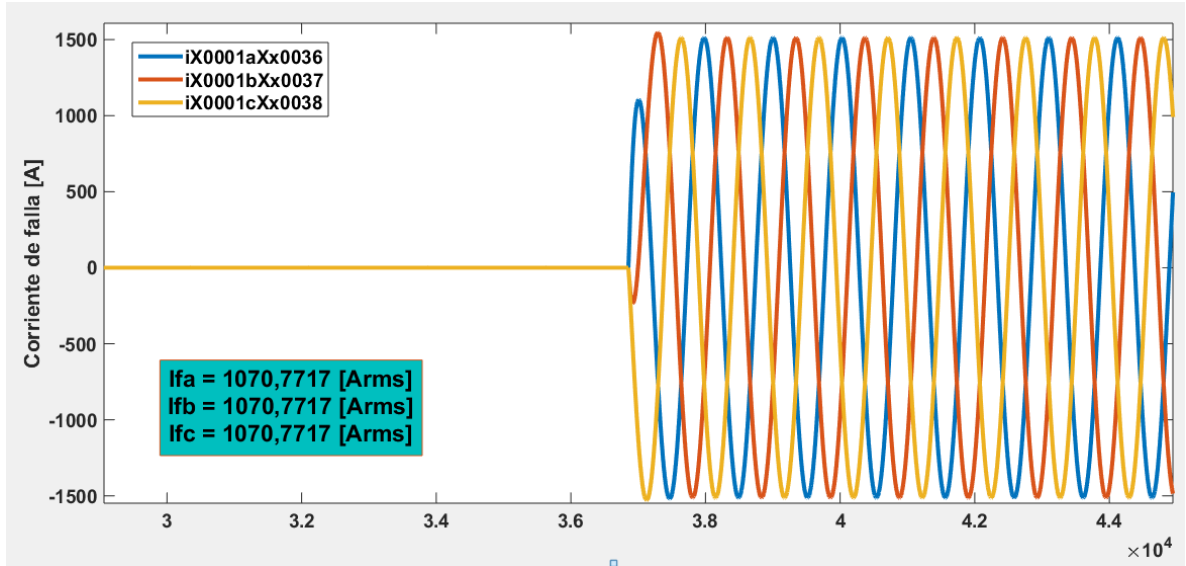
**Figura C139.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



**Figura C140.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es trifásica entre los nodos 9 y 10



**Figura C141.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 9 y 10



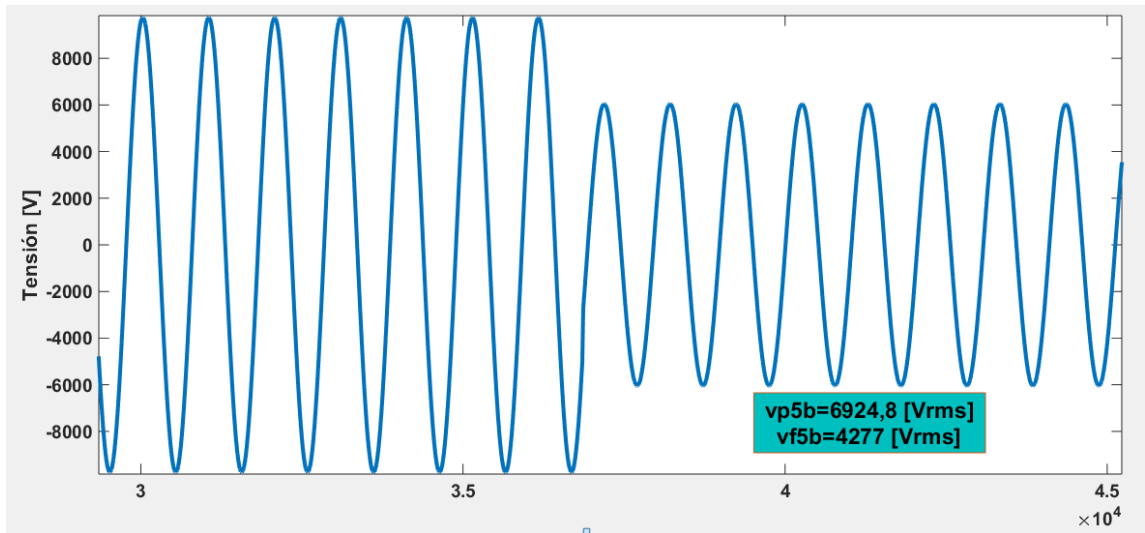
**Tabla C38.** Resultados falla trifásica entre los nodos 9 y 10

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
A	4161,60625	1476,65109	0	1073,123565	792,605977
B	4161,60625	1476,65109	0	1073,123565	792,605977
C	4161,60625	1476,65109	0	1073,123565	792,605977

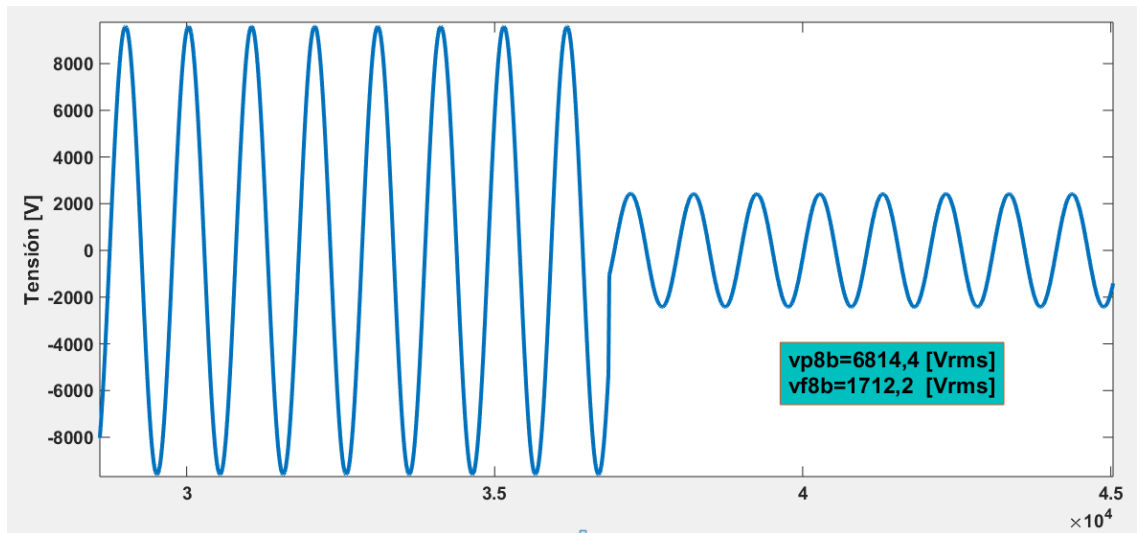
Fase	Corrientes calculadas [Arms]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
A	1408,6	1109,1	1118,6	1110,2	1084	1112	23,8163024	0,84927588	2,35993515	28,7224841
B	1409,4	1110,1	1119,3	1111,2	1084,7	1113	23,8595456	0,82194229	2,38480922	28,786525
C	1409,3	1109,7	1119,1	1110,8	1084,5	1112,6	23,8541429	0,83996068	2,36766295	28,7609224
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							71,5299908	2,51117885	7,11240731	86,2699315

#### C.10.4 Falla monofásica entre los nodos eléctricos 10 y 11

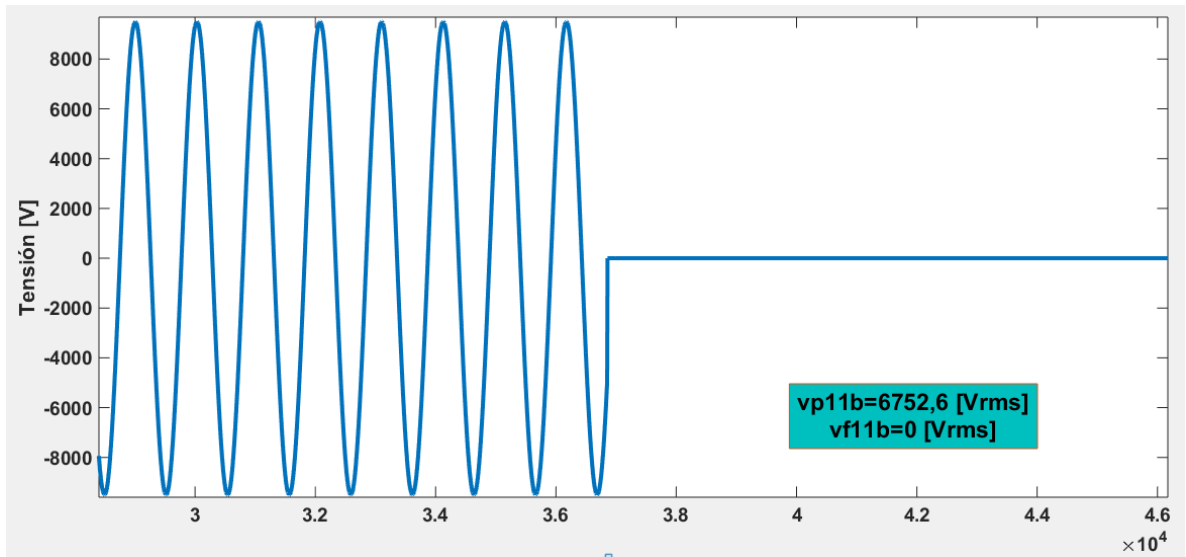
**Figura C142.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica entre los nodos 10 y 11



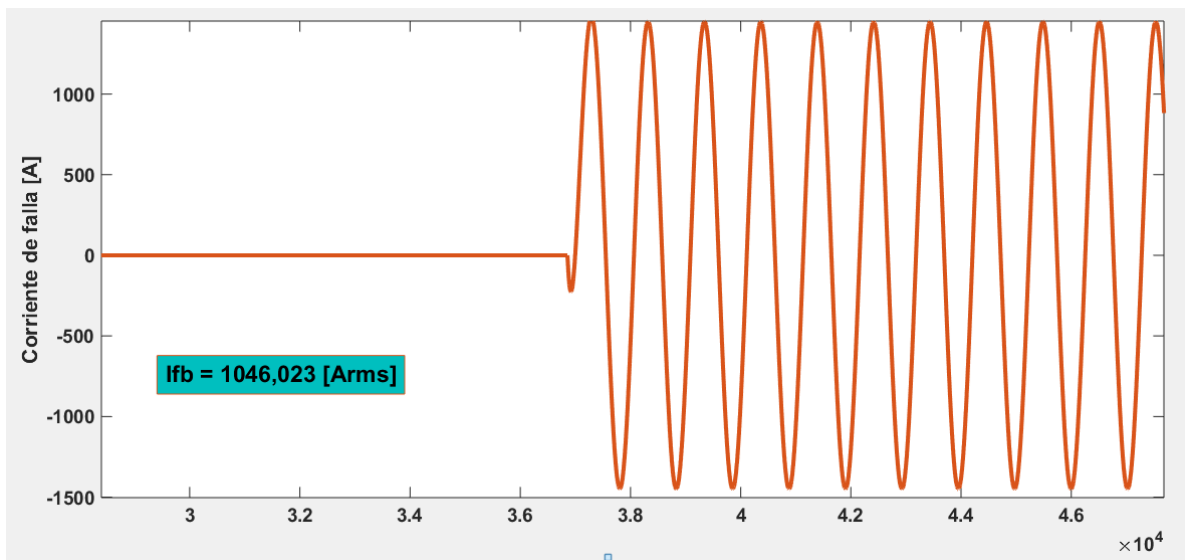
**Figura C143.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es monofásica entre los nodos 10 y 11



**Figura C144.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es monofásica entre los nodos 10 y 11



**Figura C145.** Gráfica de corriente de falla monofásica entre los nodos 10 y 11



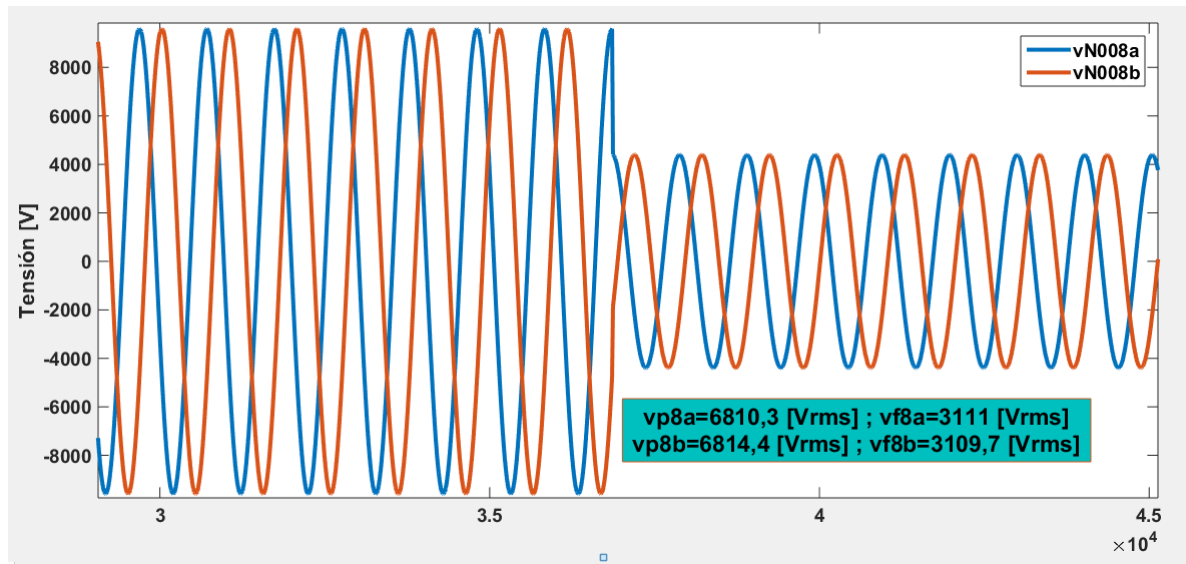
**Tabla C39.** Resultados falla monofásica entre los nodos 10 y 11

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
<b>B</b>	4278,491	1712,75405	0	1025,474403	919,3363968

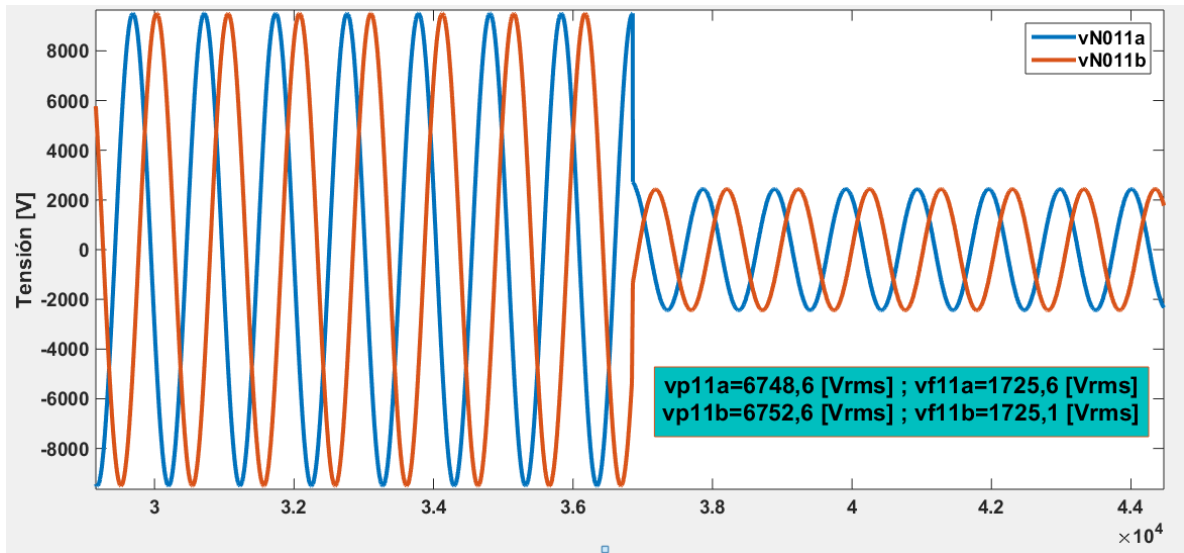
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
<b>B</b>	1409,4	1060,8	1119,3	1061,8	1084,7	1063,6	27,2403574	5,22648084	2,11118282	13,5637085

### C.10.5 Falla bifásica a tierra entre los nodos eléctricos 12 y 13

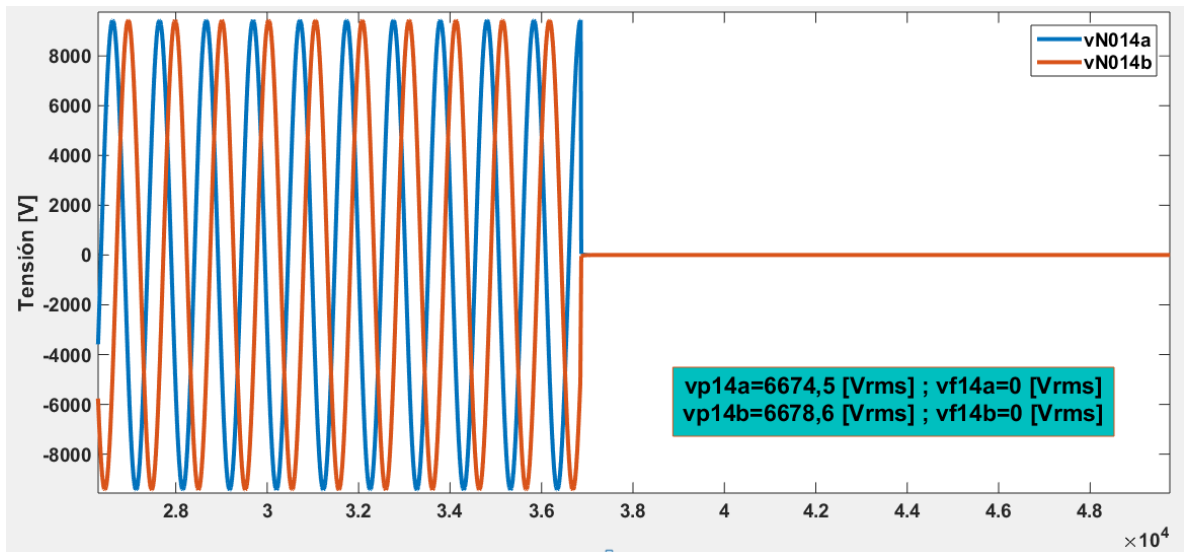
**Figura C146.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 8 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 12 y 13



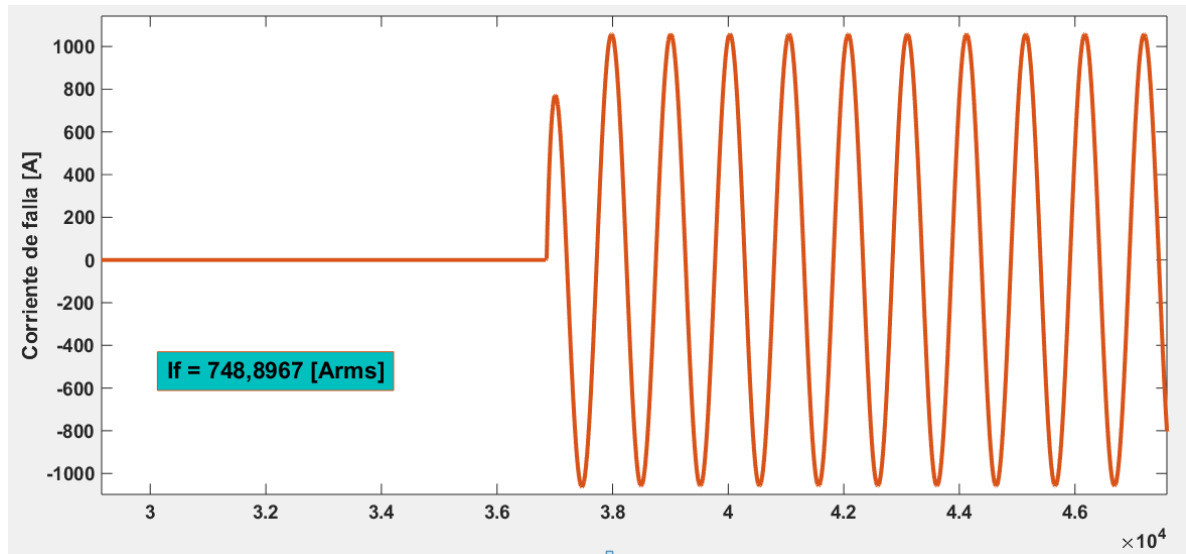
**Figura C147.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 12 y 13



**Figura C148.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 12 y 13



**Figura C149.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra entre los nodos 12 y 13



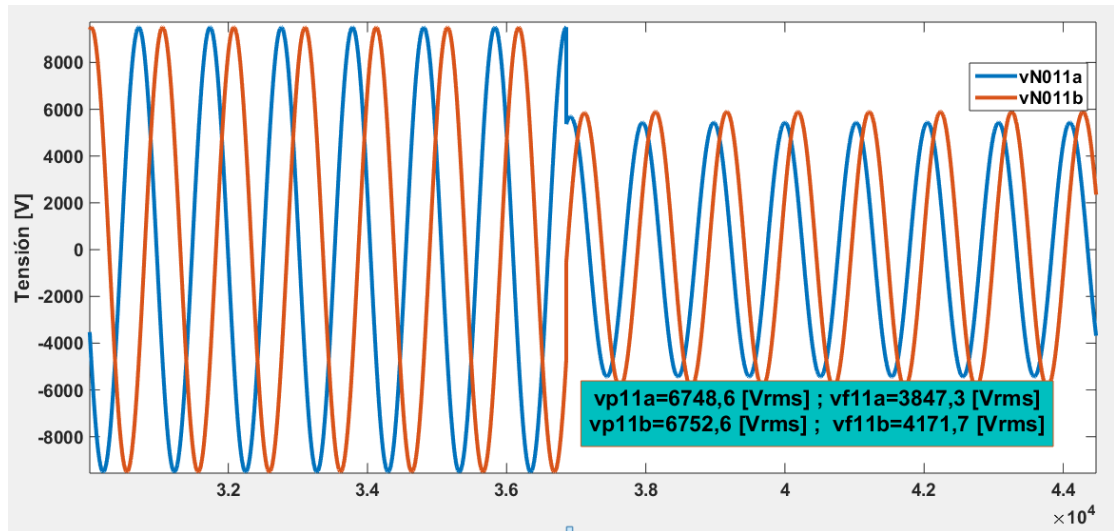
**Tabla C40.** Resultados falla bifásica a tierra entre los nodos 12 y 13

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_8$	$V_{11}$	$V_{14}$	$I_{11}$	$I_{14}$
A	3110,77486	1725,62339	0	743,4927206	488,2006724
B	3110,77486	1725,62339	0	743,4927206	488,2006724

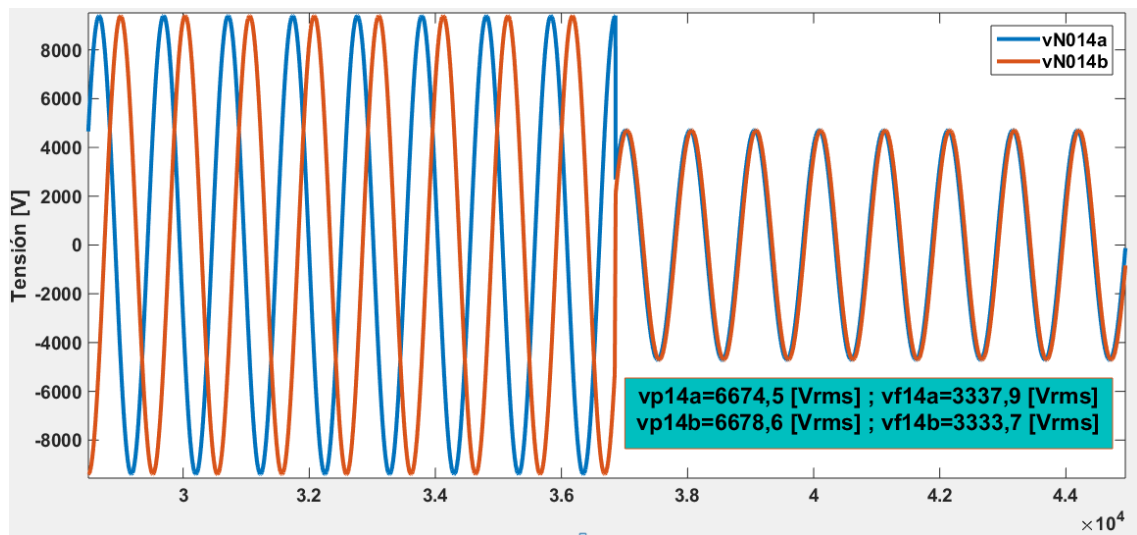
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]						Deltas			
	$I_{1411}$	$I_{1112}$	$I_{1412}$	$I_{1113}$	$I_{1413}$	$I_{1114}$	$\delta_{11}$	$\delta_{12}$	$\delta_{13}$	$\delta_{14}$
A	1023,4	765,917	801,4311	767,8825	728,4491	769,108	27,3507211	4,43133539	5,13534297	36,5237818
B	1024	766,6281	801,913	768,5954	728,8871	769,8221	27,393289	4,40009078	5,1663463	36,5826634
Resultado suma deltas $\delta_t$							54,7440101	8,83142618	10,3016893	73,1064452

### C.10.6 Falla bifásica entre los nodos eléctricos 14 y 15

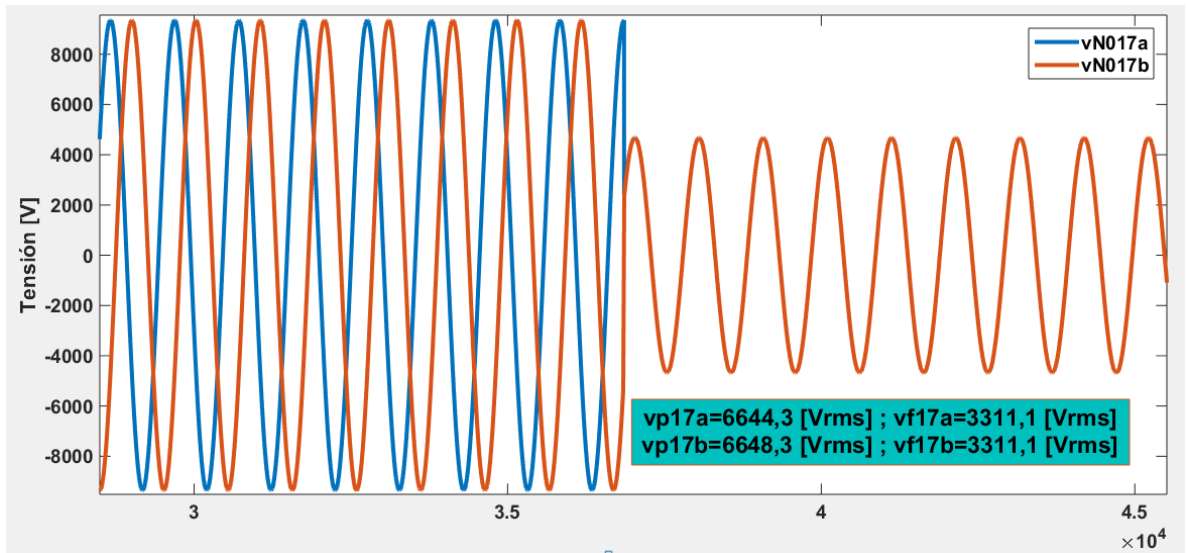
**Figura C150.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es bifásica entre los nodos 14 y 15



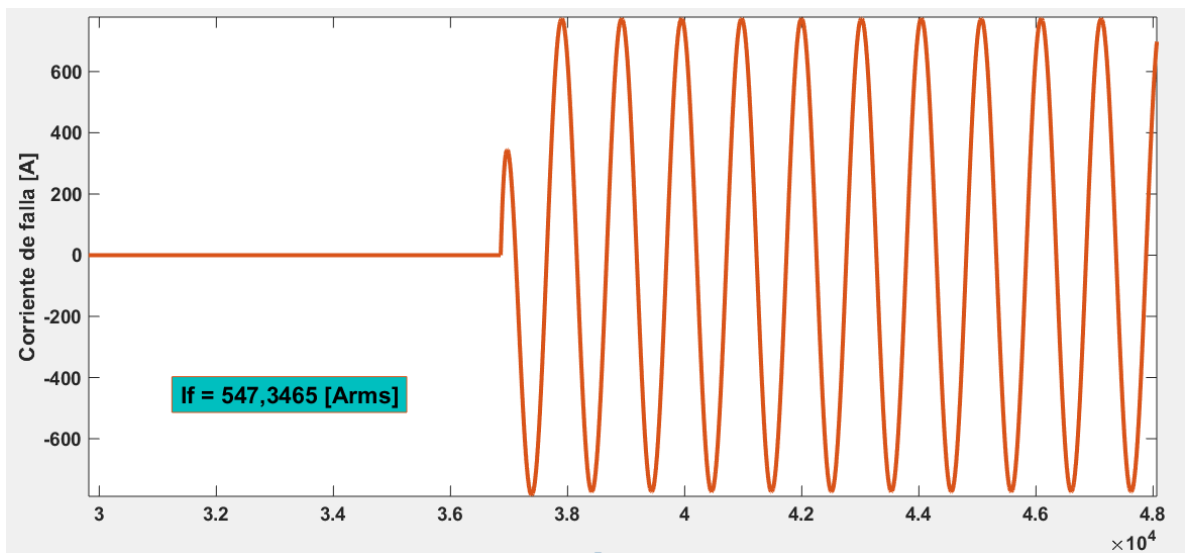
**Figura C151.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es bifásica entre los nodos 14 y 15



**Figura C152.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es bifásica entre los nodos 14 y 15



**Figura C153.** Gráfica de corriente de falla bifásica entre los nodos 14 y 15



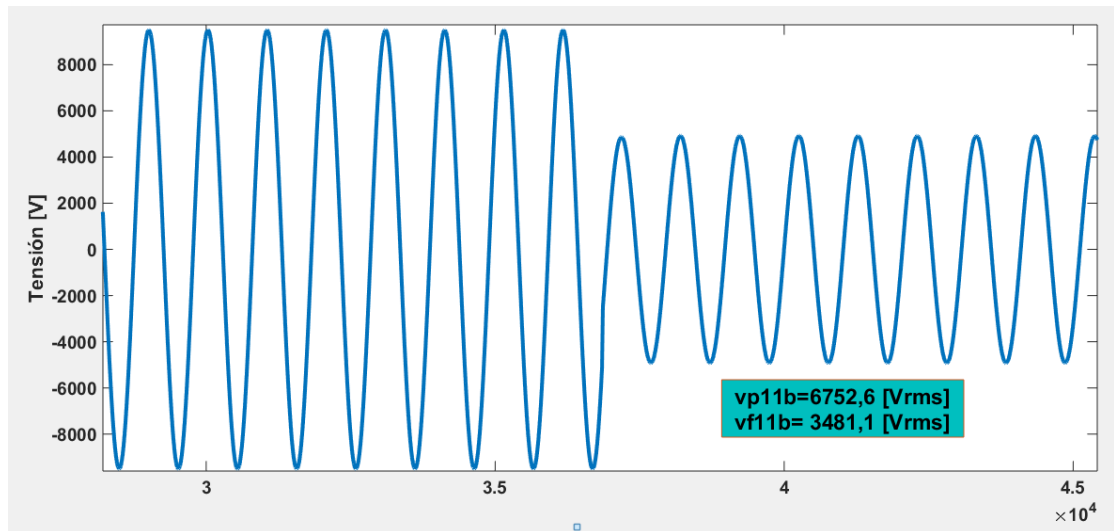
**Tabla C41.** Resultados falla bifásica entre los nodos 14 y 15

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>11</sub>	V <sub>14</sub>	V <sub>17</sub>	I <sub>14</sub>	I <sub>17</sub>
A	3846,02449	3336,90761	3310,24969	144,0356024	6,722818672
B	4172,14214	3332,94781	3310,24969	237,4186847	5,724203697

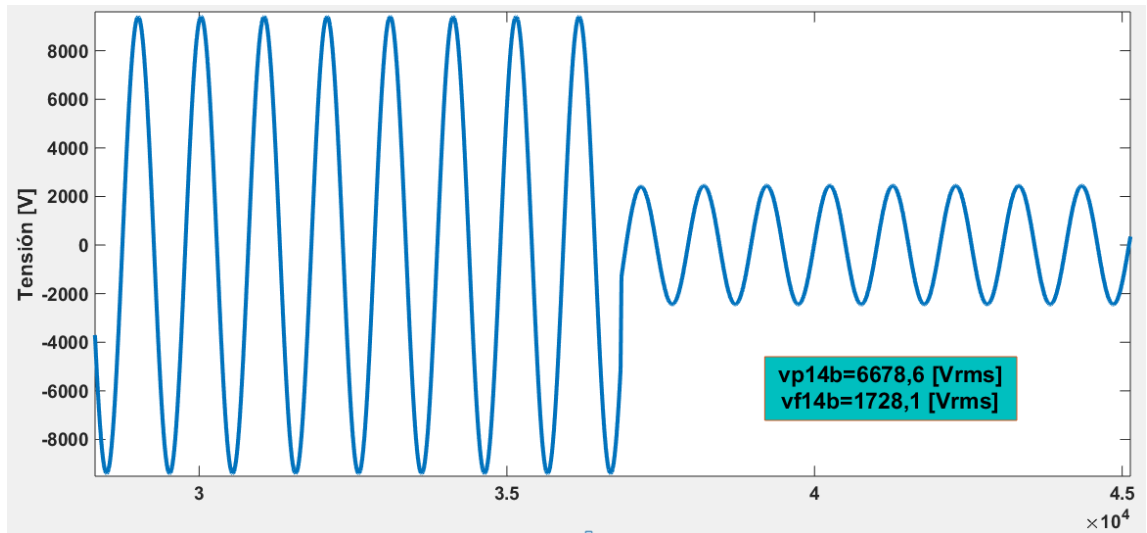
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>1714</sub>	I <sub>1415</sub>	I <sub>1715</sub>	I <sub>1416</sub>	I <sub>1716</sub>	I <sub>1417</sub>	δ <sub>14</sub>	δ <sub>15</sub>	δ <sub>16</sub>	δ <sub>17</sub>
A	335,5988	334,9356	307,3816	335,7096	258,2896	335,9398	57,0810139	8,22665611	23,0615985	97,9988026
B	336,002	335,7654	307,7509	336,5414	258,5999	336,772	29,3400978	8,34347434	23,1595578	98,3002733
Resultado suma deltas δ <sub>t</sub>							86,4211117	16,5701305	46,2211563	196,299076

### C.10.7 Falla monofásica entre los nodos eléctricos 16 y 17

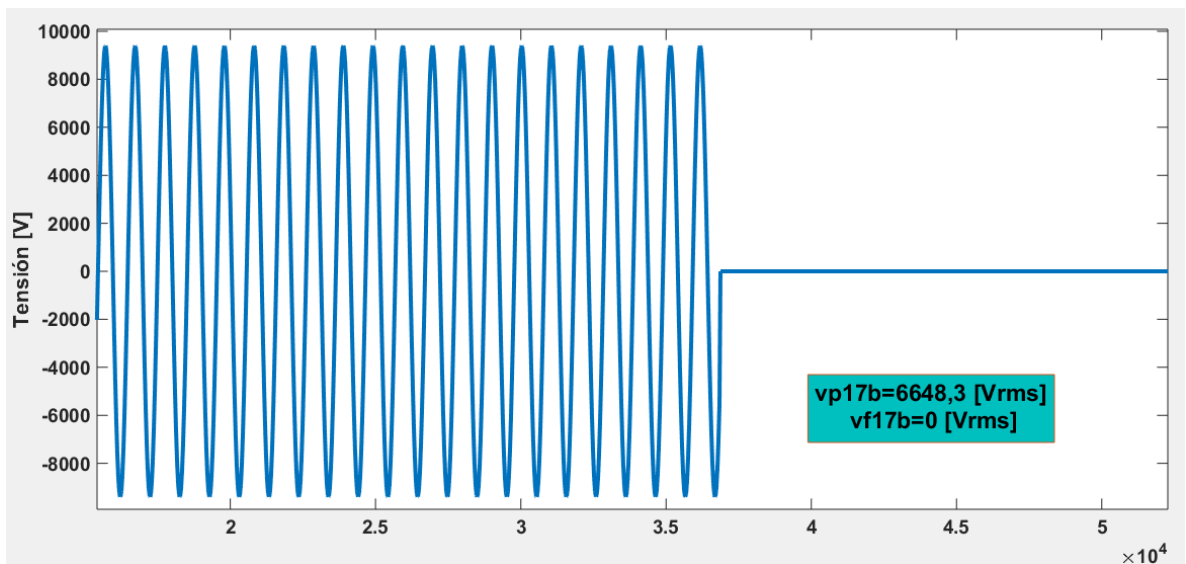
**Figura C154.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 11 cuando la falla es monofásica entre los nodos 16 y 17



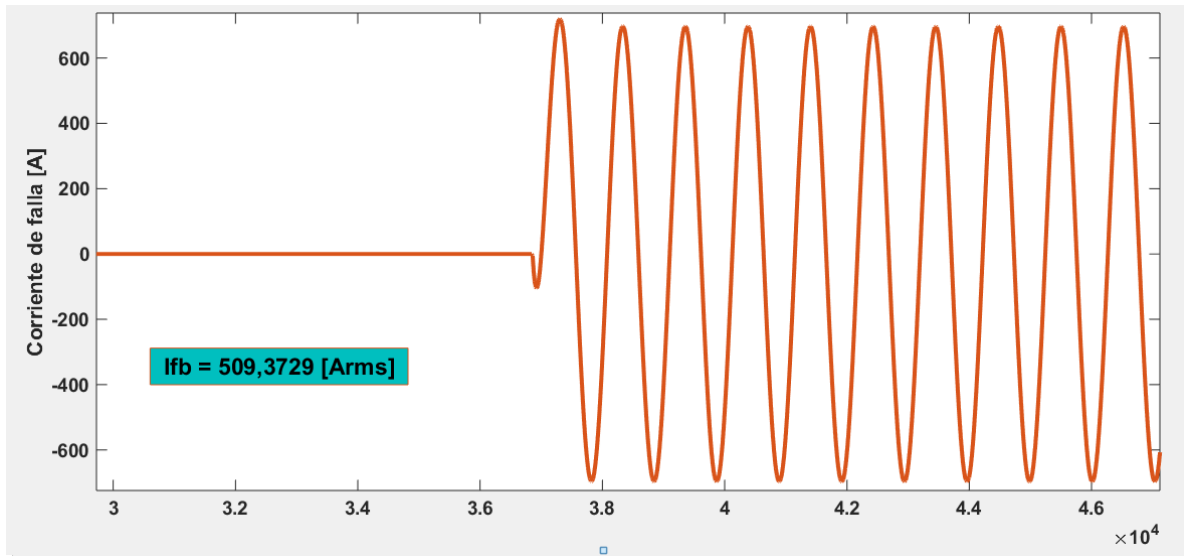
**Figura C155.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 14 cuando la falla es monofásica entre los nodos 16 y 17



**Figura C156.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 17 cuando la falla es monofásica entre los nodos 16 y 17



**Figura C157.** Gráfica de corriente de falla monofásica entre los nodos 16 y 17



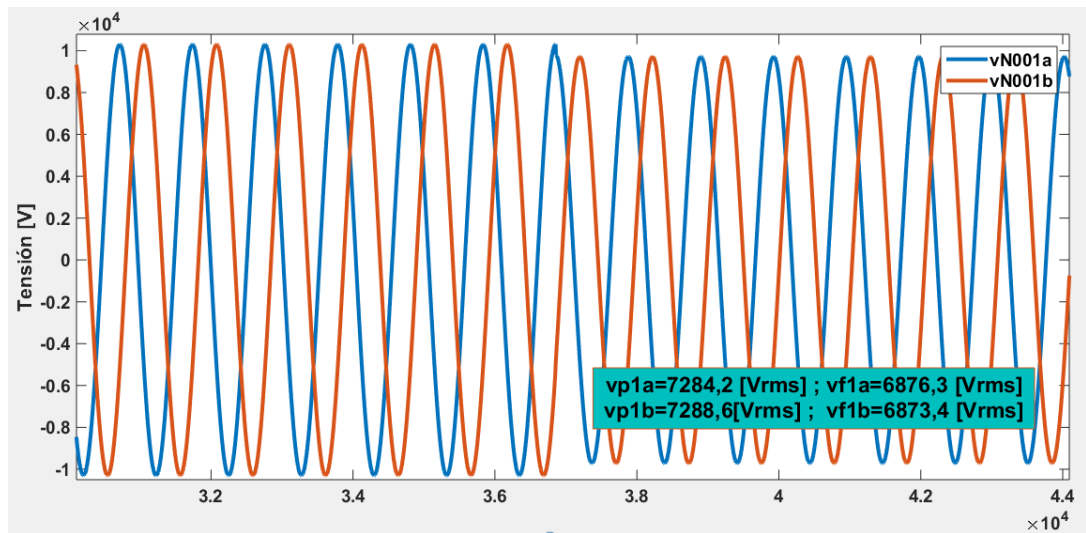
**Tabla C42.** Resultados falla monofásica entre los nodos 16 y 17

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>11</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>11</sub>
<b>B</b>	4278,491	1712,75405	0	1025,474403	919,3363968

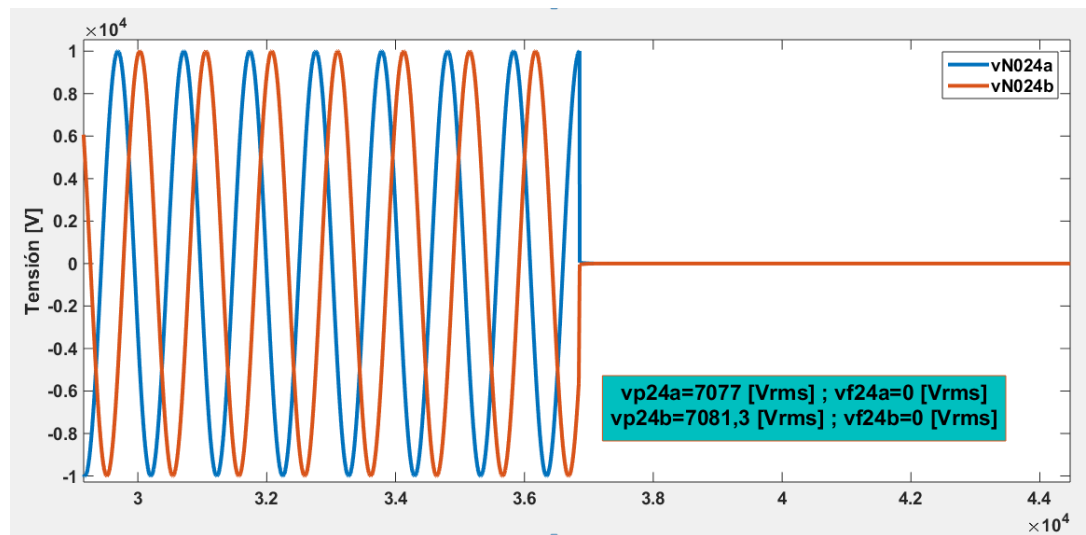
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]						Deltas			
	I <sub>118</sub>	I <sub>89</sub>	I <sub>119</sub>	I <sub>810</sub>	I <sub>1110</sub>	I <sub>811</sub>	δ <sub>8</sub>	δ <sub>9</sub>	δ <sub>10</sub>	δ <sub>11</sub>
<b>B</b>	1409,4	1060,8	1119,3	1061,8	1084,7	1063,6	27,2403574	5,22648084	2,11118282	13,5637085

### C.10.8 Falla bifásica a tierra entre los nodos eléctricos 22 y 23

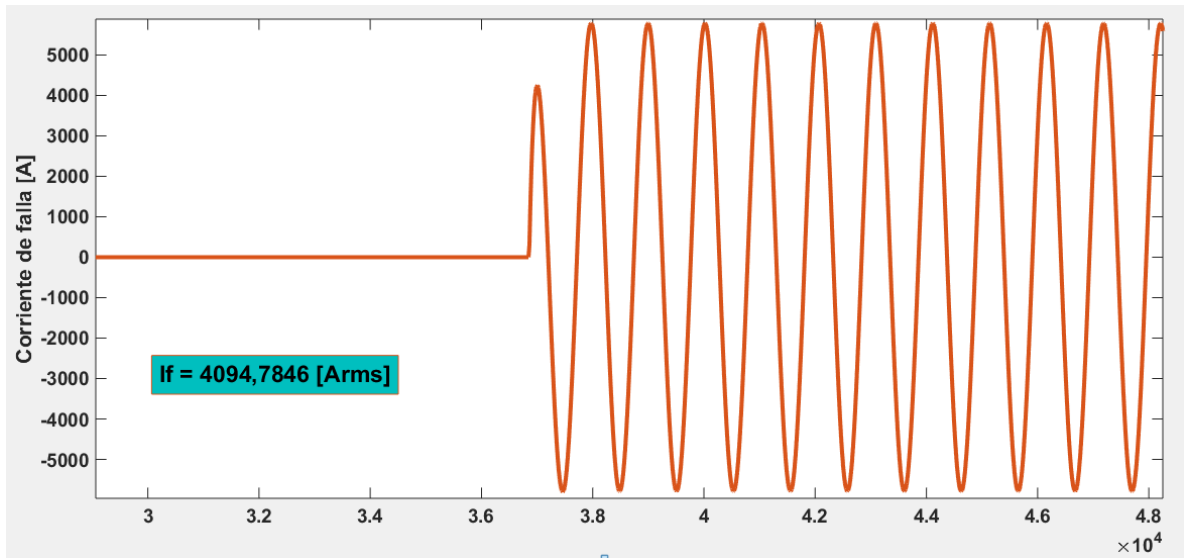
**Figura C158.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 22 y 23



**Figura C159.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 24 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 22 y 23



**Figura C160.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra entre los nodos 22 y 23



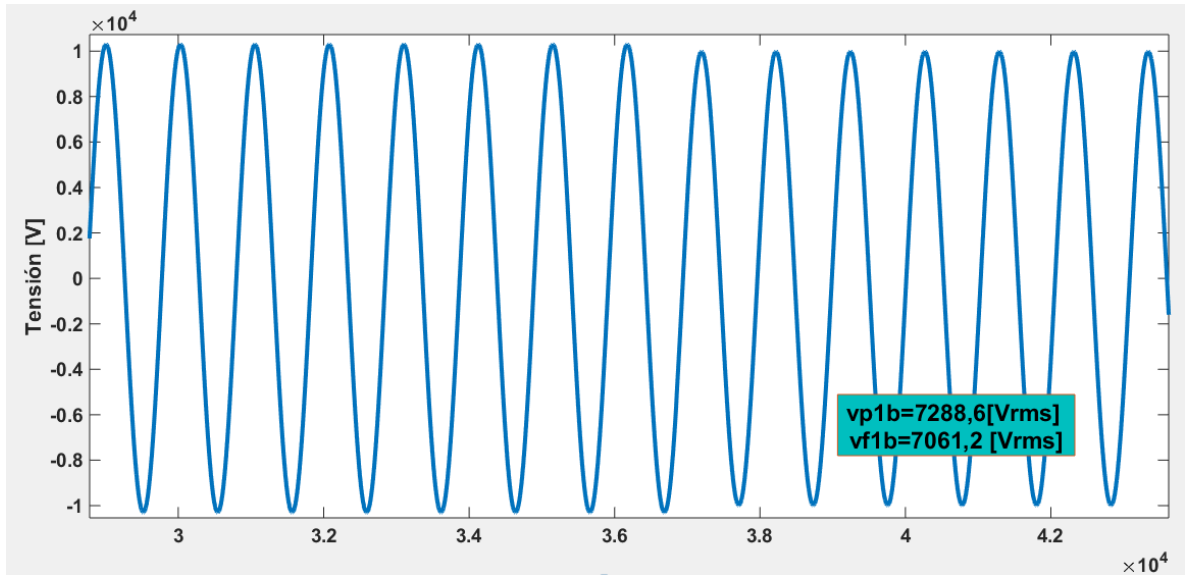
**Tabla C43.** Resultados falla bifásica a tierra entre los nodos 22 y 23

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_f$	$V_1$	$V_{24}$	$I_1$	$I_{24}$
A	5967,98123	6875,83563	0	8772,557195	2998,253868
B	5967,98123	6875,76492	0	8771,873921	2998,223034

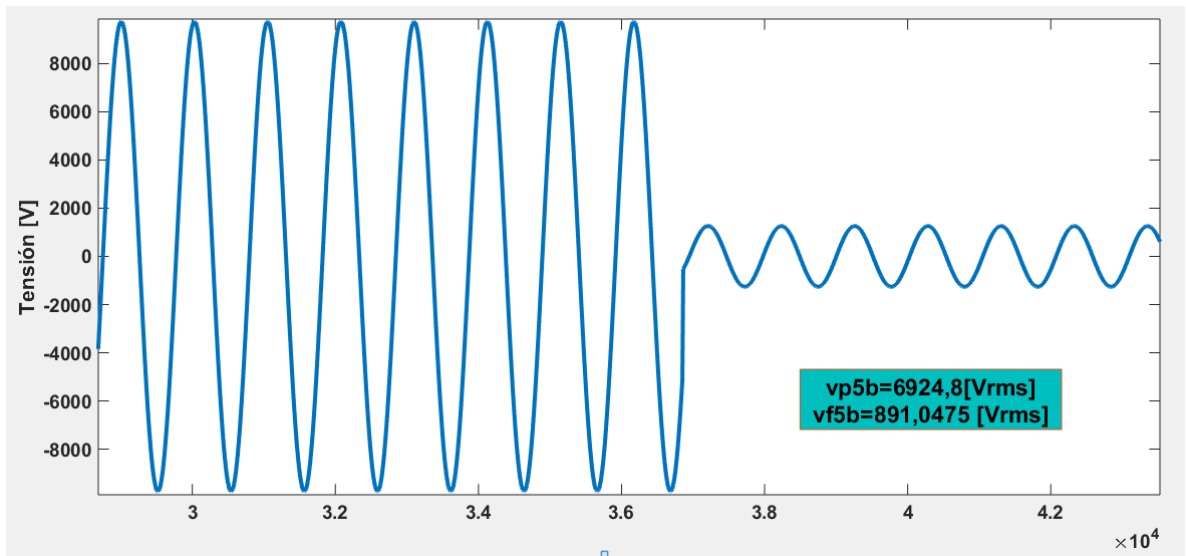
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{241}$	$I_{12}$	$I_{242}$	$I_{122}$	$I_{2422}$	$I_{123}$	$I_{2423}$	$I_{124}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{22}$	$\delta_{23}$	$\delta_{24}$
A	70648	4012,7	11123	4026,9	6046,7	4057,4	3091,5	4071,9	87,5827239	63,924301	33,403344	23,8058855	26,3672028
B	70691	4084,7	11129	4099,1	6050,4	4130,2	3093,4	4145	87,5912437	63,2967922	32,2507603	25,1029006	27,6665131
Resultado suma deltas $\delta_t$									175,173968	127,221093	65,6541043	48,9087861	54,0337159

### C.10.9 Falla monofásica entre los nodos eléctricos 25 y 26

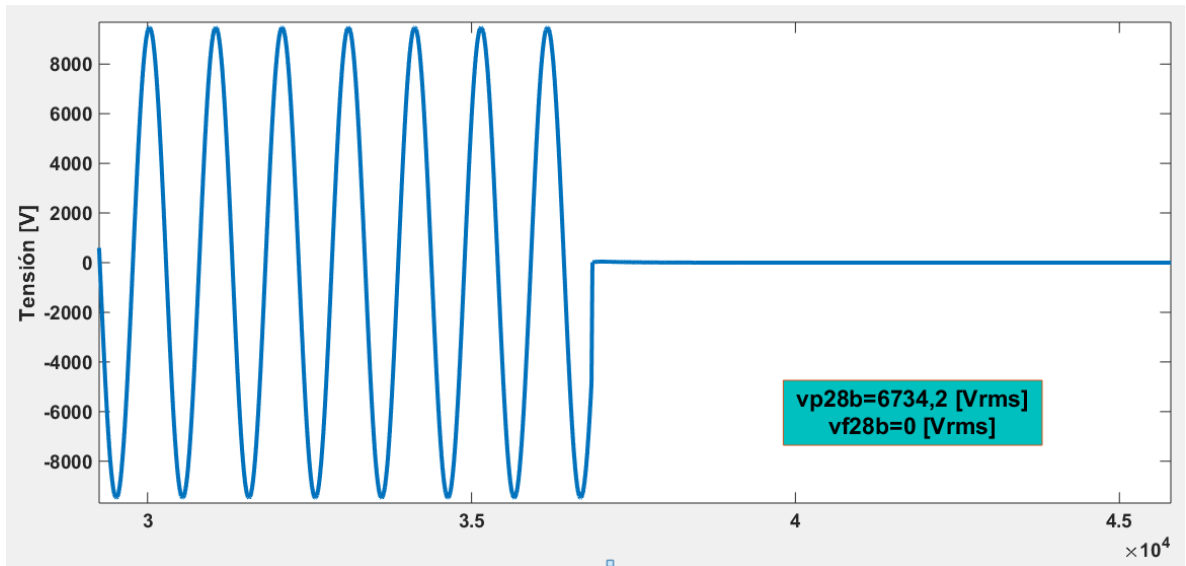
**Figura C161.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es monofásica entre los nodos 25 y 26



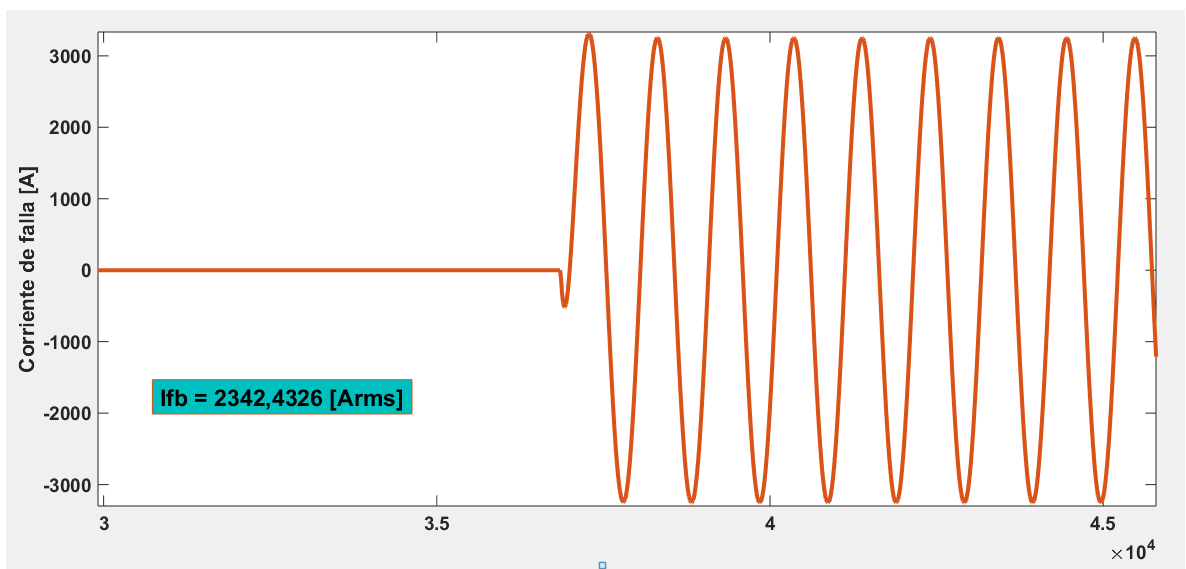
**Figura C162.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es monofásica entre los nodos 25 y 26



**Figura C163.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es monofásica entre los nodos 25 y 26



**Figura C164.** Gráfica de corriente de falla monofásica entre los nodos 25 y 26



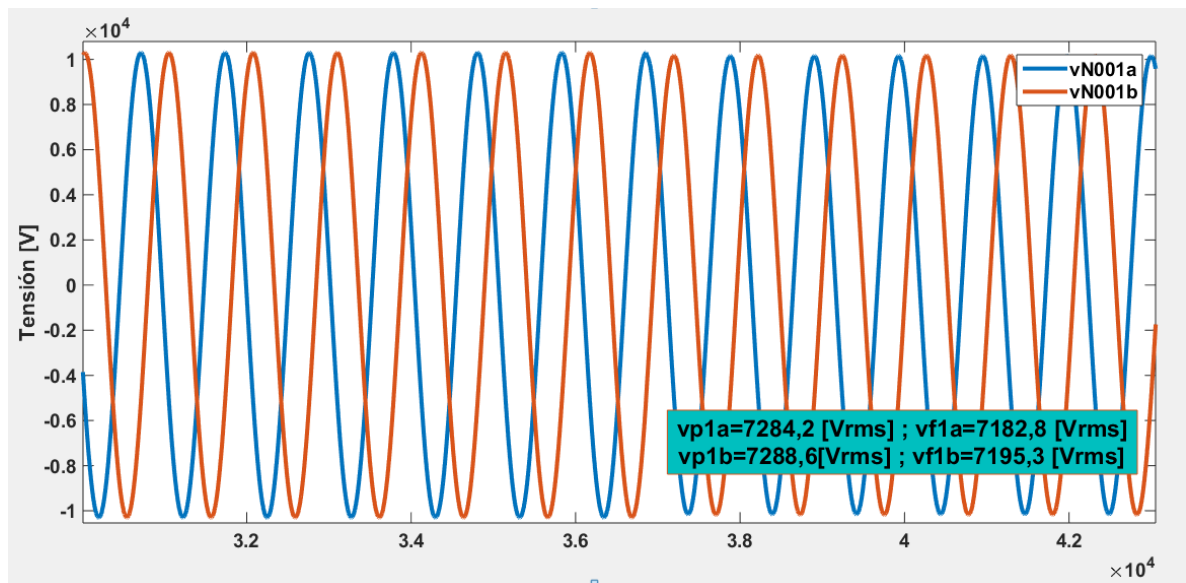
**Tabla C44.** Resultados falla monofásica entre los nodos 25 y 26

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>1</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>28</sub>
<b>B</b>	7063,64319	891,378808	0	3656,929521	296,0132596

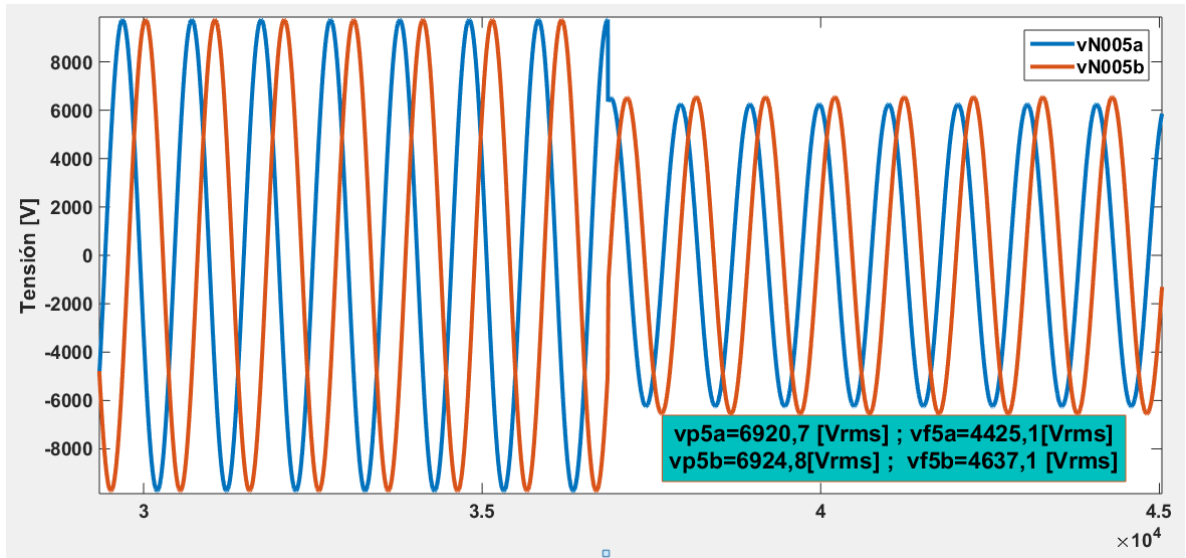
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>285</sub>	I <sub>525</sub>	I <sub>2825</sub>	I <sub>526</sub>	I <sub>2826</sub>	I <sub>527</sub>	I <sub>2827</sub>	I <sub>528</sub>	δ <sub>5</sub>	δ <sub>25</sub>	δ <sub>26</sub>	δ <sub>27</sub>	δ <sub>28</sub>
<b>B</b>	2832,2	2471,7	2596,3	2479	2324,6	2511,9	1591,2	2536,3	22,5525134	4,79913723	6,22831787	36,6535292	88,3289335

### C.10.10 Falla bifásica entre los nodos eléctricos 27 y 28

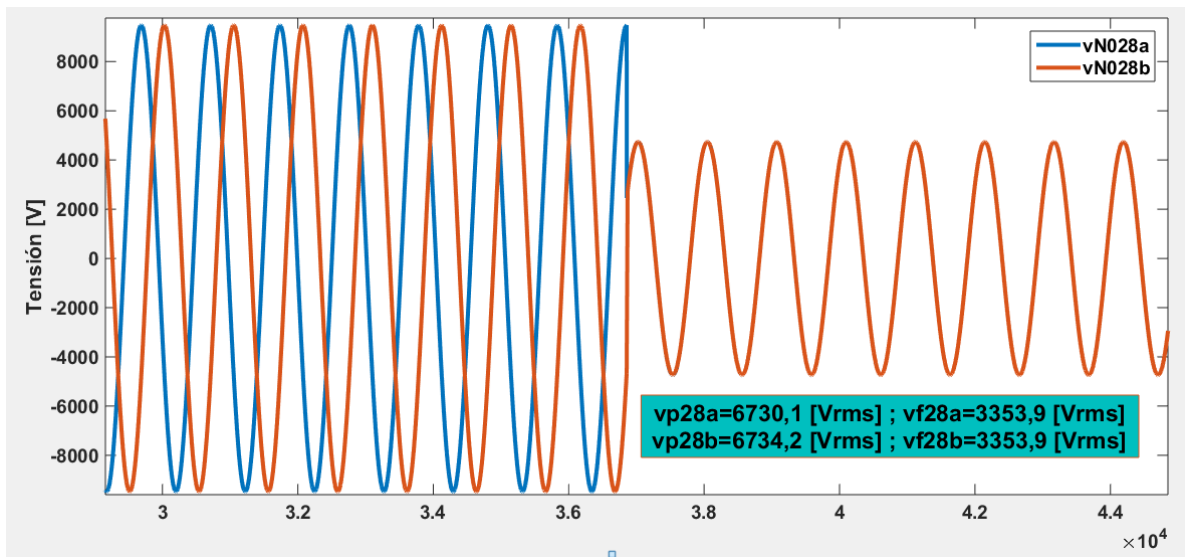
**Figura C165.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 1 cuando la falla es bifásica entre los nodos 27 y 28



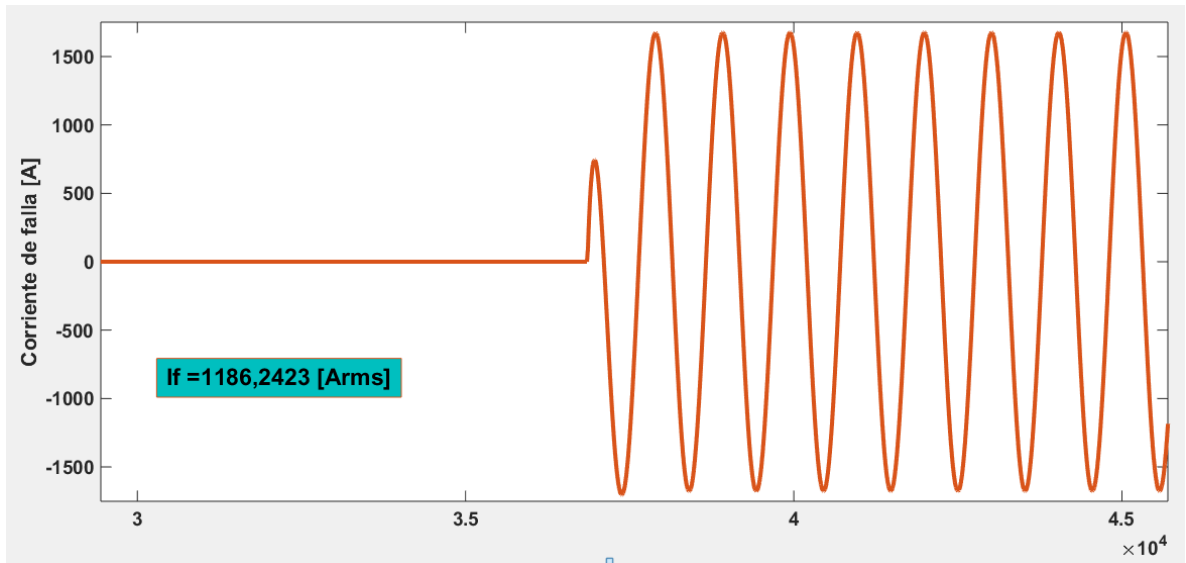
**Figura C166.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica entre los nodos 27 y 28



**Figura C167.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica entre los nodos 27 y 28



**Figura C168.** Gráfica de corriente de falla bifásica entre los nodos 27 y 28



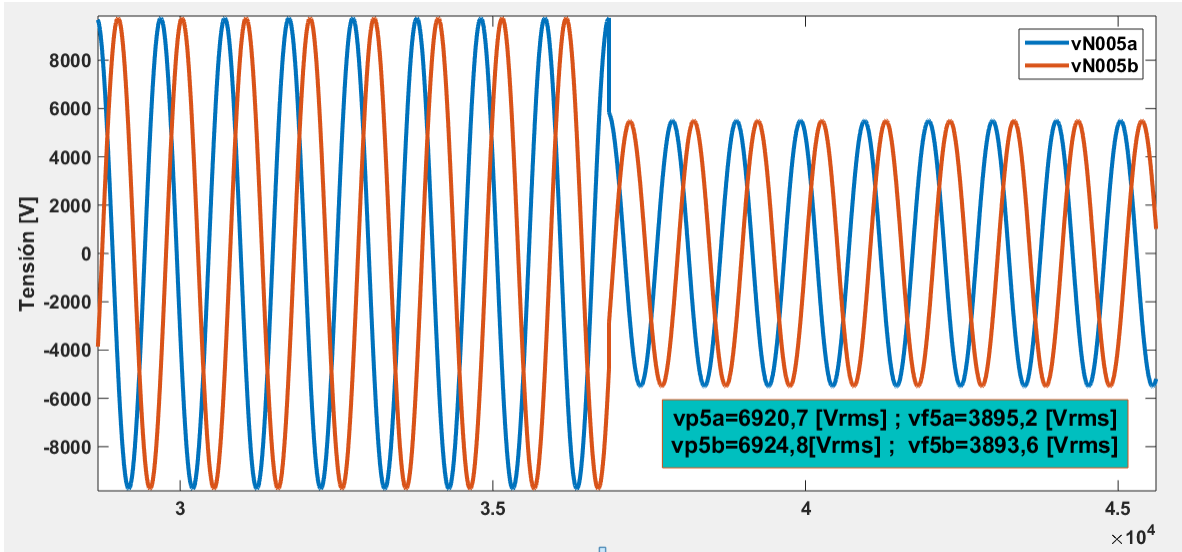
**Tabla C45.** Resultados falla bifásica entre los nodos 27 y 28

Fase	Tensiones de falla [ $V_{rms}$ ]			Corrientes de referencia [ $A_{rms}$ ]	
	$V_1$	$V_5$	$V_{28}$	$I_5$	$I_{28}$
<b>A</b>	7182,08358	4423,80144	3352,95894	1634,220884	355,610408
<b>B</b>	7197,63993	4637,98409	3352,95894	1516,539217	426,737186

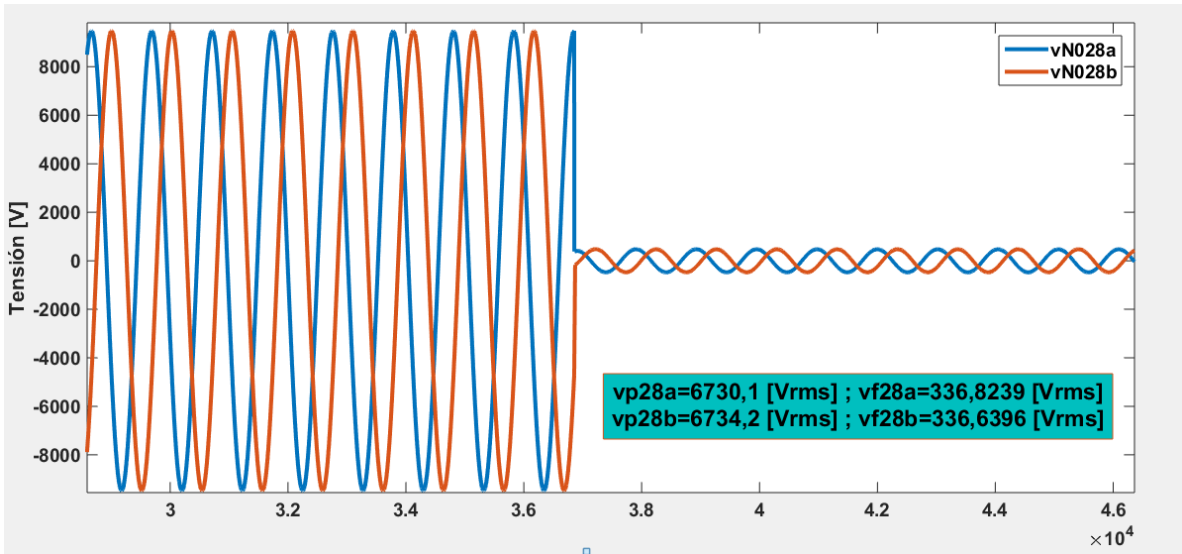
Fase	Corrientes calculadas [ $A_{rms}$ ]								Deltas				
	$I_{285}$	$I_{275}$	$I_{2825}$	$I_{276}$	$I_{2826}$	$I_{277}$	$I_{2827}$	$I_{278}$	$\delta_5$	$\delta_{25}$	$\delta_{26}$	$\delta_{27}$	$\delta_{28}$
<b>A</b>	1414,4	1015,7	1296,6	1018,7	1160,9	1032,3	794,6259	1042,2	13,4511122	21,6643529	12,2491171	23,0237431	65,8788708
<b>B</b>	1416,1	930,2	1298,1	932,9	1162,3	945,3	795,5914	954,5	6,62292251	28,3414221	19,7367289	15,8371522	55,2920706
Resultado suma deltas $\delta_r$									20,0740347	50,005775	31,985846	38,8608953	121,170941

### C.10.11 Falla bifásica a tierra entre los nodos eléctricos 28 y 29

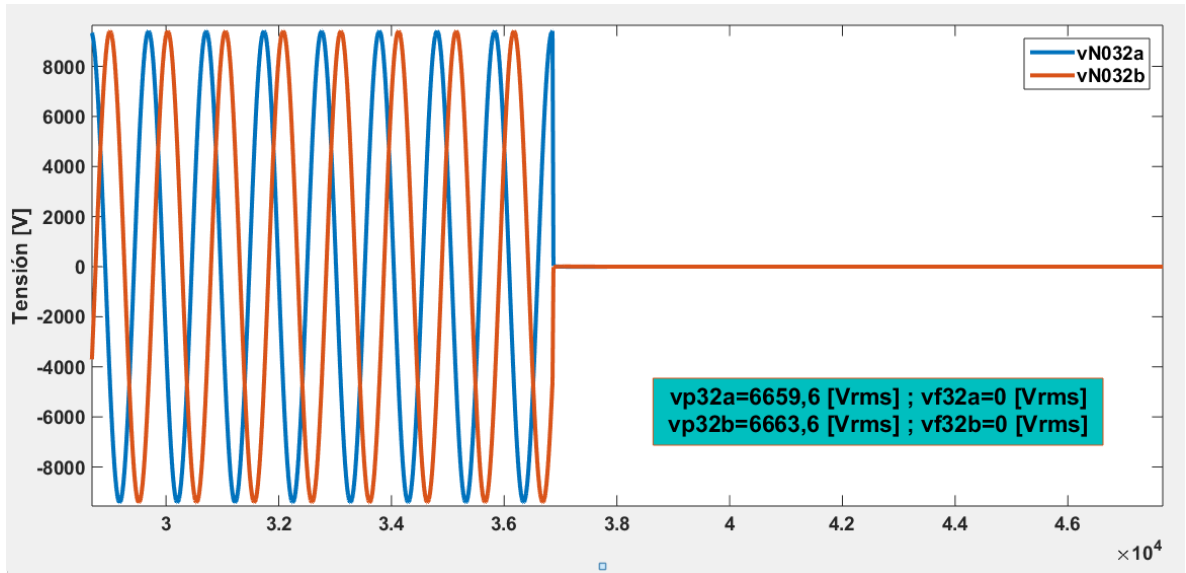
**Figura C169.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 28 y 29



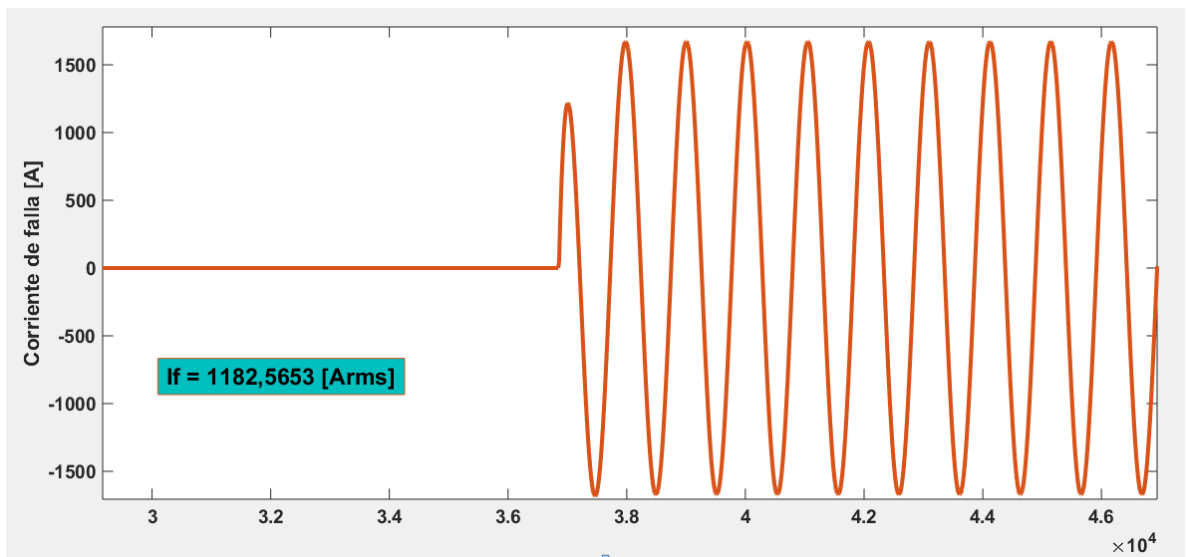
**Figura C170.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 28 y 29



**Figura C171.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es bifásica a tierra entre los nodos 28 y 29



**Figura C172.** Gráfica de corriente de falla bifásica a tierra entre los nodos 28 y 29



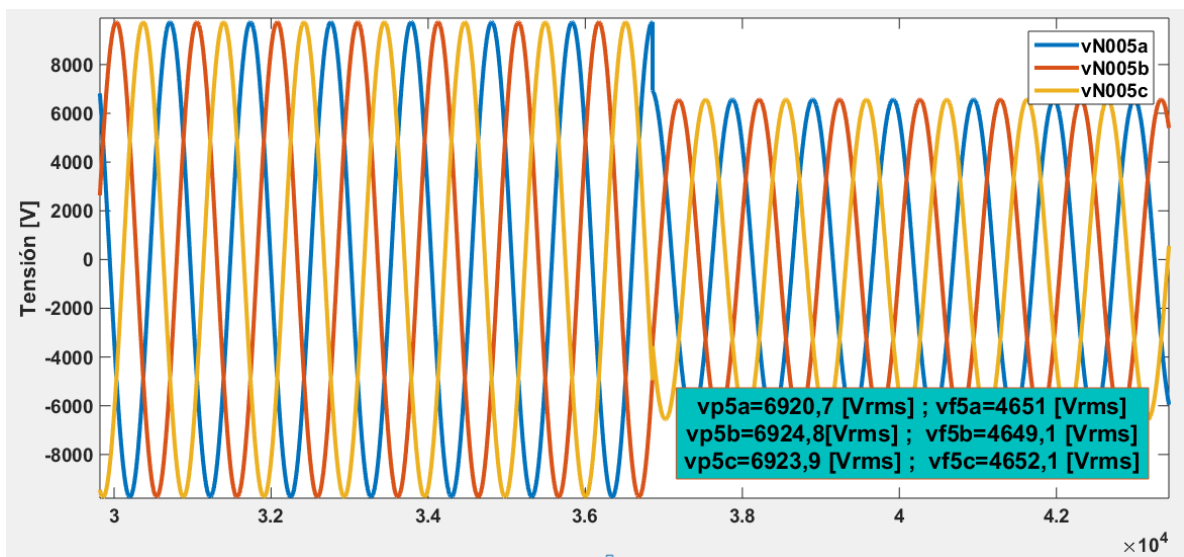
**Tabla C46.** Resultados falla bifásica a tierra entre los nodos 28 y 29

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [A <sub>rms</sub> ]	
	V <sub>5</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>32</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>32</sub>
<b>A</b>	3894,95628	336,762928	0	1181,621555	112,1380595
<b>B</b>	3894,95628	336,762504	0	1181,621695	112,1379183

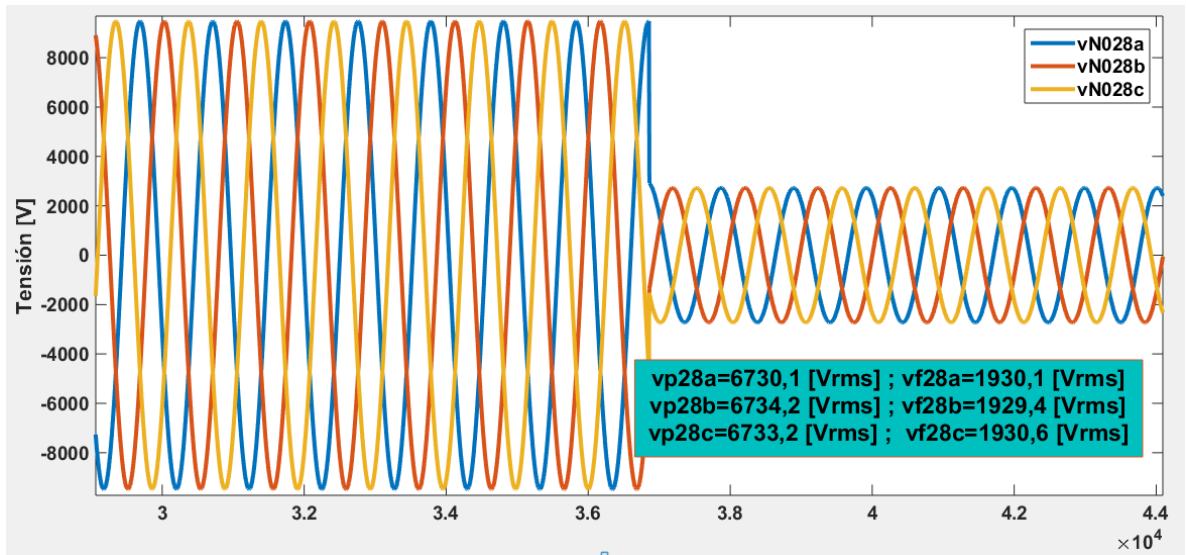
Fase	Corrientes calculadas [A <sub>rms</sub> ]								Deltas				
	I <sub>3228</sub>	I <sub>2829</sub>	I <sub>3229</sub>	I <sub>2830</sub>	I <sub>3230</sub>	I <sub>2831</sub>	I <sub>3231</sub>	I <sub>2832</sub>	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
<b>A</b>	1282,4	1223,1	1162,3	1229,1	943,9499	1230,5	886,0937	1230,9	7,85858121	4,97097539	23,1999105	27,9891345	90,8897506
<b>B</b>	1283,2	1223,9	1163	1229,9	944,5226	1231,3	886,6313	1231,7	7,916015	4,97589672	23,2033011	27,9922602	90,8956793
Resultado suma deltas δ:									15,7745962	9,94687211	46,4032116	55,9813947	181,78543

### C.10.12 Falla trifásica entre los nodos eléctricos 30 y 31

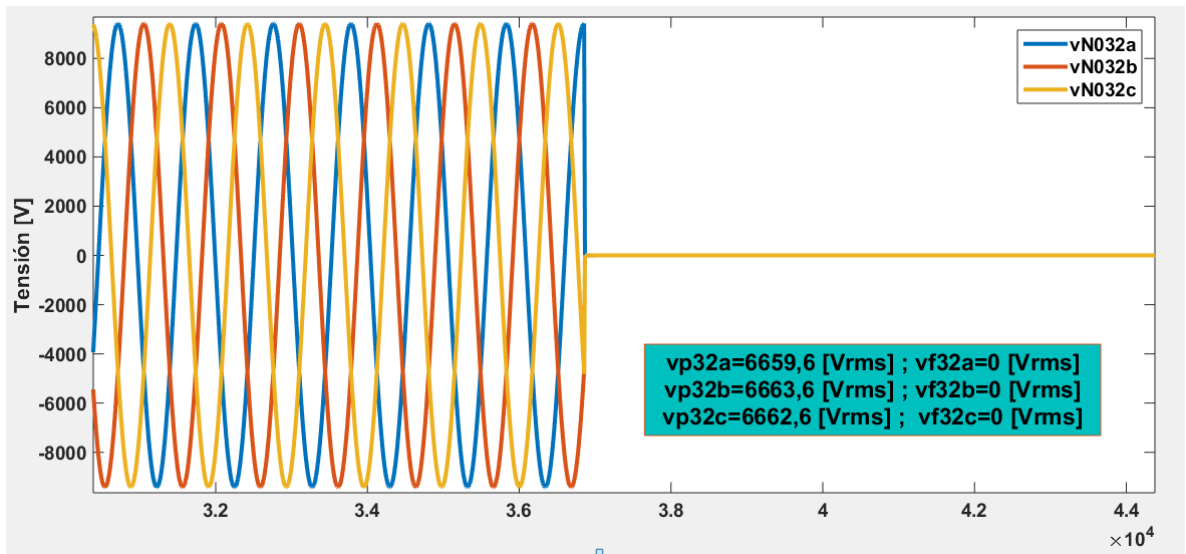
**Figura C173.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 5 cuando la falla es trifásica entre los nodos 30 y 31



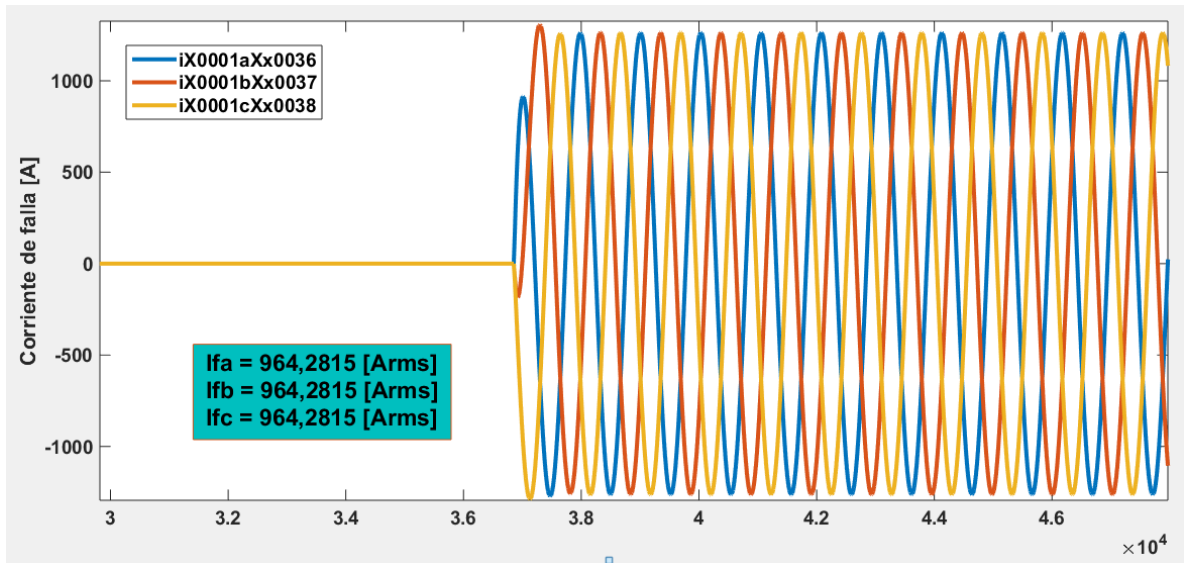
**Figura C174.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 28 cuando la falla es trifásica entre los nodos 30 y 31



**Figura C175.** Gráfica de tensión suministrada por el medidor ubicado en el nodo 32 cuando la falla es trifásica entre los nodos 30 y 31



**Figura C176.** Gráfica de corriente de falla trifásica entre los nodos 30 y 31



**Tabla C47.** Resultados falla trifásica entre los nodos 30 y 31

Fase	Tensiones de falla [V <sub>rms</sub> ]			Corrientes de referencia [Arms]	
	V <sub>s</sub>	V <sub>28</sub>	V <sub>32</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>32</sub>
A	4650,71201	1929,97725	0	903,5143733	642,6595258
B	4650,71201	1929,97725	0	903,5143733	642,6595258
C	4650,71201	1929,97725	0	903,5143733	642,6595258

Fase	Corrientes calculadas [Arms]							Deltas					
	I <sub>3228</sub>	I <sub>2829</sub>	I <sub>3229</sub>	I <sub>2830</sub>	I <sub>3230</sub>	I <sub>2831</sub>	I <sub>3231</sub>	I <sub>2832</sub>	δ <sub>28</sub>	δ <sub>29</sub>	δ <sub>30</sub>	δ <sub>31</sub>	δ <sub>32</sub>
A	1282,4	917,0164	1162,3	921,5461	943,9499	922,5414	886,0937	922,8653	29,5450426	21,1032952	2,37340986	3,95079289	30,3625864
B	1283,2	917,9352	1163	922,4696	944,5226	923,4659	886,6313	923,79	29,5889672	21,0717799	2,33483032	3,98873418	30,4322924
C	1283	917,5132	1162,8	922,0454	944,3854	923,0413	886,5024	923,3653	29,5779912	21,094496	2,36555965	3,9585336	30,4002949
Resultado suma deltas δ:									88,712001	63,2695711	7,07379983	11,8980607	91,1951737