

**COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MOTORES DE INDUCCIÓN ANTE
CORTOCIRCUITO Y SU IMPACTO EN REDES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN.**

**LUIS EDUARD CORREAVELASQUEZ
NEYSON ADRIAN MARTINEZ ESCUDERO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

**COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MOTORES DE INDUCCIÓN ANTE
CORTOCIRCUITO Y SU IMPACTO EN REDES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN.**

**LUIS EDUARD CORREAVELASQUEZ
NEYSON ADRIAN MARTINEZ ESCUDERO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**Asesor técnico
Santiago Bustamante Mesa**

**Asesor metodológico
Juan Pablo Mesa Beleño**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

AGRADECIMIENTOS

Queridos familiares, amigos, profesores y compañeros.

Hoy, al culminar una etapa tan importante en mi vida, quiero tomar un momento para expresarles lo profundamente agradecido que estoy por su apoyo incondicional y su constante compañía a lo largo de este camino. El viaje hacia la presentación de mi tesis fue un desafío lleno de horas de esfuerzo, dudas y momentos de incertidumbre, pero también estuvo lleno de fortaleza y esperanza gracias a cada uno de ustedes.

A lo largo de este proceso, su paciencia y comprensión me dieron la calma que tanto necesitaba, y sus palabras de aliento me recordaron siempre el porqué de mis esfuerzos. Aún en los momentos en que me sentía agotado o dudaba de mí mismo, ustedes estuvieron ahí, dándome el ánimo y la motivación que muchas veces fueron la chispa que me hizo continuar.

Gracias por escucharme, por sus abrazos reconfortantes, y por creer en mí aun cuando yo no lo hacía. Cada logro que hoy celebro también es un reflejo de su amor y de su fe en mí, y sin ustedes, este momento no tendría el mismo valor.

Este logro es tan suyo como mío, y mi gratitud por su apoyo es inmensa y eterna.

Con todo mi cariño y agradecimiento,

Luis Eduard Correa Velásquez

Gracias a mi familia y amigos, que siempre estuvieron presentes en cada etapa este largo recorrido que se ve enmarcado con la finalización de este gran trabajo del cual me siento orgulloso.

Gracias a los asesores Santiago Bustamante Mesa y Juan Pablo Mesa Beleño.

Juan pablo asesor metodológico, siempre contando con la mejor disposición para sacar este proyecto adelante, no solo brindando el aporte que le compete académicamente, sino también apoyando en los momentos en los que se pensó tirar la toalla, lo hace una gran persona y un gran profesional, sus conocimientos aportaron mucho a este trabajo y más aún a mi crecimiento personal y profesional.

Santiago Bustamante Mesa, asesor técnico, alguien servicial, muy profesional en todos sus aspectos, las reuniones sostenidas, quedaron en marcadas por brindar ese apoyo técnico y seguir el rumbo en la continuidad de esta investigación. Su profesionalismo al evaluar este trabajo, es algo que me deja excepcionalmente satisfecho, al saber que se pudieron cumplir los objetivos.

Neyson Adrian Martinez

Resumen

En presencia de una falla los motores de inducción experimentan una caída de tensión severa, y la energía magnética almacenada en el estator fluiría hacia la falla durante un corto período de tiempo. La contribución a la corriente de falla aportada por los motores de inducción se calcula de acuerdo con diferentes métodos con simplificaciones que no dan cálculos precisos. En esta investigación se evaluó el comportamiento dinámico de los motores de inducción ante cortocircuitos y se determinó su impacto en redes industriales de media y baja tensión. Se modeló en DigSilent la red eléctrica industrial propuesta por la norma IEEE Std 399-1997, se realizaron simulaciones de flujo de carga para calibrar el modelo, se escogieron cuatro motores, dos en media tensión y dos en baja tensión, se evaluó su dinámica en el arranque, ante fallas monofásicas y trifásicas en las barras donde se conectan y se calculó el aporte de los motores a las corrientes de falla. Los resultados del flujo de potencia comparado con el presentado en la norma IEEE Std 399-1997 muestran una diferencia inferior al 2,5%. Ante una falla trifásica en las barras de media tensión, cada motor aporta 10,66% del total de la corriente de falla, y llega a ser cero en 0,183 s. Ante una falla monofásica, el aporte es de 6,63% siendo persistente en el tiempo. Para las barras de baja tensión, ante una falla trifásica, el aporte de los motores fue del 44,43% llegando a ser cero después de 0,4s, mientras que, para fallas monofásicas, el aporte de los motores a la falla fue de 27,43%.

Abstract

In the presence of a fault, induction motors experience a severe voltage drop, and the magnetic energy stored in the stator will flow towards the fault for a short period of time. The contribution of induction motors to fault current is calculated according to different methods, using simplifications that do not yield precise results. In this study, the dynamic behavior of induction motors under short-circuits was evaluated, and their impact on medium and low voltage industrial networks was determined. The industrial electrical network proposed by IEEE Std 399-1997 was modeled in DIgSilent, load flow simulations were carry out to calibrate the model, and four motors were selected—two in medium voltage and two in low voltage. The dynamics of these motors were assessed during startup, under single-phase and three-phase faults at the buses to which they are connected, and the motors' contributions to fault currents were calculated. The power flow results, compared with those presented in IEEE Std 399-1997, show a difference of less than 2.5%. In the event of a three-phase fault on medium voltage buses, each motor contributes 10.66% of the total fault current, reaching zero in 0.183 s. For a single-phase fault, the contribution is 6.63%, persistently over-time. For low voltage buses, in the case of a three-phase fault, the motor contribution was 44.43%, reaching zero after 0.4 s, while for single-phase faults, the motor contribution to the fault was 27.43%.

Contenido

1	Introducción.....	10
2	Planteamiento del problema	12
2.1	Descripción	12
2.2	Formulación	14
3	Justificación	15
4	Objetivos.....	17
4.1	Objetivo general.....	17
4.2	Objetivos específicos	17
5	Referentes teóricos	18
5.1	Teoría del cortocircuito.....	18
5.1.1	Definición y causas de cortocircuito	18
5.1.2	Características de los cortocircuitos.	19
5.1.3	Consecuencias de los cortocircuitos	20
5.2	Descripción de una corriente de cortocircuito	22
5.2.1	Cálculos de cortocircuito	22
5.2.2	Corriente total de cortocircuito.....	24
5.3	Contribución de motores de inducción al cortocircuito.....	26
5.3.1	El impacto del motor de inducción en la corriente de cortocircuito.....	26
5.3.2	Contribución del motor durante la falla de Cortocircuito trifásico	27
5.3.3	Cálculo de Corrientes de Cortocircuito corriente de compensación	27
5.3.4	Naturaleza de las contribuciones del motor de inducción	28
5.3.5	Grandes motores de inducción con contribuciones prolongadas.....	30
6	Resultados de las Simulaciones	31
6.1	Descripción de la red	31

6.2	Resultados de Flujo de Carga	34
6.3	Análisis dinámico del arranque de los motores	39
6.4	Resultados del aporte al Cortocircuito	42
6.4.1	Falla trifásica en la barra 19T7SEC a 2,4kV	42
6.4.2	Falla monofásica en la barra 19T7SEC a 2,4kV	45
6.4.3	Falla trifásica en la barra 29T11Sec a 0,48kV	48
6.4.4	Falla monofásica en la barra 29T11Sec a 0,48kV	51
7	Conclusiones.....	54
8	Bibliografía.....	56

Lista de figuras

<i>Figura 1. Tipos de cortocircuito.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Razones de fallas de cortocircuitos y causas.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3. Circuito modelo asimétrico.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. onda de corriente alterna en falla asimétrica.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Modelo de circuito con fuentes de corriente alterna en estado estacionario y decreciente. Fuente:extraído de(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6. curva de respuesta correspondiente a la Ecuación (1.6). Fuente: extraída de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7.comportamiento de las Corrientes de cortocircuito trifásicas de un motor de inducción.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Circuito equivalente monofásico del motor de inducción.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Diagrama unifilar del programa</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10. Resultados del flujo de potencia presentado en la norma IEEE Std 399-1997.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Comportamiento de arranque motor MT11-1, capacidad 625 HP</i>	<i>40</i>
<i>Figura 12. Comportamiento de arranque motor MT11-2, 465 HP.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13. Comportamiento de arranque motor MT7-1, 1260 HP.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Comportamiento de arranque motor MT7-2, 2500 HP.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 15. detalles de picos máximos del sistema y de los motores,</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16. puntos de toma de valores para ambos motores, M-T7-2 Y M-T7-1,.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla,</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18, Detalles de picos máximos del sistema y de los motores,</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19. puntos de toma de valores para el motor, M-T7-1,.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 20. puntos de toma de valores para el motor, M-T7-2,.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Grafica del comportamiento de los dos motores durante la falla, elaboración propia.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Detalles de picos máximos del sistema y de los motores, extraída del DigSilent.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23. puntos de valores para los motores, M-T11-1 Y M-T11-2, extraída del DigSilent.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 24. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla</i>	<i>50</i>
<i>Figura 25. Detalles de picos máximos del sistema y de los motores, extraída del DigSilent.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 26. Puntos de toma de valores para ambos motores, M-T11-1 Y M-T11-2.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 27. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla</i>	<i>53</i>

Lista de tablas

Tabla 1 . <i>Razones de fallas de cortocircuitos y causas</i>	18
Tabla 2. <i>Datos de las líneas de transmisión del sistema.</i>	31
Tabla 3. <i>Datos equivalentes de la red.</i>	32
Tabla 4. <i>Datos de generadores del sistema</i>	32
Tabla 5. <i>Datos de barras del sistema</i>	32
Tabla 6. <i>Datos de cables del sistema</i>	33
Tabla 7. <i>Datos de transformadores.</i>	33
Tabla 8. <i>Datos de motores.</i>	34
Tabla 9. <i>Comparación de resultados del flujo de potencia en líneas de transmisión</i>	37
Tabla 10. <i>Comparación de los flujos de potencia en los cables de sistema</i>	37
Tabla 11. <i>Comparación de las tensiones en las barras del sistema</i>	37
Tabla 12. <i>Comparación de la carga en los transformadores de sistema</i>	38
Tabla 13. <i>Comparación del consumo de potencia en motores del sistema</i>	38
Tabla 14. <i>Comparación de la potencia en los generadores de sistema</i>	38
Tabla 15. <i>Tabla resumen resultados de caída de voltaje</i>	42
Tabla 16. <i>Valores tomados durante la falla</i>	44
Tabla 17. <i>Datos y resultados del aporte de los motores al sistema</i>	45
Tabla 18. <i>valores tomados de los dos motores durante la falla.</i>	47
Tabla 19. <i>Datos y resultados del aporte de los motores al sistema</i>	48
Tabla 20. <i>valores tomados de los dos motores durante la falla</i>	50
Tabla 21. <i>Datos y resultados del aporte de los motores al sistema</i>	51
Tabla 22. <i>Valores tomados de los dos motores durante la falla</i>	52
Tabla 23. <i>Datos y resultados del aporte de los motores al sistema</i>	53

1 Introducción

En presencia de una falla los motores de inducción experimentan una caída de tensión severa, al tiempo que, la energía magnética almacenada en el estator fluirá hacia la falla en forma de energía eléctrica durante un corto período de tiempo. Conociendo que los motores de inducción consumen alrededor del 70% del total de la carga industrial atendida por las empresas de servicios públicos (Maljkovic et al., 2001). En esta investigación se estudiará el comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuito y su impacto en redes de media y baja tensión.

Durante la fase de diseño de instalaciones eléctricas industriales, se realizan análisis para determinar el nivel de corriente de cortocircuito que se presenta en cada una de las subestaciones. Esta corriente es la suma de los aportes de las fuentes de energía y la contribución de los motores de inducción conectados.

La contribución a la corriente de falla aportada por los motores de inducción, se calcula de acuerdo con diferentes métodos basados en simplificaciones que, generalmente, no dan cálculos precisos y no consideran la dinámica del fenómeno.

La norma ANSI IEEE 551-2006 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006), en su capítulo seis describe y analiza los cálculos de corrientes de cortocircuito trifásicas para sistemas eléctricos, con disminución del aporte de corriente de falla de los motores de inducción. Por su parte, Sorrentino & Vera (2023) propusieron una ecuación válida para motores de cualquier tamaño, y se puede utilizar para analizar motores que funcionan con diferentes frecuencias de red. Estas investigaciones, entre muchas otras, darán sustento científico para la formulación del problema de investigación.

En esta investigación se realizó la evaluación del comportamiento dinámico de los motores de inducción ante cortocircuitos, para determinar su impacto en el diseño de las redes industriales de media y baja tensión, además se buscaron elementos científicos que amplían la comprensión del fenómeno.

Para cumplir con este propósito se modeló en DigSilent la red eléctrica industrial propuesta por la norma IEEE Std 399-1997, se realizaron simulaciones y cálculos de flujo de carga para determinar la validez y calibración del modelo, se escogieron cuatro motores, dos en media tensión y dos en baja tensión para evaluar su dinámica durante el arranque; y finalmente, se realizaron

cortocircuito monofásicos y trifásicos en las barras donde se encuentran conectados, identificando el aporte de los motores a las corrientes de falla.

Este documento se divide en seis capítulos, desde el capítulo uno hasta el capítulo tres se encuentran el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos a alcanzar. En el capítulo cuatro se muestran los referentes teóricos que soportaran la investigación, en el capítulo cinco se encuentran los resultados de las simulaciones realizadas y, en el capítulo seis se presentan las conclusiones.

2 Planteamiento del problema

2.1 Descripción

Uno de los principales factores a considerar en la selección de los equipos eléctricos como disyuntores, tableros, cables y conductores, es el nivel de corriente de cortocircuito trifásica existente en la ubicación de los equipos dentro de la red eléctrica. La corriente total de cortocircuito en el punto de falla incluye tanto el aporte de las corrientes de la fuente de energía como la contribución de los motores eléctricos en el sistema (Yu et al., 1982).

En el cálculo del nivel de cortocircuito de una red industrial de media y baja tensión, el impacto de los motores de inducción suele despreciarse. Sin embargo, los motores de inducción también son fuentes que alimentan el cortocircuito en presencia de una falla (Stojanovic et al., 2000). Más aún, cuando los motores de inducción representan alrededor del 70% de toda la carga industrial de una empresa de servicios públicos (Maljkovic et al., 2001).

La corriente de falla en dos o en las tres fases es asimétrica al principio, y el análisis supone que cada corriente tiene, una componente de corriente alterna (CA) y una componente de corriente directa (DC). La componente de CA decae porque el flujo del rotor no se mantiene mediante la aplicación normal de Voltaje. La componente de DC, es un transitorio no soportado por ningún voltaje, por lo tanto, también decae. La frecuencia difiere inicialmente de la frecuencia de la red por deslizamiento del motor, luego se reduce a una tasa que depende de la carga mecánica del motor y su inercia. Durante los primeros ciclos después del cortocircuito, el cambio de frecuencia generalmente se considera despreciable (Huening Jr, 1982).

La corriente adicional aportada por el motor de inducción, en el caso de un cortocircuito en el sistema, se calcula de acuerdo con diferentes métodos que dan resultados, en algunos casos, no muy precisos. Una técnica de cálculo simplificada explica el decaimiento de la componente de AC por el aumento de la impedancia subtransitoria del motor (Z'') a medida que pasa el tiempo después de que se inicia el cortocircuito. Esto permite obtener valores calculados más pequeños, para contribuciones motoras en el circuito equivalente sin cambiar el voltaje del circuito. (Huening Jr, 1982)

Este método de cálculo simplificado para determinar la corriente de cortocircuito considerando la contribución del motor de inducción, asume que el cortocircuito puede calcularse de la misma manera que en las máquinas síncronas, pero hay una diferencia: Cuando está desconectado del suministro, un motor de inducción, a diferencia de la máquina síncrona, no puede generar su voltaje nominal en el tiempo porque no hay excitación. (Maljkovic et al., 2001)

Por lo tanto, un cortocircuito en la red expondrá los motores de inducción a una subtensión severa. Al mismo tiempo, la energía almacenada en forma de campo magnético en los motores fluirá hacia la falla en forma de energía eléctrica, aumentando la potencia de cortocircuito en la red. Durante el tiempo posterior al cortocircuito, el motor de inducción actuará como un generador contribuyendo al nivel de falla. Durante el proceso de cálculo, despreciar la contribución del motor de inducción a la corriente de cortocircuito inicial, podría provocar errores en la elección y ajuste en los relés de protección. (Maljkovic et al., n.d.)

(Howard et al., 2013, pp. 960–962), realizaron pruebas experimentales de cortocircuito en motores de inducción y las cotejaron con simulaciones transitorias ejecutadas en PSCAD. Los resultados indican que, para fallas en los terminales de la máquina, la saturación del flujo de dispersión causa una magnitud de corriente de cortocircuito significativamente mayor de la máquina de inducción, de lo que se esperarí, usando un modelo lineal obtenido de pruebas de estado estacionario.

Estos resultados se obtienen, hipotéticamente hablando, por la imprecisión numérica de la impedancia subtransitoria y por no considerar, la impedancia serie del cable que, en una instalación industrial real, permitiría conectar el motor de inducción a la red.

En la revisión de literatura analizada más adelante, se han encontrado análisis y estudios dinámicos para estudiar el arranque de motores, pero no se han encontrado estudios dinámicos que permitan determinar cuál es la contribución de los motores de inducción al nivel de cortocircuito, considerando, además de las impedancias serie del motor, las impedancias de los cables de conexión existentes en una instalación industrial real de media y baja tensión, los modelos de carga mecánica del motor. Por lo tanto, surge una pregunta rectora para esta investigación.

2.2 Formulación

¿Cómo es el comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuitos, para determinar su impacto con redes de media y baja tensión, mediante la aplicación en una red industrial?

3 Justificación

Al realizar dentro de esta investigación la evaluación del comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuitos, para determinar su impacto en redes de media y baja tensión, se amplían los criterios técnicos de diseño en la aplicación industriales por estudios la realización de estudios de coordinación de protecciones, dimensionamiento de centros de control.

Los cortocircuitos pueden causar daños importantes a los motores de inducción, lo que puede provocar pérdidas económicas significativas para las empresas. Consecuentemente, es importante contar con medidas de protección y control que permitan mitigar los efectos negativos de los cortocircuitos en los motores. Por tanto, los resultados de este proyecto pueden contribuir a mejorar la seguridad y la fiabilidad de las redes eléctricas industriales. Durante la fase de diseño contribuyendo a reducir las pérdidas económicas por fallos, suponiendo un beneficio importante para el sector industrial.

Además, dentro de esta investigación, se buscarán elementos científicos que permitan ampliar la comprensión del comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuitos, y su impacto sobre los equipos eléctricos que componen una red industrial. Así mismo, al ser un análisis en el dominio del tiempo, se tendrán elementos técnicos, para evaluar como el parámetro temporal, junto con la impedancia de los motores y cables, podría servir de elemento atenuador de fallas en redes de media y baja tensión de tipo industrial.

El comportamiento dinámico de los motores de inducción ante cortocircuito es un fenómeno complejo que depende de una gran cantidad de factores, como las características del motor, las características de la red, y las condiciones del cortocircuito. Por lo tanto, La investigación documental que se realizará en esta investigación permitirá ahondar en la información científica existente, para entregarle al sector eléctrico las teorías y conceptos más recientes, a cerca de la evaluación del comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuitos.

Soportar la investigación con el uso de software de simulación eléctrica, permitirá complementar y corroborar las hipótesis planteadas durante la investigación documental, y le dará al sector eléctrico industrial, validez a cerca de los resultados obtenidos.

Este proyecto de investigación tiene un alto impacto académico, ya que contribuirá al desarrollo del conocimiento sobre el comportamiento dinámico de los motores de inducción ante cortocircuito.

Los resultados de este proyecto podrán ser utilizados en la enseñanza de la ingeniería eléctrica y la ingeniería mecánica de la institución universitaria Pascual Bravo.

Además, este proyecto puede servir de base para futuras investigaciones en el área protecciones eléctricas, máquinas eléctricas, sistemas de potencia y automatismo industriales.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento dinámico de motores de inducción ante cortocircuitos, y su influencia al impacto en redes de media y baja tensión, mediante simulaciones empleando software especializado.

4.2 Objetivos específicos

Construir el marco teórico de referencia para orientar la investigación con respecto a los conceptos, teorías e investigaciones previas.

Simular en un software especializado, una red industrial tipo IEEE de media y baja tensión, para el análisis de cortocircuitos en diferentes puntos, y estudiamos el comportamiento dinámico de los motores de inducción.

Obtener en las simulaciones el comportamiento dinámico de los motores, y el impacto sobre la red industrial de media y baja tensión ante la presencia de cortocircuitos.

5 Referentes teóricos

5.1 Teoría del cortocircuito

5.1.1 Definición y causas de cortocircuito

De acuerdo con el Reglamento Técnico de Instalación Eléctricas (RETIE), se define como cortocircuito a la unión de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial del mismo circuito (Resolución No. 9 0708: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2013).

En el RETIE como la norma técnica colombiana (NTC 2050) y en las demás normas que existen en la actualidad, están orientadas a diseñar sistemas libres de falla de cortocircuito, esto se logra a través de diseños adecuados con sus correctos cálculos eléctricos y su correcta instalación de equipos, redes, y mantenimientos de los mismos. Aunque teniendo todo en orden, se espera que un equipo o red eléctrica, no presente las fallas de cortocircuito, siempre se va estar expuestos a fallas de este tipo como lo expresa el autor (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006), en la Tabla *I* se observan las fallas y las causas que dejan.

Tabla 1 . *Razones de fallas de cortocircuitos y causas*

Razones por las cuales se presenta una falla de cortocircuito	Causas que deja una falla de cortocircuito
Presencia de animales en los equipos.	Las corrientes de cortocircuito pueden ser muy altas, introduciendo una cantidad significativa de energía en la falla.
Conexiones sueltas que causan sobrecalentamiento del equipo.	En donde se ubica ubicación de la falla, se pueden producir arcos y quemaduras que dañan el equipo y a las personas que estén alrededor del equipo o en la intervención de el.
Sobretensiones, Deterioro del aislamiento por envejecimiento, Tensión o tensiones mecánicas aplicadas al equipo.	La corriente de cortocircuito puede fluir desde las diversas máquinas rotativas en el circuito eléctrico sistema de distribución a la ubicación de la falla.
La Acumulación de humedad y contaminantes, la intrusión de objetos metálicos o conductores en el equipo, como abrazaderas cinta de pescar metálica, herramientas, martillos neumáticos o cargadores entre muchos objetos metálicos que contribuyen a la falla.	Todos los componentes que transportan las corrientes de cortocircuito estarán sujetos a condiciones térmicas y tensiones mecánicas debidas al flujo de corriente, puede dañar estos componentes.

Fuente: Elaboración propia, tomada de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006).

Para la magnitud y la duración de las corrientes de cortocircuito, se debe de tener en cuenta el tipo de falla, sus fuentes de corriente, las impedancias existentes entre las fuentes y el punto del cortocircuito. Las características de las fuentes conectadas a la red y su ubicación, tiene un impacto en la magnitud inicial como la forma de onda de la corriente de falla.

En forma de campo magnético en las diferentes plantas industriales, los motores a menudo contribuyen con una parte significativa de la corriente de cortocircuito total. Cuando se presenta el cortocircuito, los motores síncronos y de inducción actúa como generadores y suministrarán corriente al cortocircuito en función de la cantidad de energía eléctrica almacenada en ellos. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

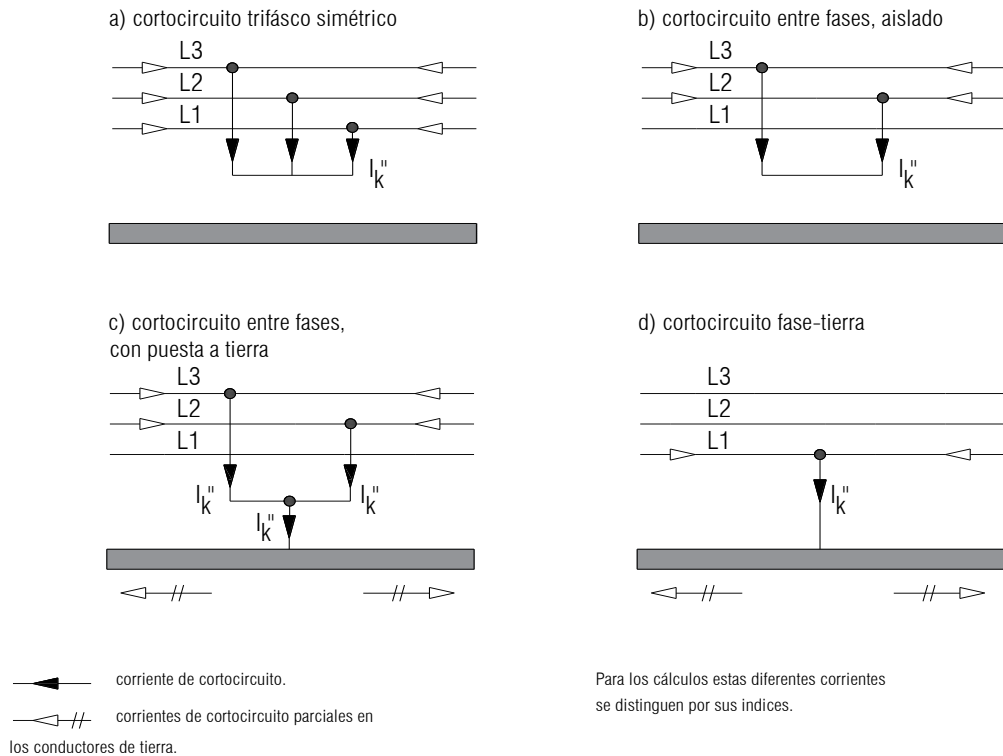
5.1.2 Características de los cortocircuitos.

Los cortocircuitos se pueden caracterizar por las diferentes condiciones en las que se genera, entre los cuales según el autor De Metz-Noblat et al. (2000) están: El origen, las condiciones ambientales, y su localización dentro de la red eléctrica.

Del origen, se puede decir que los mecánicos son originados por rotura de conductores, conexión eléctrica mal realizada entre dos conductores o interferencia de un objeto ajeno al conductor, como, herramientas, pulseras metálicas, cadenas, anillos o animales entre otras.

Por causas atmosféricas ambientales, se entiende que son las que se derivan del mismo deterioro del cable debido a que este ha sido sometido o expuesto a calor, húmeda, o corrosivos. Según su localización, se clasifican en interna o externa a un tablero, gabinete o equipo eléctrico.

De manera general el autor (De Metz-Noblat et al., 2000), nos presenta los datos en porcentaje de los tipos de cortos que más suceden, donde el corto monofásico representa el 80% de los casos, el bifásicos, el 15% y los trifásicos sólo el 5%. En la Figura 1 se observan los diferentes tipos de cortocircuito.



Los diferentes cortocircuitos y sus corrientes. El sentido de las flechas indicando las corrientes es arbitrario (IEC 60909).

Figura 1. Tipos de cortocircuito.

Fuente: *Elaboración propia, extraída de (De Metz-Noblat et al., 2000).*

5.1.3 Consecuencias de los cortocircuitos

Dependiendo de la causa, la ubicación y el origen del cortocircuito el autor De Metz-Noblat et al. (2000) describe las siguientes afectaciones: Si en su lugar de origen se presentan arcos eléctricos, estos pueden causar en los conductores pérdida del aislante, fundición del mismo conductor, y afectaciones las personas que estén cerca como quemaduras, imputaciones electrocuciones entre otras.

Dependiendo el tipo de cortocircuito se pueden presentar sobre esfuerzos electrodinámicos como: deformación en las barras o desprendimiento del aislante de los conductores.

Para las redes cercanas se pueden producir caída de voltajes, se pueden presentar de igual forma activación de las protecciones lo que causaría que alguna sesión se quede sin energía, otras causales implicarían la pérdida de sincronismo en los equipos.

A continuación, se presenta una imagen resumen Figura 2, con las fórmulas y una breve descripción a su derecha, para conocer el I_{cc} (Intensidad de corriente de cortocircuito permanente (I_{cc3} : trifásica, I_{cc2} : bifásica)

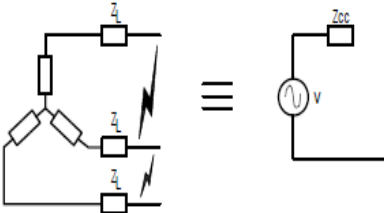

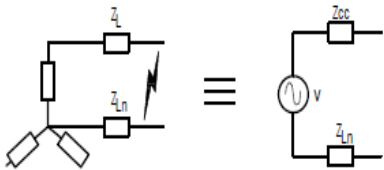
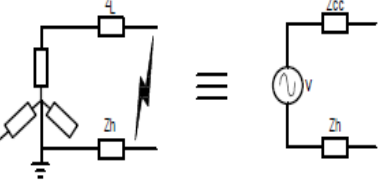
<p>Defecto trifásico</p>  $I_{cc3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc}}$	<p>Siendo: U (tensión compuesta entre fases) la que corresponde a la tensión de vacío del transformador, cuyo valor es superior entre un 3% y 5% a la tensión en bornes de la carga. Por ejemplo, en las redes a 390 V, la tensión compuesta que se considera es $U = 410$ V, y como tensión simple.</p>
<p>Defecto bifásico</p>  $I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}}$	<p>corto circuito bifásico aislado, corresponde a un defecto entre dos fases, alimentado por una tensión compuesta, la intensidad I_{cc2} que circulará es inferior a la provocada por un defecto trifásico:</p>
<p>Defecto monofásico</p>  $I_{cc1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$	<p>Cortocircuito monofásico aislado corresponde a un defecto entre fases y el neutro, alimentado por una tensión simple $V = U/\sqrt{3}$ La intensidad I_{cc1}, que circulará en este caso será: $I_{cc1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$</p>
<p>Defecto a tierra</p>  $I_{cc3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_g}$	<p>Este tipo de defecto provoca la intervención de la impedancia homopolar z_0. Salvo en presencia de máquinas rotativas, en las que la impedancia homopolar se encuentra reducida, la intensidad I_{cc} que circulará es siempre inferior a la del defecto trifásico</p>

Figura 2. Razones de fallas de cortocircuitos y causas.

Fuente: Elaboración propia, tomada de (De Metz-Noblat et al., 2000).

5.2 Descripción de una corriente de cortocircuito

5.2.1 Cálculos de cortocircuito

El cálculo preciso de la corriente de cortocircuito tras una falla es complejo, por lo que se han desarrollado métodos simplificados para obtener valores conservadores de corriente que se comparan con los de los dispositivos de protección del sistema. La forma de la onda de corriente de falla, que permite entender su magnitud en un momento específico, se ilustra en la Figura 3. La magnitud de la corriente en cualquier momento se determina utilizando una fuente de voltaje sinusoidal y un circuito en serie con resistencia, inductancia y un interruptor, donde la corriente simétrica se calcula a partir de la impedancia mediante la Ecuación (1). (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

$$I = \frac{E}{Z} \quad (1)$$

donde:

E = voltaje de conducción rms

Z (o X) = impedancia (o reactancia) equivalente del sistema Thevenin desde el punto de falla hasta e incluyendo la fuente o fuentes de corrientes de cortocircuito para el sistema de distribución.

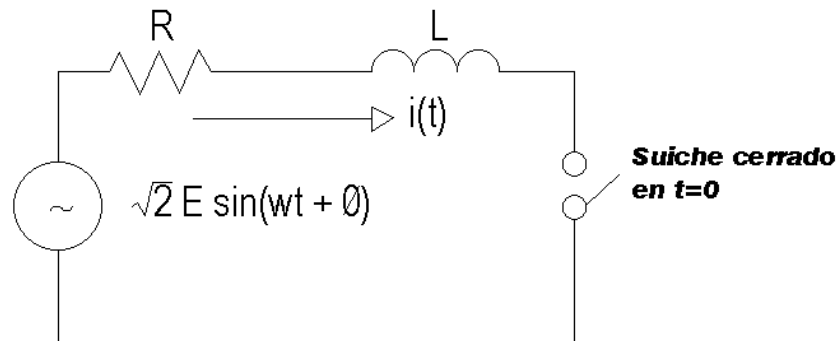


Figura 3. Circuito modelo asimétrico

Fuente: diseño propio extraído de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

Se simplifica el cálculo de fallas asumiendo que todos los voltajes internos de las máquinas son iguales, aunque en realidad cada máquina tiene un voltaje diferente según su carga e impedancia. Durante una falla, el voltaje interno de las máquinas disminuye con el tiempo a diferentes tasas. Para simplificar los cálculos, se mantiene el voltaje fijo y se varía la impedancia de la máquina. La

impedancia utilizada depende del equipo de protección evaluado, con impedancias más bajas para dispositivos de primer ciclo y más altas para los que requieren tiempos de interrupción más largos.

La determinación de cómo se comporta la corriente de falla como una función del tiempo implica la expansión de la Ecuación (1) y la solución de la siguiente ecuación diferencial [Ecuación (2)] para la corriente(i):(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

$$Ri + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Donde.

E = magnitud rms de la fuente de voltaje sinusoidal

i = corriente instantánea en el circuito en cualquier momento después de cerrar el interruptor

R = resistencia del circuito en ohmios

L = inductancia del circuito en Henries (= reactancia del circuito dividida por ω)

t = tiempo en segundos

ϕ = ángulo del voltaje aplicado en radianes cuando ocurre la falla

$\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia del sistema en hertz (Hz)

para mayores detalles sobre la Ecuación (2) los puede encontrar en los libros de texto de energía eléctrica, por lo que aquí solo brindamos la solución de la ecuación.

Suponiendo que la corriente previa a la falla a través del circuito sea cero (es decir, corriente de carga = 0), entonces la solución de corriente instantánea a la Ecuación 2) es:

$$i = -\frac{\sqrt{2}E}{Z} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{\omega t R}{X}} + \frac{\sqrt{2}E}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (3)$$

$$i = -i_{dc} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{\omega R t}{X}} + \sqrt{2} I_{ac,rms} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (4)$$

Donde:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

$$X = \omega L$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

Sí el tiempo t esta expresado en ciclos la ecuación (4) se convierte en la (5)

$$i = -i_{dc} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{2\pi R t}{X}} + \sqrt{2} I_{ac,rms} \sin(2\pi t + \alpha - \phi) \quad (5)$$

El primer término de la Ecuación (3) representa el componente transitorio de corriente continua, que disminuye de manera exponencial hasta desaparecer. El segundo término es el componente de corriente alterna en estado estacionario, que es una función sinusoidal dependiente del voltaje y la impedancia del sistema. La diferencia entre la corriente inicial y la final depende de la relación X/R del circuito y el ángulo de fase del voltaje en el momento de la falla. Al inicio, los componentes de corriente continua y alterna tienen la misma magnitud, pero con signos opuestos, ya que la corriente no puede cambiar instantáneamente en un circuito inductivo.

La importancia de los componentes transitorio y de estado estacionario de la corriente de falla se ilustra mejor considerando un ejemplo real. La Figura 4 muestra la respuesta de un circuito específico con una relación X/R de 7.5. El circuito es alimentado por una fuente de 60 Hz ($\omega = 377$), con la falla ocurriendo (el interruptor se cierra) cuando el voltaje está en $\alpha = 58$ grados. La gráfica de la corriente se obtiene de la solución general de la Ecuación (3). (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

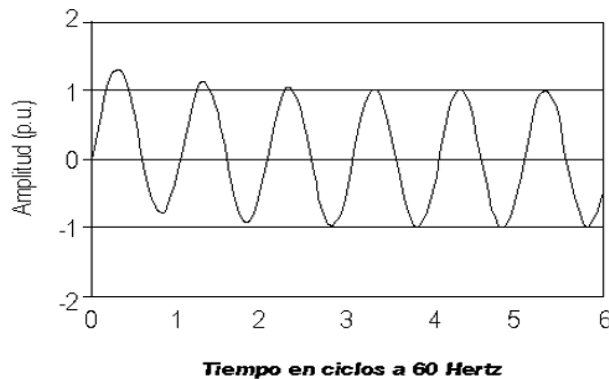


Figura 4. onda de corriente alterna en falla asimétrica

Fuente: diseño propio extraído de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

5.2.2 Corriente total de cortocircuito

La corriente total de cortocircuito de un sistema de distribución proviene de diferentes fuentes, incluyendo el sistema de transmisión, generadores locales y motores síncronos y de inducción cuyos

componentes decaen con el tiempo, afectando la magnitud de la corriente de falla en sus primeros ciclos, tanto en sus componentes de corriente alterna como continua.

La magnitud y duración de la corriente asimétrica en un cortocircuito con relación X/R del circuito y del ángulo de fase del voltaje en el momento de la falla. Una mayor relación de X/R prolonga el tiempo de decaimiento de la corriente asimétrica, mientras que el ángulo de voltaje determina el grado de asimetría. En circuitos inductivos, el componente máximo de corriente continua ocurre cuando el cortocircuito se inicia con el voltaje en cero, mientras que, en circuitos puramente resistivos, el voltaje y la corriente están en fase.

La corriente total de cortocircuito, que incluye componentes de corriente alterna en estado estacionario, corriente alterna decreciente y corriente continua decreciente, se puede expresar como se muestra en la Ecuación (6). La Figura 5 presenta el diagrama del circuito, mientras que la Figura 6 muestra la curva de respuesta correspondiente a la Ecuación (6). Es importante destacar que las fuentes de corriente alternan decreciente no se pueden incluir de manera específica en el circuito equivalente, pero se supone que están presente

$$i = i_{dc\ decay} + i_{ac\ steady\ state} + i_{ac\ decay} \quad (6)$$

Donde:

$$i_{dc\ decay} = (I_{ac\ steady\ state}) \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R\omega t}{X}}$$

$$i_{ac\ steady\ state} = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t + \alpha - \phi)$$

$$i_{ac\ decay} = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t + \alpha - \phi) e^{-kt}$$

I_s : Magnitud de corriente RMS simétrica en estado estacionario

I_{ds} : Magnitud de corriente rms simétrica decreciente

K : Variable que depende de la mezcla y el tamaño de las cargas rotativas

t : Tiempo en segundos.

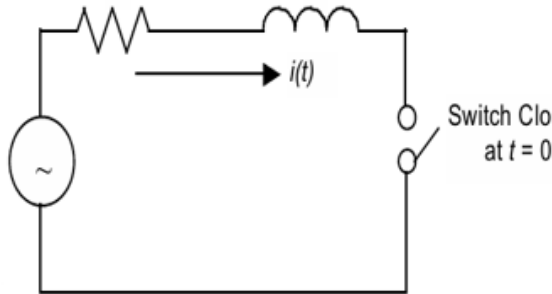


Figura 5. Modelo de circuito con fuentes de corriente alterna en estado estacionario y decreciente. Fuente: extraído de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

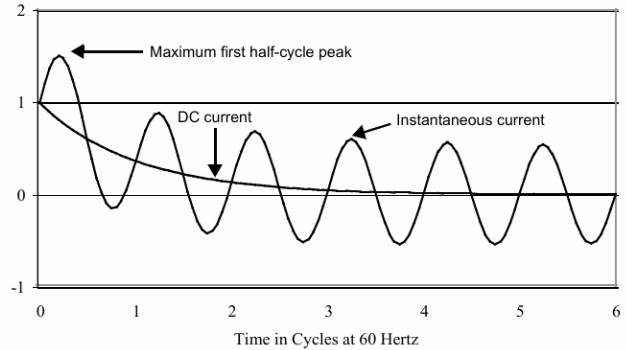


Figura 6. curva de respuesta correspondiente a la Ecuación (1.6). Fuente: extraída de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

5.3 Contribución de motores de inducción al cortocircuito

5.3.1 El impacto del motor de inducción en la corriente de cortocircuito

Los motores de inducción son los más usados en la industria, representan el 70% del consumo total entre equipos y aparatos de la carga industrial de una empresa de servicios públicos. (Maljkovic et al., 2001).

Hay varios métodos para calcular un cortocircuito en el sistema, pero siempre se busca el método más preciso. Muchos autores simplifican los diferentes métodos comparando que la misma fórmula para los cálculos de los motores de inducción, es aplicable para el caso de máquinas síncronas, cuando la gran diferencia radica que, en un motor de inducción, cuando se está aislado del suministro, no puede generar su voltaje completo durante un tiempo apreciable y por consiguiente no habrá excitación. Por tal razón no tienen los mismos comportamientos y se recomienda calcular las fallas de cortocircuito de manera diferente para ambas máquinas. (Maljkovic et al., 2001)

Existen numerosas obras dedicadas al cálculo de cortocircuitos, abordando la teoría del proceso transitorio mediante diversos métodos, que van desde cálculos simplificados hasta enfoques exactos, pero altamente complejos. En la práctica, la corriente de cortocircuito se interrumpe en el menor intervalo de tiempo posible, lo que requiere comprender su función temporal. Esto implica el uso de modelos completos y dinámicos para cada elemento del sistema. La precisión deseada en el

cálculo y su propósito determinan una serie de elementos que deben considerarse, así como la manera de modelarlos. (Stojanovic et al., 2000)

5.3.2 Contribución del motor durante la falla de Cortocircuito trifásico

El cálculo de la corriente de cortocircuito trifásico en un sistema eléctrico se basa en el estándar IEEE Std 399-3997, que considera que todos los motores eléctricos conectados al sistema contribuyen a la corriente de falla. Sin embargo, un nuevo estudio ha demostrado que esto no es siempre cierto. En caso de una falla trifásica, solo los motores conectados directamente a la barra en la falla o barra situada aguas abajo contribuyen plenamente a la falla. Otros motores de inducción (con transformadores conectados entre los motores y la falla) pueden o no contribuir con corriente a la falla. (Yu et al., 1982).

Este hallazgo tiene implicaciones importantes para la selección de equipos eléctricos. Los equipos con clasificaciones de interrupción superiores a las necesarias pueden ser más caros y menos eficientes. El estudio proporciona métodos para calcular la corriente de cortocircuito más precisa, lo que puede ayudar a los ingenieros a seleccionar equipos eléctricos más adecuados para sus necesidades (Yu et al., 1982).

5.3.3 Cálculo de Corrientes de Cortocircuito corriente de compensación

La corriente de compensación es un fenómeno importante que se da en los motores de inducción en caso de un cortocircuito. La comprensión de los conceptos básicos relacionados con la corriente de compensación, es esencial para el análisis de cortocircuitos en motores de inducción (Huening Jr, 1982).

La corriente de compensación, es una corriente asimétrica que fluye por un motor de inducción, en caso de cortocircuito. La corriente de compensación tiene dos componentes: un componente de CA y un componente de DC. El componente de CA decae con el tiempo, mientras que el componente de DC desaparece por completo. En unos o pocos milisegundos. (Huening Jr, 1982).

El autor Huening Jr (1982) presentan dos métodos para el cálculo de la corriente de compensación principales: el método de la impedancia subtransitoria y el método de la impedancia equivalente.

El método de la impedancia subtransitoria es el método más preciso, pero requiere la estimación de la impedancia subtransitoria del motor. El método de la impedancia equivalente es un método simplificado que utiliza la impedancia bloqueada del motor.

Este autor también examina los métodos simplificados para la contabilidad de las contribuciones de corriente de cortocircuito de los motores de inducción. Estos métodos se basan en las guías de aplicación estándar de disyuntores (ANSI/IEEE Std C37.13-1990)

Los motores de inducción producen una corriente de compensación asimétrica en caso de cortocircuito. Esta corriente es causada por el flujo atrapado del rotor y la impedancia interna del motor. Las corrientes de compensación de un motor de inducción se producen por dos razones: el flujo atrapado en el estator y la impedancia interna del motor.

1. El flujo atrapado del rotor: Cuando se produce un cortocircuito, el flujo del rotor se mantiene durante un breve periodo de tiempo. Este flujo crea un voltaje de reacción que induce una corriente en las bobinas del estator.
2. La impedancia interna del motor: La impedancia interna del motor limita la corriente que fluye por el motor.

5.3.4 Naturaleza de las contribuciones del motor de inducción

Cuando un motor de inducción sufre un corto circuito trifásico en sus terminales, estas aportan corrientes de falla al corto circuito. A continuación, en la Figura 7. La gráfica presenta una disminución inicial pronunciada de la corriente, seguida de una caída rápida hasta llegar a cero. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

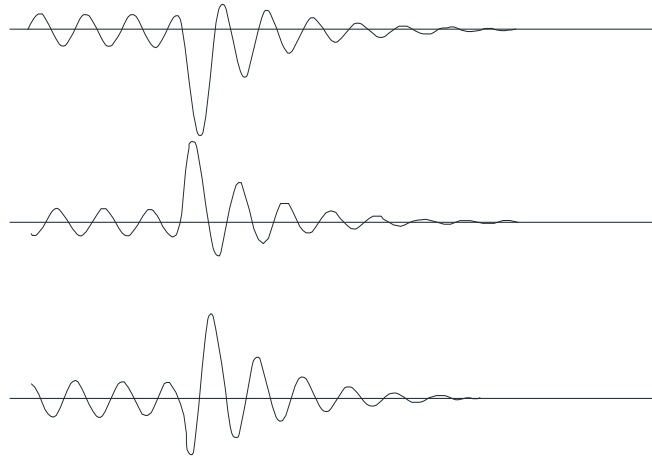


Figura 7. comportamiento de las Corrientes de cortocircuito trifásicas de un motor de inducción.
 Fuente: extraída de (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

La corriente en un motor de inducción al cortocircuito es influenciada por el voltaje generado por el rotor. Inicialmente, las corrientes de las fases son asimétricas y se componen de componentes de corriente alterna AC y corriente continua CC. La AC disminuye debido a que el flujo del rotor no se mantiene, y la CC también decae, afectada por la carga del motor y su inercia. La magnitud inicial de la AC se calcula con la reactancia subtransitoria, mientras que el componente de CC se considera igual al valor máximo de la AC. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006).

La Figura 8 ilustra un circuito equivalente utilizado para representar un motor de inducción en cálculos simplificados de cortocircuito. Este circuito incorpora una reactancia de motor de inducción que puede representar diferentes motores con características similares. Al aplicar el teorema de Thevenin, se fusionan las fuentes de voltaje individuales del motor en un único voltaje equivalente de Thevenin, simplificando el análisis del sistema. Las reactancias del motor varían considerablemente con el tamaño y la velocidad del motor, lo que afecta los cálculos de falla. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

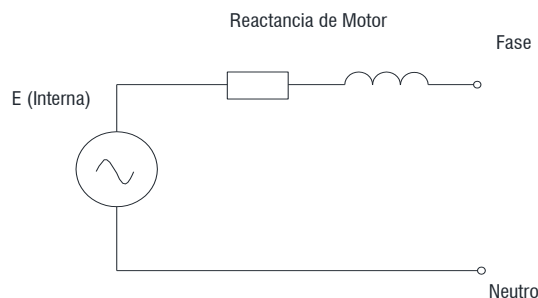


Figura 8. Circuito equivalente monofásico del motor de inducción.

Fuente: *extraída de: (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)*

5.3.5 Grandes motores de inducción con contribuciones prolongadas

Cuando grandes motores de inducción, solos o en conjunto, pueden tener un impacto considerable en la corriente de cortocircuito total en una barra determinada, es esencial realizar cálculos más detallados para obtener una mayor precisión. Esto implica determinar la corriente generada por el motor en momentos específicos tras el inicio del cortocircuito, como el primer ciclo y en los momentos en que los contactos de los interruptores de circuito de voltaje medio comienzan a separarse. Las normas ANSI/IEEE Std C37.13-1990 para interruptores de circuito de corriente alternan AC de voltaje medio recomiendan este procedimiento, el cual está mencionado en una nota que acompaña la tabla de reactancia de las máquinas rotativas. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

En este análisis, tanto los componentes de corriente alternan (I_{ac}) como los de corriente continua (I_{dc}) de la corriente del motor se tratan como funciones del tiempo. Se asume que los valores iniciales de estas corrientes disminuyen de manera exponencial con el tiempo, y para realizar estos cálculos se aplican las ecuaciones (7) y (8). Esta metodología asegura una estimación más precisa del comportamiento de la corriente del motor durante el cortocircuito, lo que es crucial para la selección y coordinación de los dispositivos de protección, como los interruptores automáticos, garantizando así un funcionamiento seguro y fiable del sistema eléctrico. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

$$I_{ac} = \left(\frac{E}{Z}\right) \cdot e^{-\frac{2\pi t}{T_d}} \quad (7)$$

$$I_{dc} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{E}{Z}\right) \cdot e^{-\frac{2\pi t}{T_d}} \quad (8)$$

6 Resultados de las Simulaciones

6.1 Descripción de la red

Para comprobar los resultados de esta investigación, se implementaron en DigSilent la red que se encuentra en el capítulo 6 de en la norma IEEE Std 399-1997, (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997) se utiliza para evaluar la corriente de aporte de motores de inducción ante un cortocircuito monofásico y trifásico. Este proceso se realiza mediante el programa DigSilent.

En la red tipo industrial extraída de la norma IEEE Std 399-1997; se simuló un flujo de carga buscando que los resultados obtenidos, coincidan con los de la norma. De esta manera se determina como se distribuye la potencia a lo largo de todo el circuito en su interconexión, además de calcular la magnitud del voltaje, en las barras. Este proceso se hace para calibrar el modelo, garantizando que los resultados entregados por el DigSilent sean iguales con los presentados en la norma IEEE Std 399-1997.(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006)

A continuación, presentamos los diferentes datos de cada uno de los elementos de nuestro modelo extraído de la norma IEEE 399-1997. en la Tabla 2 se pueden ver los datos de las líneas de transmisión, en la Tabla 3 se muestra los datos del equivalente de la red, en la Tabla 4 los datos de los generadores, en la Tabla 5. Datos de barras del sistema, la Tabla 6. Datos de cables del sistema, de la Tabla 7 los datos de los transformadores, y para finalizamos, en la Tabla 8, se muestran los datos de los motores.

Tabla 2. *Datos de las líneas de transmisión del sistema.*

DATOS LINEAS DE TRANSMISIÓN DE SISTEMA IEEE STD 399-1997														
ID	Desde Bus	Hasta Bus	calibre	Longitud (ft)	Longitud (m)	Voltaje (kV)	R1 (Ω /mi)	X1 (Ω /mi)	R0 (omh)	X0 (omh)	Y0 (msiemens)	R1 (omh)	X1 (omh)	Y1 (msiemens)
Line Impedance-1	100:UTIL-69	01:69-1	1/C -266.8 MCM ACSR	10000	3048	69	0,349	0,7441	0,662	2,1554	3,09531	0,35	1,103	5,151
Line Impedance-2	100:UTIL-69	02:69-2	1/C -266.8 MCM ACSR	10000	3048	69	0,349	0,7441	0,662	2,1554	3,09531	0,35	1,103	5,151

Fuente: Elaboración propia, extraídos de la norma IEEE399-1997.

Tabla 3. *Datos equivalentes de la red.*

DATOS EQUIVALENTE DE RED DE SISTEMA IEEE STD 399-1997								
ID	Conexión Bus	MVAsc 3Ø	MVAsc 1Ø	Voltaje (kV)	X/R 3Ø	X/R 1Ø	Corriente KAsc 3Ø	Corriente KAsc 1Ø
UTIL-1	100:UTIL-69	1000,00	765,00	69,00	22,00	9,70	8,37	6,40

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997.

Tabla 4. *Datos de generadores del sistema.*

DATOS GENERADORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997								
ID	Conexión Bus	Tipo	Voltaje (kV)	Potencia (MVA)	X''d (%)	X/R	X0 (%)	X0/R0
GEN-1	50:GEN1	Synchronous	13,8	15,63	0,11	37,40	5,70	37,40
GEN-2	04:MILL-2	Synchronous	13,8	12,50	12,80	35,70	5,80	35,70

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997

Tabla 5. *Datos de barras del sistema*

DATOS BARRAS DE SISTEMA IEEE STD 399-1997			
Bus ID	Voltaje nom (kV)	Bus ID	Voltaje nom (kV)
01:69-1	69,00	24:FDR M	13,80
02:69-2	69,00	25:T10PRI	13,80
03:MILL-1	13,80	26:FDR G	13,80
04:MILL-2	13,80	27:T12PRI	13,80
05:FDR F	13,80	28:T10SEC	0,48
06:FDR H	13,80	29:T11SEC	0,48
07:FDR71/72	13,80	30:T12SEC	0,48
08:FDR L	13,80	31:FDR P	13,80
09:FDR E	13,80	32:FDR Q	13,80
10:EMERG	13,80	33:T10MCC	0,48
11:T4SEC	2,40	34:T1MCC	0,48
12:T5PRI	13,80	35:T12MCC	0,48
13:T6PRI	13,80	36:T13SEC	2,40
15:FDR I	13,80	37:T14SEC	0,48
16:T9PRI	13,80	38:480TIE	0,48
17:T5SEC	0,48	39:T3SEC	4,16
18:T6SEC	0,48	41:LGTS	0,48
19:T7SEC	2,40	49:RECT	0,48
20:T8SEC	2,40	50:GEN1	13,80
21:T9SEC	0,48	51:AUX	0,48
22:T5MCC	0,48	100:UTIL-69	69,00
23:T6MCC	0,48	Bus18	13,80

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997

Tabla 6. Datos de cables del sistema

DATOS CABLES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997										
ID	Desde Bus	Hasta Bus	Cables por fase y calibre	Longitud (ft)	Longitud (m)	Voltaje (kV)	R1 (Ω)	X1 (Ω)	R0 (Ω)	X0 (Ω)
C-E1	03:MILL-1	09:FDR E	1 - 3/C-250kcmil CU	650	198,12	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-E2	09:FDR E	25:T10PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	1833	558,70	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-E3	09:FDR E	13:T6PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	75	22,86	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-E4	09:FDR E	12:T5PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	165	50,29	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-F1	03:MILL-1	05:FDR F	1 - 3/C-250kcmil CU	325	99,06	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-G1	03:MILL-1	26:FDR G	1 - 3/C-250kcmil CU	680	207,26	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-H1	03:MILL-1	06:FDR H	1 - 3/C-250kcmil CU	471	143,56	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-I1	04:MILL-2	15:FDR I	1 - 3/C-250kcmil CU	980	298,70	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-J2	07:FDR71/72	27:T12PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	619	188,67	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-J3	07:FDR71/72	16:T9PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	1187	361,80	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-J4	10:EMERG	13:T6PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	200	60,96	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-J5	10:EMERG	12:T5PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	10	3,05	13,80	0,0440	0,4214	0,0881	0,0843
C-J6	10:EMERG	27:T12PRI	1 - 3/C-250kcmil CU	475	144,78	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-L1	Bus18	08:FDR L	1 - 3/C-250kcmil CU	510	155,45	13,80	0,0283	0,0342	0,0566	0,0685
C-M1	04:MILL-2	24:FDR M	1 - 3/C-250kcmil CU	510	155,45	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-M2	24:FDR M	31:FDR P	1 - 3/C-250kcmil CU	340	103,63	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-M3	24:FDR M	32:FDR Q	1 - 3/C-250kcmil CU	485	147,83	13,80	0,0440	0,0367	0,0881	0,0734
C-T5-1	17:T5SEC	22:T5MCC	1 - 3/C-250kcmil CU	20	6,10	0,48	0,0439	0,0282	0,0879	0,0565
C-T6-1	18:T6SEC	23:T6MCC	1 - 3/C-250kcmil CU	20	6,10	0,48	0,0439	0,0282	0,0879	0,0565
C-T10-1	28:T10SEC	38:480TIE	1 - 3/C-250kcmil CU	50	15,24	0,48	0,0280	0,0270	0,0560	0,0540
C-T10-2	28:T10SEC	33:T10MCC	1 - 3/C-250kcmil CU	20	6,10	0,48	0,0439	0,0282	0,0879	0,0565
C-T11-1	29:T11SEC	38:480TIE	1 - 3/C-250kcmil CU	66	20,12	0,48	0,0439	0,0270	0,0560	0,0540
C-T11-2	29:T11SEC	34:T1MCC	1 - 3/C-250kcmil CU	20	6,10	0,48	0,0439	0,0282	0,0879	0,0565
C-T12-1	30:T12SEC	38:480TIE	1 - 3/C-250kcmil CU	50	15,24	0,48	0,0280	0,0270	0,0560	0,0540
C-T12-2	30:T12SEC	35:T12MCC	1 - 3/C-250kcmil CU	20	6,10	0,48	0,0439	0,0282	0,0879	0,0565
CIA	50:GEN1	03:MILL-1	1 - 3/C-250kcmil CU	2000	609,60	13,80	0,0231	0,0462	0,0208	0,4160

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997

Tabla 7. Datos de transformadores.

DATOS TRANSFORMADORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997									
ID Trafo	Bus Prim	Bus Sec	V prim/Vsec	MVA nominal	Z1 (%)	X1/R1	Z0 (%)	X0/R0	
T-1	01:69-1	03:MILL-1	69 / 13,8 kV	15 MVA	8,00	17,00	7,20	17,00	
T-2	02:69-2	04:MILL-2	69 / 13,8 kV	15 MVA	8,00	17,00	7,40	17,00	
T-3	05:FDR F	39:T3SEC	13,8 / 4,16 kV	1,725 MVA	6,00	8,00	6,00	8,00	
T-4	06:FDR H	11:T4SEC	13,8 / 2,4 kV	1,5 MVA	5,50	6,50	5,50	6,50	
T-5	12:T5PRI	17:T5SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	6,75	6,50	6,75	6,50	
T-6	13:T6PRI	18:T6SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,75	6,50	
T-7	06:FDR H	19:T7SEC	13,8 / 2,4 kV	3,75 MVA	5,50	12,00	5,50	12,00	
T-8	15:FDR I	20:T8SEC	13,8 / 2,4 kV	3,75 MVA	5,50	12,00	5,50	12,00	
T-9	16:T9PRI	21:T9SEC	13,8 / 0,48 kV	0,75 MVA	5,75	5,00	5,50	5,00	
T-10	25:T10PRI	28:T10SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,75	6,50	
T-11	26:FDR G	29:T11SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,50	6,50	
T-12	27:T12PRI	30:T12SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,50	6,50	
T-13	31:FDR P	36:T13SEC	13,8 / 2,4 kV	2,5 MVA	5,75	10,00	50,00	10,00	
T-14	32:FDR Q	37:T14SEC	13,8 / 0,48 kV	1 MVA	5,75	5,50	50,00	5,50	
T-17	05:FDR F	49:RECT	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	4,50	6,00	4,50	6,00	
T-18	50:GEN1	51:AUX	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	5,91	5,75	5,91	

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997

Tabla 8. *Datos de motores.*

DATOS TRANSFORMADORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997								
ID Trafo	Bus Prim	Bus Sec	V prim/Vsec	MVA nominal	Z1 (%)	X1/R1	Z0 (%)	X0/R0
T-1	01:69-1	03:MILL-1	69 / 13,8 kV	15 MVA	8,00	17,00	7,20	17,00
T-2	02:69-2	04:MILL-2	69 / 13,8 kV	15 MVA	8,00	17,00	7,40	17,00
T-3	05:FDR F	39:T3SEC	13,8 / 4,16 kV	1,725 MVA	6,00	8,00	6,00	8,00
T-4	06:FDR H	11:T4SEC	13,8 / 2,4 kV	1,5 MVA	5,50	6,50	5,50	6,50
T-5	12:T5PRI	17:T5SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	6,75	6,50	6,75	6,50
T-6	13:T6PRI	18:T6SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,75	6,50
T-7	06:FDR H	19:T7SEC	13,8 / 2,4 kV	3,75 MVA	5,50	12,00	5,50	12,00
T-8	15:FDR I	20:T8SEC	13,8 / 2,4 kV	3,75 MVA	5,50	12,00	5,50	12,00
T-9	16:T9PRI	21:T9SEC	13,8 / 0,48 kV	0,75 MVA	5,75	5,00	5,50	5,00
T-10	25:T10PRI	28:T10SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,75	6,50
T-11	26:FDR G	29:T11SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,50	6,50
T-12	27:T12PRI	30:T12SEC	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	6,50	5,50	6,50
T-13	31:FDR P	36:T13SEC	13,8 / 2,4 kV	2,5 MVA	5,75	10,00	50,00	10,00
T-14	32:FDR Q	37:T14SEC	13,8 / 0,48 kV	1 MVA	5,75	5,50	50,00	5,50
T-17	05:FDR F	49:RECT	13,8 / 0,48 kV	1,25 MVA	4,50	6,00	4,50	6,00
T-18	50:GEN1	51:AUX	13,8 / 0,48 kV	1,5 MVA	5,75	5,91	5,75	5,91

Fuente: Elaboración propia, extraído de la norma IEEE Std 399-1997

6.2 Resultados de Flujo de Carga

Mediante la simulación del flujo de potencia en DigSilent, se obtuvieron los resultados de la potencia activa, reactiva; así como el voltaje en cada una de las barras que componen el sistema. Estos resultados fueron comparados con los valores presentados en la norma IEEE Std 399-1997 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997, p. 134), y se pudo establecer que los resultados son numéricamente iguales, pues, aunque se observan variaciones en sus decimales, estas son inferiores al 2,5%. Como conclusión, se puede afirmar que las diferencias de resultados comparados para cada uno de los elementos que componen la red, están dentro del rango que la solución numérica permite. Estos resultados validan, dentro de esta investigación, la confiabilidad del modelo y los datos utilizados para la construcción.

En la Figura 9. se presenta el diagrama unifilar de la red, basado en el de la norma IEEE Std 399-3997, con los resultados obtenidos en el DigSilent, y en la Figura 10 presentamos los resultados de la norma IEEE Std 399 1997 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997, p. 156), los cuales serán comparados con el modelo en DigSilent en las tablas que presentan a continuación.

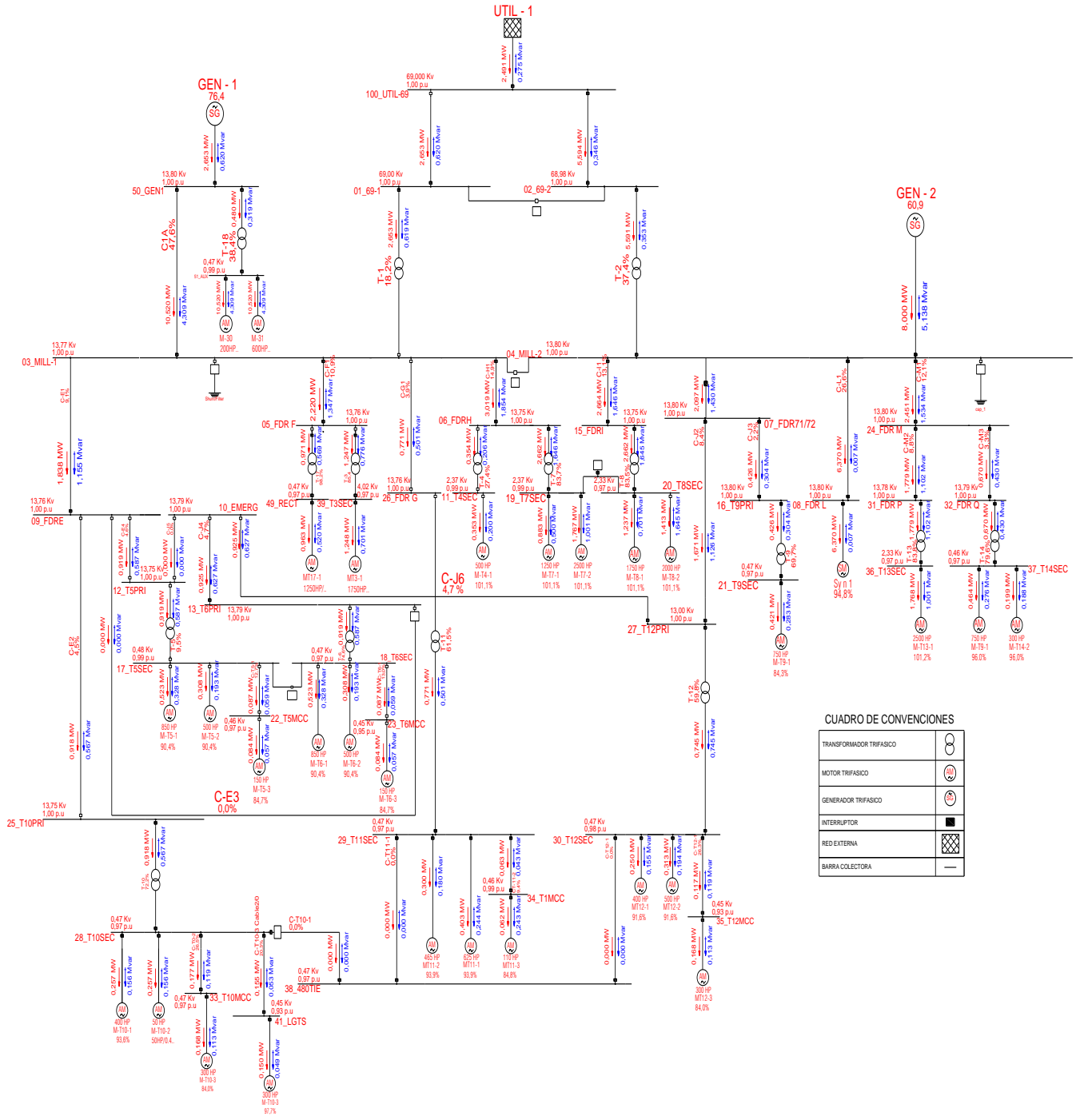


Figura 9. Diagrama unifilar del programa
fuente: Elaboración propia

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E										WED, JUN 26 1996	08:10
TYPICAL INDUSTRIAL PLANT ELECTRICAL SYSTEM (IEEE BROWN BOOK)										RATING	
BASE CASE LOAD FLOW										SET A	
BUS			AREA	CKT	KW	KVAR	KVA	%I			
BUS	1	69-1	69.0	1				1.0002	PU	0.05	1
TO	3	MILL-1	13.8	1	1	-2667.0	648.5	2744.8	18	1.0000	LK
TO	100	UTIL-69	69.0	1	1	2666.8	-648.5	2744.5	5		
BUS	2	69-2	69.0	1				0.9993	PU	-0.10	2
TO	4	MILL-2	13.8	1	1	5572.0	-368.1	5584.1	37	1.0000	LK
TO	100	UTIL-69	69.0	1	1	-5571.8	368.4	5584.0	10		
BUS	3	MILL-1	13.8	1				0.9977	PU	0.88	3
TO	1	69-1	69.0	1	1	2669.4	-608.4	2737.9	18	1.0000	UN
TO	5	FDR F	13.8	1	1	2217.0	1340.7	2590.9	34		
TO	6	FDR H	13.8	1	1	3018.4	1853.3	3541.9	47		
TO	9	FDR E	.480	1	1	1828.4	1191.5	2182.4	29		
TO	26	FDR G	13.8	1	1	769.3	500.2	917.6	12		
TO	50	GEN1	13.8	1	1	-10503.4	-4277.0	11340.8	62		
BUS	4	MILL-2	13.8	1				1.0000	PU	-1.81	4
GENERATION						8000.0	5137.9R	9507.8	95	13.800	KV
TO	2	69-2	69.0	1	1	-5562.2	534.4	5587.8	37	1.0000	UN
TO	7	FDR71/72	13.8	1	1	2088.5	1422.7	2527.0	34		
TO	8	FDR L	13.8	1	1	6363.7	3.6	6363.7	64		
TO	15	FDR I	13.8	1	1	2664.1	1647.3	3132.2	42		
TO	24	FDR M	.480	1	1	2445.3	1529.9	2884.5	38		
BUS	5	FDR F	13.8	1				0.9974	PU	0.87	5
TO	3	MILL-1	13.8	1	1	-2216.5	-1340.3	2590.2	34		
TO	39	T3 SEC	4.16	1	1	1246.3	775.8	1468.1	85	1.0000	LK
TO	49	RECT	.480	1	1	970.5	565.0	1123.0	90	1.0000	LK
BUS	6	FDR H	13.8	1				0.9972	PU	0.87	6
TO	3	MILL-1	13.8	1	1	-3017.0	-1852.1	3540.2	47		
TO	11	T4 SEC	2.40	1	1	353.9	206.1	409.6	27	1.0000	LK
TO	19	T7 SEC	2.40	1	1	2662.0	1646.0	3129.8	84	1.0000	LK
BUS	7	FDR71/72	13.8	1				1.0000	PU	-1.81	7
TO	4	MILL-2	13.8	1	1	-2088.5	-1422.7	2527.0	34		
TO	16	T9 PRI	13.8	1	1	425.3	303.5	522.5	7		
TO	27	T12 PRI	13.8	1	1	1662.6	1119.2	2004.2	27		
BUS	8	FDR L	13.8	1				0.9995	PU	-1.84	8
TO	LOAD-PQ					6361.0	0.0	6361.0			
TO	4	MILL-2	13.8	1	1	-6360.6	0.1	6360.6	64		

Figura 10. Resultados del flujo de potencia presentado en la norma IEEE Std 399-1997.

Fuente: Extraído de la norma IEEE-std 399-1997

Como una validación del modelo construido, con respecto al propuesto por la norma IEEE Std 399-1997, en la Tabla 9 se presenta la comparación del flujo de potencia en cada una de las dos líneas de transmisión; en la Tabla 10 presenta comparativamente la potencia transmitida en los cables que componen la red, en la Tabla 11 se compara los voltaje en las barras, en la Tabla 12 se muestra la comparación de la potencia en los transformadores, finalmente, en la Tabla 13 y Tabla 14 se presenta la potencia de los motores y los generadores.

Tabla 9. Comparación de resultados del flujo de potencia en líneas de transmisión

DATOS LINEAS DE TRANSMISIÓN DE SISTEMA IEEE STD 399-1997 COMPARACION DE RESULTADOS				
ID	IEEE STD 399-1997		DigSilent	
	P (kW)	Q (kVAR)	P (kW)	Q (kVAR)
Line Impedance- 1 100:UTIL-69	2666,80	368,10	2601,00	1073,00
Line Impedance- 2 100:UTIL-69	5571,80	368,40	5590,00	368,00

Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del resultado de flujo de carga de la norma IEEE Std 399-1997 y el software DigSilent.

Tabla 10. Comparación de los flujos de potencia en los cables de sistema

DATOS CABLES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997 COMPARACION DE RESULTADOS				
ID	IEEE STD 399-1997		DigSilent	
	P (kW)	Q (kVAR)	P (kW)	Q (kVAR)
C-E1	1828,40	1191,50	1839,00	1155,00
C-F1	2217,00	1340,00	2220,00	1347,00
C-G1	769,30	500,20	778,00	514,00
C-H1	3018,40	1853,30	3065,00	2292,00
C-I1	2664,10	1647,30	2663,00	1632,00
C-I2	2088,50	1422,70	2097,00	1430,00
C-J2	1662,60	1119,20	1671,00	1126,00
C-J3	425,30	303,50	426,00	304,00
C-L1	6363,70	3,60	6370,00	7,00
C-M1	2445,30	1529,90	2451,00	1534,00
C1A	10503,40	4277,00	10504,00	4277,00

Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del resultado de flujo de carga de la norma IEEE Std 399-1997 y el software DigSilent.

Tabla 11. Comparación de las tensiones en las barras del sistema

DATOS BARRAS DE SISTEMA COMPARACION DE RESULTADOS		
Bus ID	IEEE STD 399-1997 Voltaje (kV)	DigSilent Voltaje (kV)
02:69-1	69,013	69,000
02:69-2	68,954	68,890
03:MILL-1	13,768	13,730
04:MILL-2	13,800	13,800
05:FDR F	13,764	13,720
06:FDR H	13,761	13,720
07:FDR71/72	13,800	13,800
08:FDR L	13,793	13,790

Fuente: Elaboración propia. Datos extraídos del resultado de flujo de carga de la norma IEEE Std 399-1997 y el software DigSilent.

Tabla 12. *Comparación de la carga en los transformadores de sistema*

DATOS TRANSFORMADORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997 COMPARACION DE RESULTADOS				
ID TRAFO	IEEE STD 399-1997		DigSilent	
	P (kW)	Q (kVAR)	P (kW)	Q (kVAR)
T-1	2667,00	648,50	2601,00	1031,00
T-2	5572,00	368,10	5590,00	368,00
T-3	1246,30	775,80	1247,00	776,00
T-7	2662,00	1646,00	2708,00	2083,00
T-17	970,50	565,00	971,00	569,00

Fuente: Datos extraídos del resultado de flujo de carga entre de la norma IEEE399-1997 y el flujo de carga del DigSilent

Tabla 13. *Comparación del consumo de potencia en motores del sistema*

DATOS MOTORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997 COMPARACION DE RESULTADOS				
ID	IEEE STD 399-1997		DigSilent	
	P (kW)	Q (kVAR)	P (kW)	Q (kVAR)
M-FDR-L	6361,00	0,00	6364,00	0,00
M-T3-1	1237,00	701,10	1238,00	701,00
M-T17-1	963,00	520,00	963,00	520,00

Fuente: Datos extraídos del resultado de flujo de carga entre de la norma IEEE399-1997 y el flujo de carga del DigSilent

Tabla 14. *Comparación de la potencia en los generadores de sistema.*

DATOS GENERADORES DE SISTEMA IEEE STD 399-1997 COMPARACION DE RESULTADOS				
ID	IEEE STD 399-1997		DigSilent	
	P (kW)	Q (kVAR)	P (kW)	Q (kVAR)
GEN-1	11000	4628	11000	4628
GEN-2	8000	5138	8000	5138

Fuente: Datos extraídos del resultado de flujo de carga entre de la norma IEEE399-1997 y el flujo de carga del DigSilent.

6.3 Análisis dinámico del arranque de los motores

Para analizar la dinámica de los motores, se realizó el estudio de arranque de las máquinas MT11-1 de 625 HP, y MT11-2 de 465 HP que están conectadas en la barra 29_T11SEC a 0,48 kV; y las maquinas MTR7-1 de 1260HP y MT7-2 de 2500 HP, conectadas en la barra 19_T7SEC a 2,4 kV.

En la Figura 11 se observa el arranque del motor MT11-1, Durante este transitorio, el motor consume una corriente de 6,564 p.u durante un lapso de 3,563 s, tiempo que tarda en alcanzar la corriente de operación de 1,02 p.u. La elevada corriente de arranque produce una caída de tensión del 21,36% en la barra 29_T11SEC, pues al arrancar, el voltaje en bornes de la máquina cae a 0,746 p.u, y luego de se ubica en un voltaje de operación de 0,955 p.u,

La Figura 12 muestran el comportamiento del arranque del motor MT11-2. El cual consume de la red una corriente de 6,959 p.u durante un lapso de 4,063s, tiempo que tarda en alcanzar su corriente de operación de 1,17 p.u; Este transitorio de corriente impacta el nivel de voltaje del motor, pues al momento del arranque, el voltaje en bornes de la máquina es de 0,795 p.u, y luego de transcurrido el tiempo de arranque se ubica en 0,960 p.u. De los resultados obtenidos durante este análisis dinámico, se observa que la tensión cae un 17,19%.

En la Figura 13 se observan el arranque del motor MT7-1 conectado en media tensión, esta máquina consume una corriente de 7,792 p.u durante 1,233 s, y luego alcanza su corriente de operación (1,048 p.u), El voltaje de este motor durante el arranque es de 0,916 p.u, y luego de se ubica en 1,009 p.u. Con resultados se puede concluir que la tensión en este motor cee un 9,22%.

Finalmente, en Figura 14, para el arranque del motor MT7-2, se observa que consume una corriente de 6,721 p.u durante un lapso de 0,953s, tiempo que tarda en alcanzar su corriente de operación igual a 9,79 p.u. Este transitorio de corriente impacta el nivel de voltaje del motor, que inicialmente está en un voltaje de 0,809 p.u, y luego, transcurrido el tiempo de arranque, se ubica en 1,020 p.u, mostrando una caída transitoria de la tensión del 20,69%.

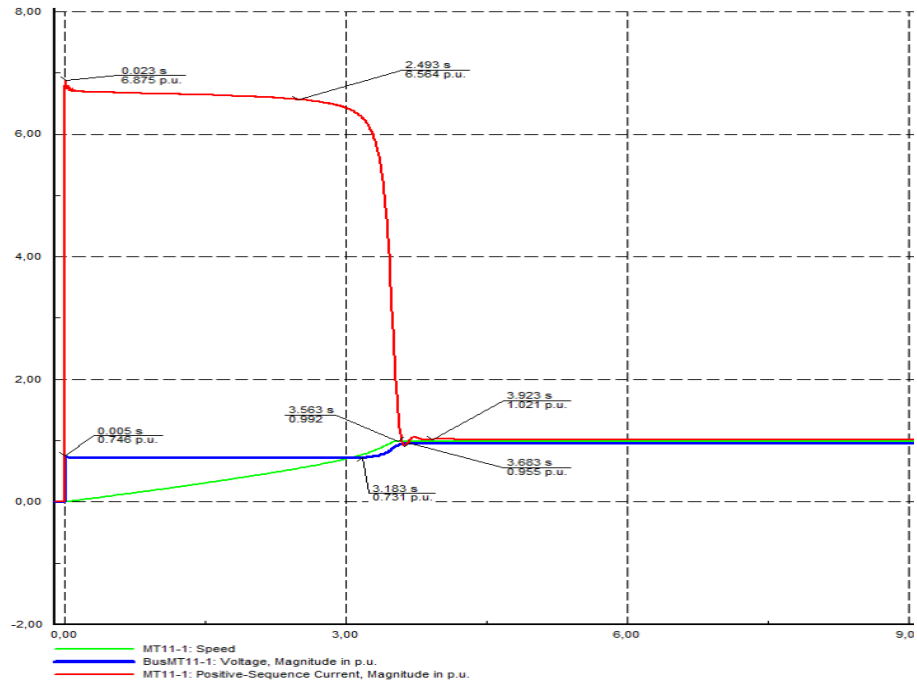


Figura 11. Comportamiento de arranque motor MT11-1, capacidad 625 HP
 Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

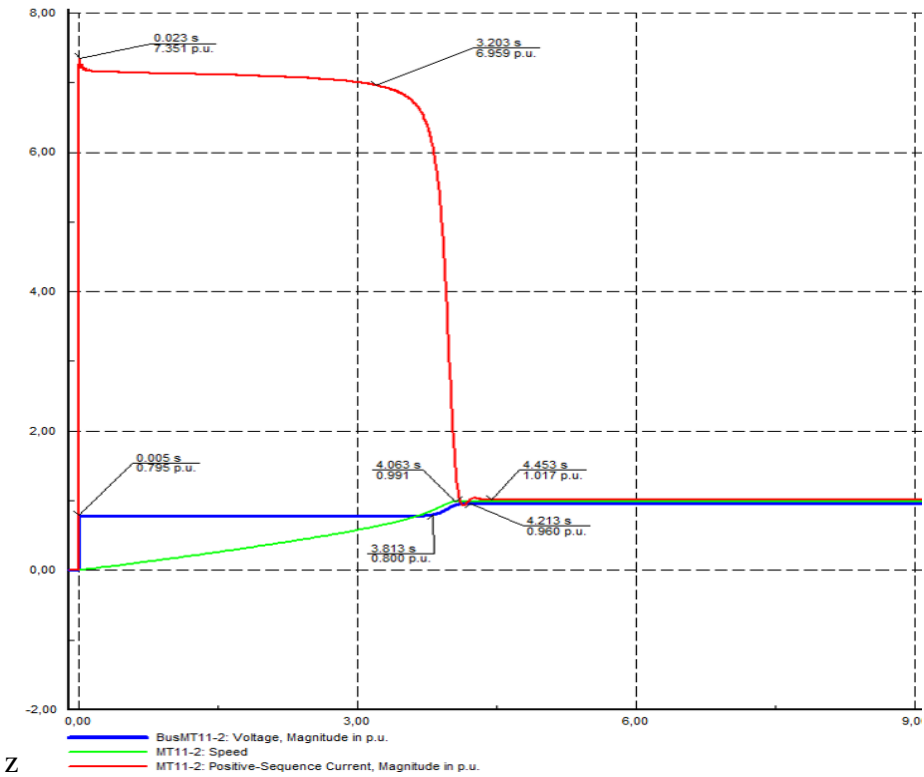


Figura 12. Comportamiento de arranque motor MT11-2, 465 HP.
 Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

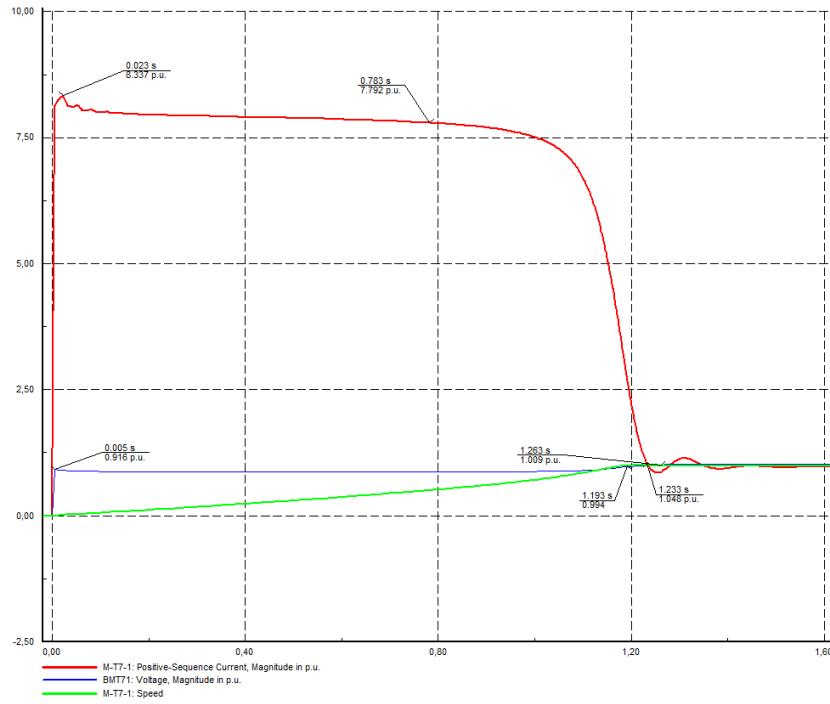


Figura 13. Comportamiento de arranque motor MT7-1, 1260 HP.
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

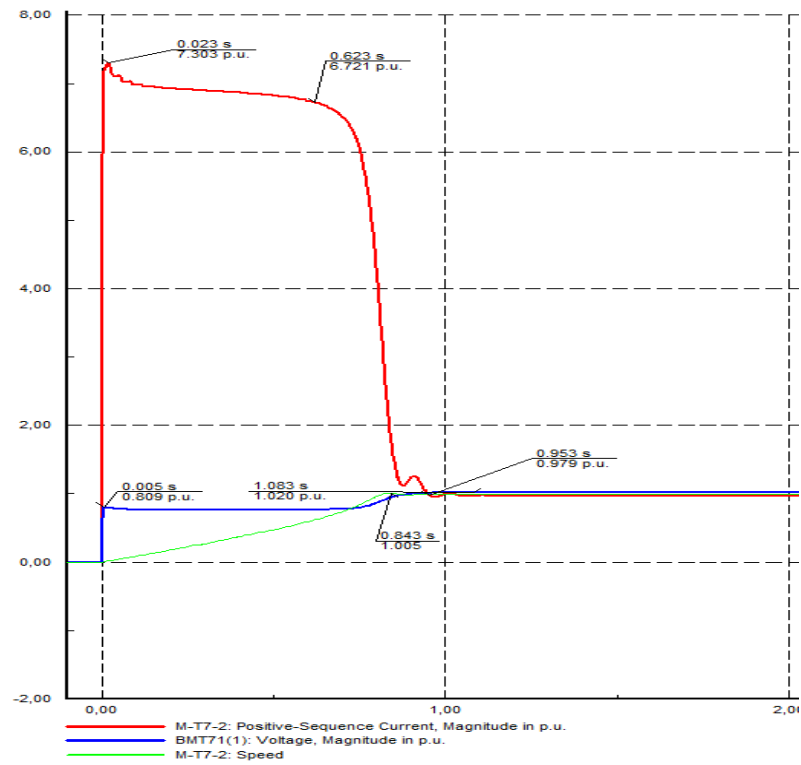


Figura 14. Comportamiento de arranque motor MT7-2, 2500 HP.
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

En la Tabla 15, se presentan, en resumen, los valores de tensión para cada uno de los motores analizados durante su arranque.

Tabla 15. *Tabla resumen resultados de caída de voltaje*

Motores de 0,48 kV				
Motor	V arranque [p.u]	V estado Estable [p.u]	Delta V [%]	Observaciones
MT11-1 de 625 HP	0,73	0,96	23,46%	Tiempo de arranque del motor MT11-1 3,683 s
MT11-2 de 465 HP	0,80	0,96	16,67%	Tiempo de arranque del motor MT11-2 4,213 s
Motores de 2,4 kV				
Motor	V arranque [p.u]	V estado Estable [p.u]	Delta V [%]	Observaciones
M-T7-1 de 1260 HP	0,92	1,01	9,22%	Tiempo de arranque del motor MT11-1 1,263 s
MT7-2 de 2500 HP	0,81	1,02	20,69%	Tiempo de arranque del motor MT11-2 1,083 s

Fuente. Elaboración propia

6.4 Resultados del aporte al Cortocircuito

El cálculo del aporte de los motores a la corriente de cortocircuito se realizó en la red tipo industrial, sobre la cual se realizaron dos simulaciones:

1. Se aplicó una falla trifásica y monofásica a tierra en la barra 19T7SEC a 2,4kV en la que se conectan los dos motores MT7-1 de 1260 HP y MT7-2 de 2500 HP, que son los motores de mayor potencia de esta red en este nivel de tensión.
2. Una falla trifásica y monofásica a tierra en la barra 29T11Sec a 0,48kV en la que se conectan los dos motores, MT11-1 de 625 HP y MT11-2 de 465 HP, que son los motores de mayor potencia de esta red en este nivel de tensión.

6.4.1 Falla trifásica en la barra 19T7SEC a 2,4kV

Aplicando un cortocircuito trifásico después de los 0,2 de iniciar la simulación dinámica, y aclarando la falla a los 0,2 s, se observa que la corriente de cortocircuito en la barra alcanza un valor de 65.808 en p.u, el aporte de corriente de los motores alcanza 3,508 p.u. En la Figura 15 se observan estos valores.

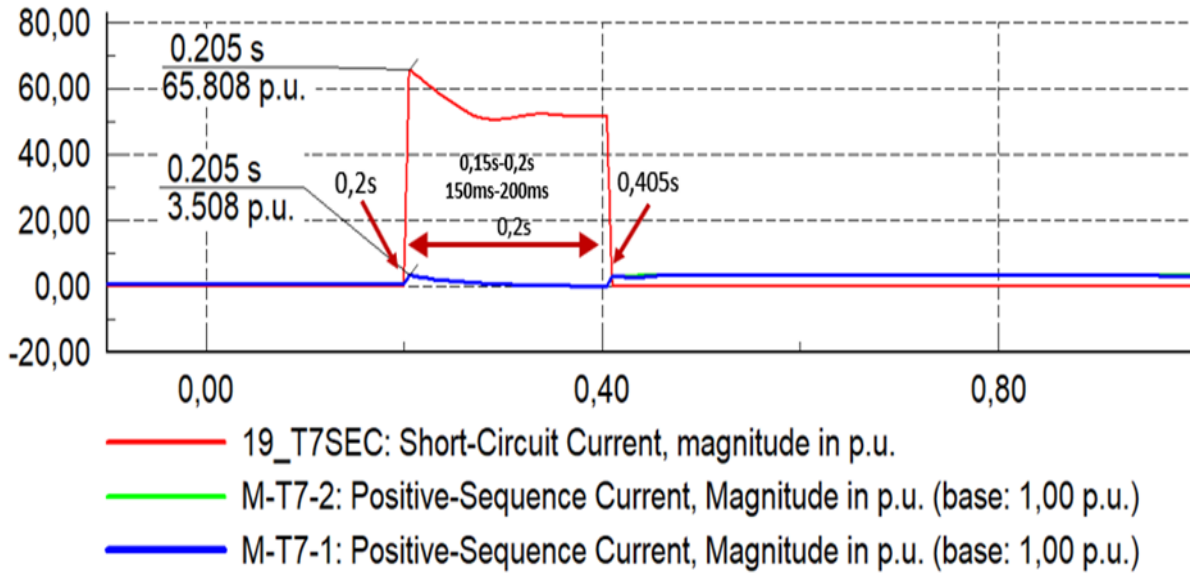


Figura 15. detalles de picos máximos del sistema y de los motores,
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Para evaluar el comportamiento del aporte de corriente en los motores M-T7-1 y M-T7-2 durante la falla, se toman los valores de corriente en seis tiempos diferentes entre sí, pero iguales para cada uno de los motores analizados. En la Figura 16 se observa que gráficamente las corrientes de los motores se traslapan, además se observan los valores de corriente obtenida en cada una de las máquinas. En la Tabla 16, se presenta el resumen de los valores del aporte de corriente y el tiempo en que se toma el valor, para cada motor durante la falla.

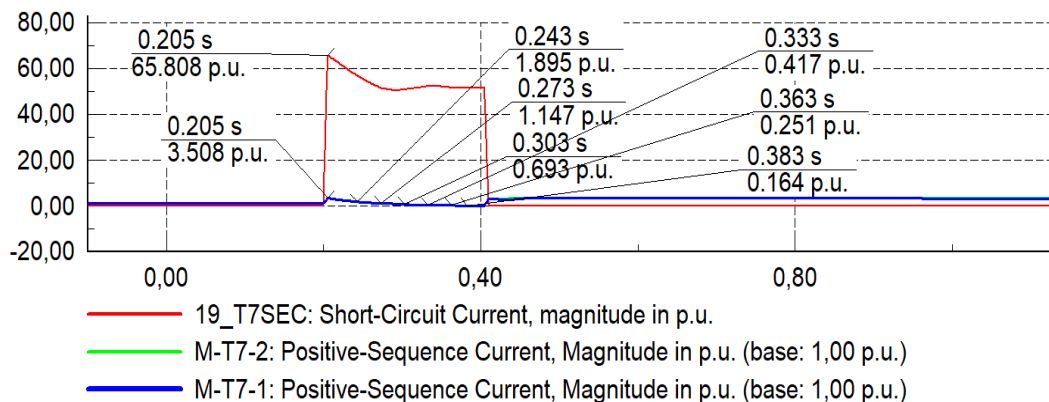


Figura 16. puntos de toma de valores para ambos motores, M-T7-2 Y M-T7-1,
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent.

Tabla 16. Valores tomados durante la falla

Decaimiento del aporte de los motores M-T7-1 y M-T7-2 conectados a la barra 19T7SEC @2,4 kV		
puntos de analisis	T1 (s)	I1 (p.u)
Punto 0 (falla)	0,205	3,508
Punto 1	0,243	1,895
Punto 2	0,273	1,147
Punto 3	0,303	0,693
Punto 4	0,333	0,417
Punto 5	0,363	0,251
Punto 6	0,383	0,164

Nota: la falla se presenta a los 0,2 s y dura 0,2 s

Fuente: elaboración propia

En la Figura 17 se observa la gráfica realizada con los datos presentados en la tabla anterior, se deduce que el aporte de corriente de cada uno de los motores decae de manera exponencial hasta los 383 ms donde llega a un valor de 0,16 p.u, lo que numéricamente se considera un cero.

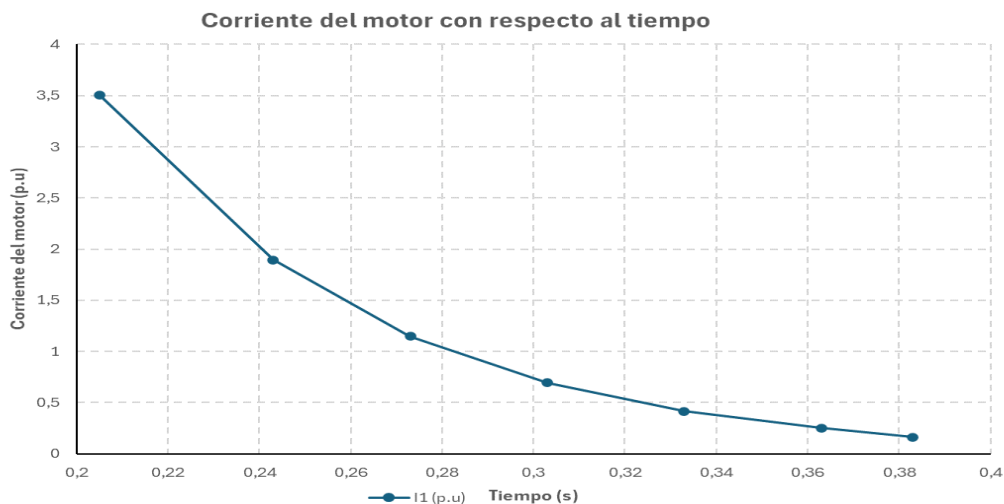


Figura 17. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla, Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 17 se presenta un resumen con los resultados de la falla trifásica en la barra 19T7SEC y el aporte de cada motor. En resumen, la corriente de falla trifásica en la barra es de 65,808 p.u, cada motor tubo un aporte del 3,508 corriente pu, y el sistema aporta una corriente a la falla de 58,794 pu. Con estos valores se concluye que el aporte de los motores es solo 10,66% del

total de falla, mientras que el sistema aporta el 89,34%. Además, se resalta que el mínimo aporte de los motores desaparece en un tiempo de 0,183 s, inferior a la duración de la falla.

Tabla 17. Datos y resultados del aporte de los motores al sistema

RESUMEN.		
FALLÁ TRIFÁSICA EN LA BARRA 19T7SEC @2,4 kV Y EL APOORTE AL CORTOCIRCUITO DE LOS MOTORES M-T7-1 y M-T7-2		
Variable	I (p.u)	t (s)
Cortocircuito 3F 19T7SEC (p.u)	65,808	0,205
Aporte Motor MT7-1 (1260 HP)	3,508	0,205
Aporte Motor MT7-2 (2500 HP)	3,506	0,205
Aporte del sistema al cortocircuito (p.u)	58,794	--
Aporte de cada motor a la falla	5,33%	--
Aporte total de ambos motores	10,66%	--
Aporte del sistema	89,34%	--

Fuente: elaboración propia

6.4.2 Falla monofásica en la barra 19T7SEC a 2,4kV

Al aplicar un cortocircuito monofásico a la barra 19T7SEC bajo las mismas condiciones de la falla trifásica analizada antes, se observa que la corriente de cortocircuito en la barra alcanza un valor de 64,409 en p.u, y el aporte de corriente en los motores alcanza 2,136 p.u. Estos valores se observan en la Figura 18

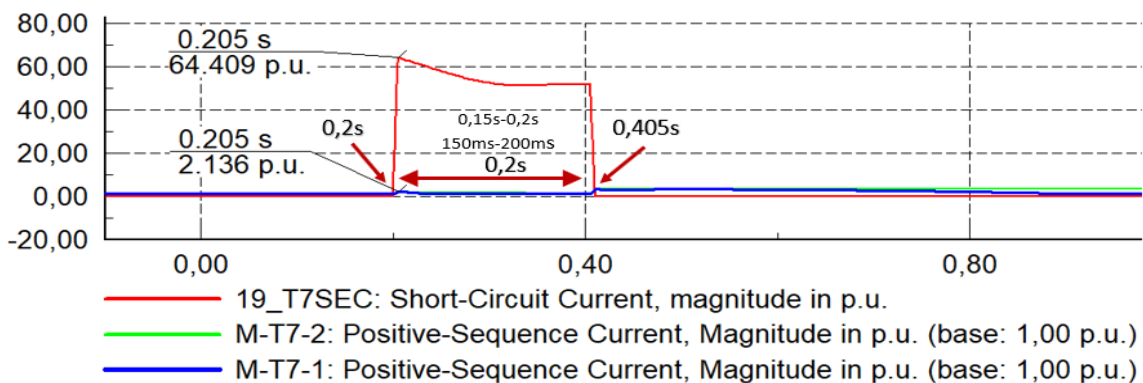


Figura 18, Detalles de picos máximos del sistema y de los motores,

Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Así como en la falla trifásica, para el análisis de la falla monofásica en esta barra, también se toma seis valores de corriente y el tiempo en el que se presenta para cada uno de los motores. En la Figura 19 y Figura 20 se muestra los valores de corriente para cada uno de los motores durante la falla monofásica, pues debido a la diferencia de potencia entre ambos motores, las gráficas no son iguales. En la Tabla 18 se presenta un resumen de los datos obtenidos para cada uno de los motores.

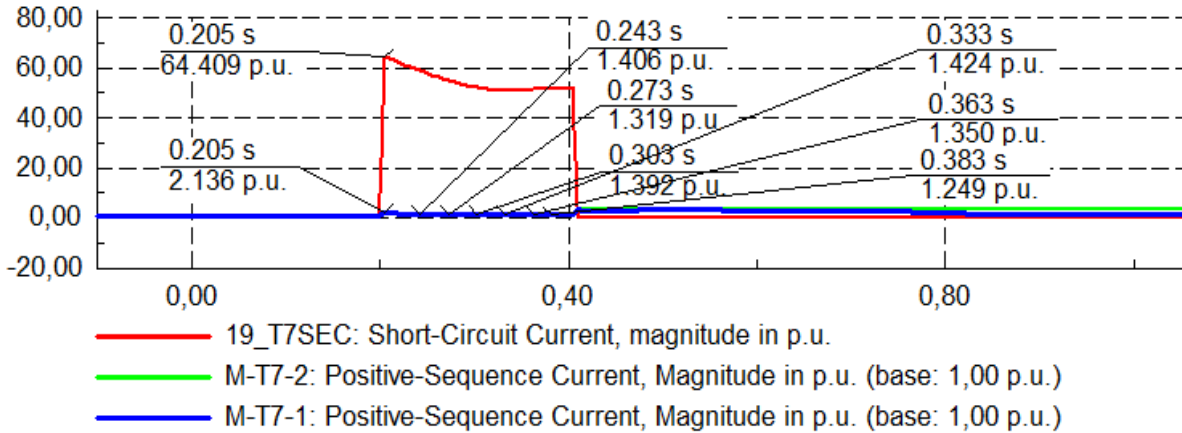


Figura 19. puntos de toma de valores para el motor, M-T7-1,
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

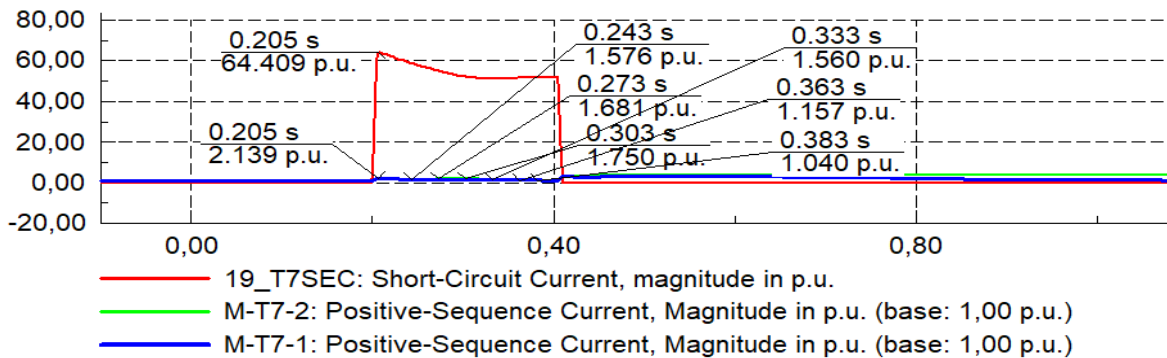


Figura 20. puntos de toma de valores para el motor, M-T7-2,
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Tabla 18. valores tomados de los dos motores durante la falla.

Decaimiento del aporte de los motores M-T7-1 y M-T7-2 conectados a la barra 19T7SEC @2,4 kV			
puntos de analisis	T1 (s)	I1 (p.u)	I1 (p.u)
		Motor MT7-1	Motor MT7-2
Punto 0 (falla)	0,205	2,136	2,139
Punto 1	0,243	1,406	1,576
Punto 2	0,273	1,319	1,681
Punto 3	0,303	1,392	1,750
Punto 4	0,333	1,424	1,560
Punto 5	0,363	1,350	1,157
Punto 6	0,383	1,249	1,040

Nota: la falla se presenta a los 0,2 s y dura 0,2 s

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 21, se observa que el aporte de corriente de los motores, aunque decae, su valor es cercano al 50% del aporte inicial. A diferencia de lo que ocurre durante la falla trifásica, cuando se presenta una falla monofásica, el aporte al cortocircuito de los motores, aunque numéricamente inferior al que se presenta en la falla trifásica, se mantiene persistentemente en el tiempo.

Este es explicado porque ambos motores, ante la pérdida de una fase, intenta seguir girando aportando a la falla por medio de las dos fases sanas a las cuales se conecta.

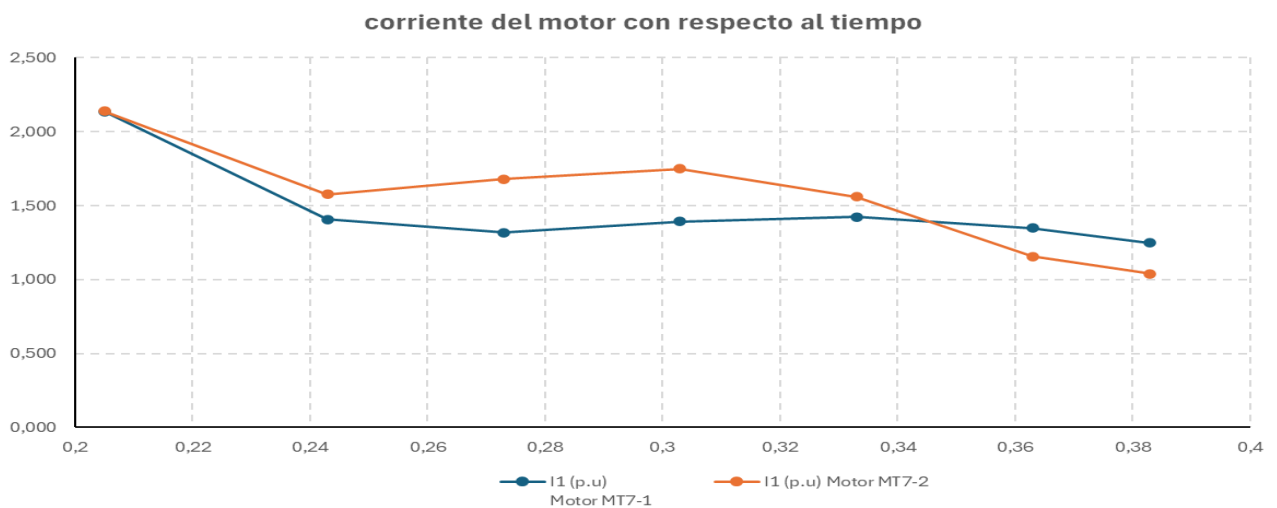


Figura 21. Grafica del comportamiento de los dos motores durante la falla, elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19 se presenta en resumen los datos y resultados del aporte de los motores M-T7-1 y M-T7-2, conectados a la barra 19T7SEC, a la red eléctrica. Se dice que el pico máximo de la corriente en barra donde se generó el cortocircuito fue de 64,409 p.u, al mismo tiempo, se observa que cada motor hizo aporte de corriente de 2,236 p.u; por su parte, el sistema eléctrico aportó al cortocircuito una corriente de 60 p.u. Estos resultados permiten concluir que, el aporte de los motores a la corriente de cortocircuito es de solo un 3,32% individualmente, y entre ambos, el aporte es de 6,63%.

Tabla 19. Datos y resultados del aporte de los motores al sistema

RESUMEN.		
FALLÁ MONOFASICA EN LA BARRA 19T7SEC @2,4 kV Y EL APORTE AL CORTOCIRCUITO DE LOS MOTORES M-T7-1 y		
Variable	I (p.u)	t (s)
Cortocircuito 2F 19T7SEC (p.u)	64,409	0,205
Aporte Motor MT7-1 (1260 HP)	2,136	0,205
Aporte Motor MT7-2 (2500 HP)	2,136	0,205
Aporte del sistema	60	--
Cada motor aporta a la falla	3,32%	--
Total aporte de ambos motores	6,63%	--
El aporte restante proviene del sistema	93,37%	--

Fuente: elaboración propia

6.4.3 Falla trifásica en la barra 29T11Sec a 0,48kV

Aplicando en la barra 29T11Sec las mismas pruebas que se hicieron en la barra 19TE7SEC, iniciando un cortocircuito de duración de 0.2s, que se aplica a los 0,2 s del inicio de la simulación, se observa en la Figura 22, un pico máximo de corriente de cortocircuito equivalente al 29,742 p.u en la barra 29T11SEC. Los motores MT11-1 y MT11-2 presentan un pico máximo de corriente de 6,607 p.u.

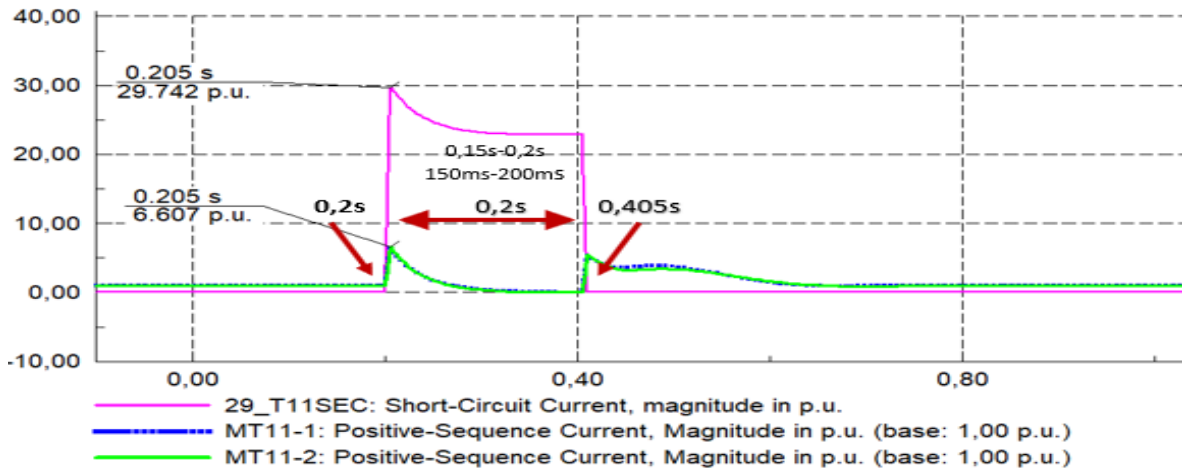


Figura 22. Detalles de picos máximos del sistema y de los motores, extraída del DigSilent
 Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Para estudiar la evolución temporal de la corriente durante los 2 segundos de falla, se llevó a cabo un muestreo de 6 puntos. Al observar que ambos motores presentaron una respuesta prácticamente idéntica ante la perturbación, se decidió analizar los datos de manera conjunta. Las gráficas de corriente se muestran en la Figura 23 y los resultados se presentan en la Tabla 20.

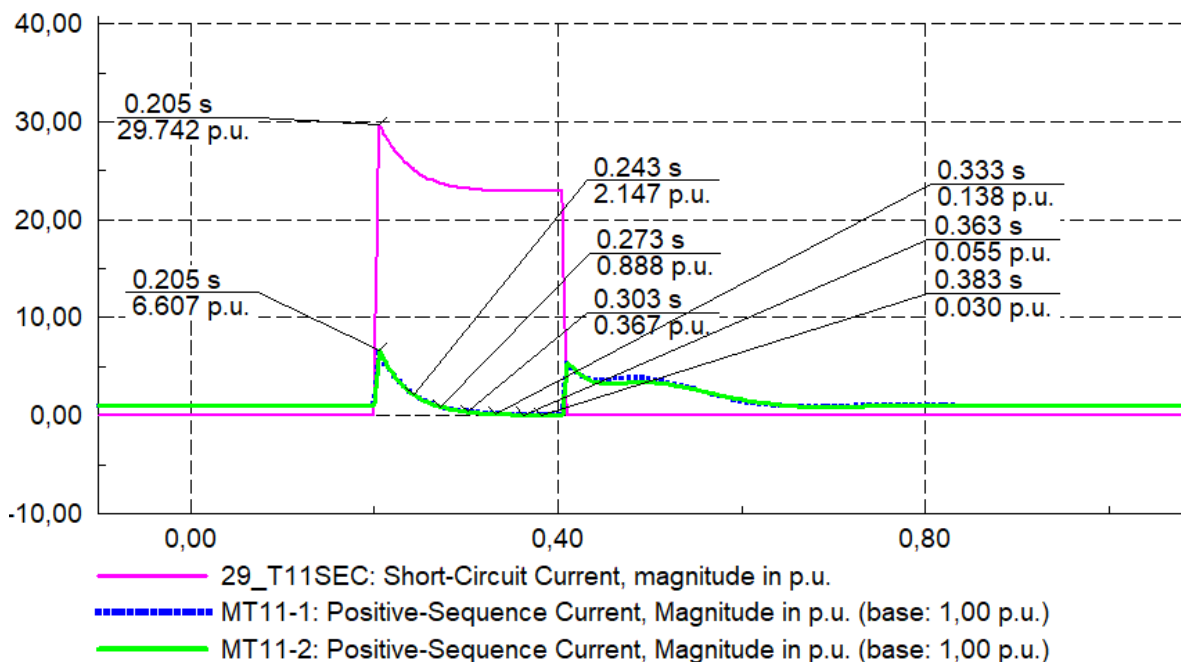


Figura 23. puntos de valores para los motores, M-T11-1 Y M-T11-2, extraída del DigSilent.
 Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Tabla 20. valores tomados de los dos motores durante la falla

Decaimiento del aporte de los motores M-T11-1 y M-T11-2 conectados a la barra 29T11SEC @0,48 kV		
puntos de analisis	T1 (s)	I1 (p.u)
Punto 0 (falla)	0,205	6,607
Punto 1	0,243	2,147
Punto 2	0,273	0,888
Punto 3	0,303	0,367
Punto 4	0,333	0,138
Punto 5	0,363	0,055
Punto 6	0,383	0,030

Nota: la falla se presenta a los 0,2 s y dura 0,2 s

Fuente: elaboración propia

En la Figura 24, se graficó la evolución del aporte de los motores, con respecto al tiempo. En esta figura se observa una disminución gradual de la corriente del motor a lo largo del tiempo, llegando a un valor cercano a cero después de 0,4s.

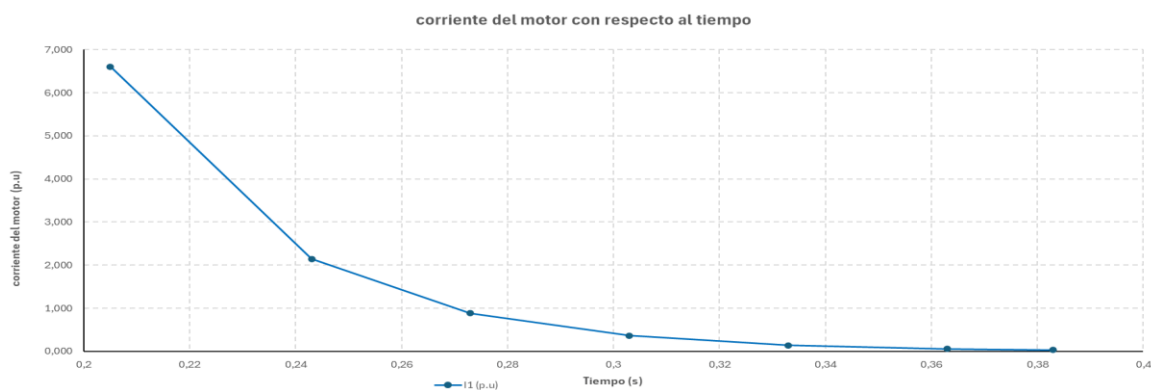


Figura 24. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla

Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

En la Tabla 21 de forma resumida, se presentan los datos y resultados del aporte de los motores MT11-1 y MT11-2 a la barra 29_T11sec. En la barra el pico máximo de la corriente de cortocircuito fue de 29,742 p.u., cada uno de los motores hizo un aporte a la corriente de cortocircuito de 6,607 p.u., para un aporte en conjunto de ambos motores de 17 p.u. Deduciendo, el aporte a la corriente de cortocircuito trifásico en la barra, de ambos motores, fue del 44,43%, el aporte restante del 55,57% provino del sistema. Se resalta que, para una falla trifásica, la magnitud del aporte de los motores es mayor cuando la barra es de baja tensión, en comparación al que se presenta en las barras de media tensión; a pesar de que la potencia de los motores conectados en baja tensión es inferior a los conectados en media tensión.

Tabla 21. Datos y resultados del aporte de los motores al sistema

RESUMEN.		
FALLA TRIFÁSICA EN LA BARRA 29T11SEC @0,48 kV Y EL APOORTE AL CORTOCIRCUITO DE LOS MOTORES M-T11-1 y M-T11-2		
Variable	I (p.u)	t (s)
Cortocircuito 3F 29T11SEC (p.u)	29,742	0,205
Aporte Motor MT11-1 (625 HP)	6,607	0,205
Aporte Motor MT11-2 (465HP)	6,607	0,205
Aporte del sistema	17	--
Cada motor aporta a la falla	22,21%	--
Total aporte de ambos motores	44,43%	--
El aporte restante proviene del sistema	55,57%	--

Fuente: elaboración propia

6.4.4 Falla monofásica en la barra 29T11Sec a 0,48kV

Finalmente, se analizó la falla monofásica a tierra en la barra 29T11Sec, con las mismas características de duración a las fallas antes analizadas. El pico máximo corriente de cortocircuito monofásico que se presentó en la barra fue de 29,520 en p.u., el aporte a la corriente de falla de cada uno de los motores fue de 4,048 en p.u. Estos valores se muestran con detalle en la Figura 25, la cual presenta los picos máximos del sistema y de los motores.

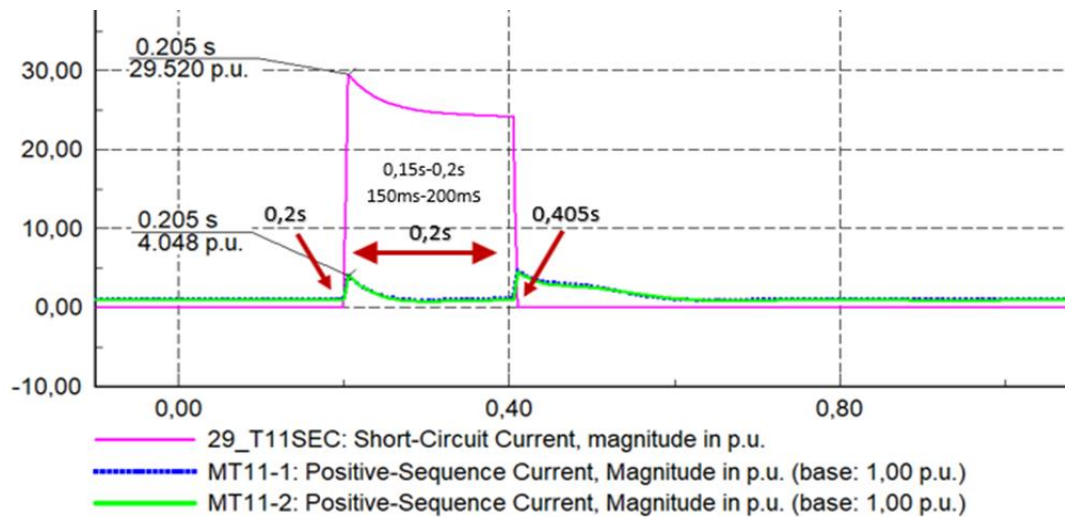


Figura 25. Detalles de picos máximos del sistema y de los motores, extraída del DigSilent
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Para evaluar el comportamiento de la corriente durante el tiempo que dura la falla, tomando en cuenta que la duración es de 2s, se procede a realizar una toma de 6 valores, estos puntos son iguales para ambos motores, debido a que gráficamente se observa que su comportamiento es igual y el aporte para ambos. En la Figura 26 se muestra la distribución de la toma en los puntos, al mismo tiempo, se puede observar gráficamente, como las corrientes de los motores se traslapan. En la Tabla 22 se resumen los resultados obtenidos.

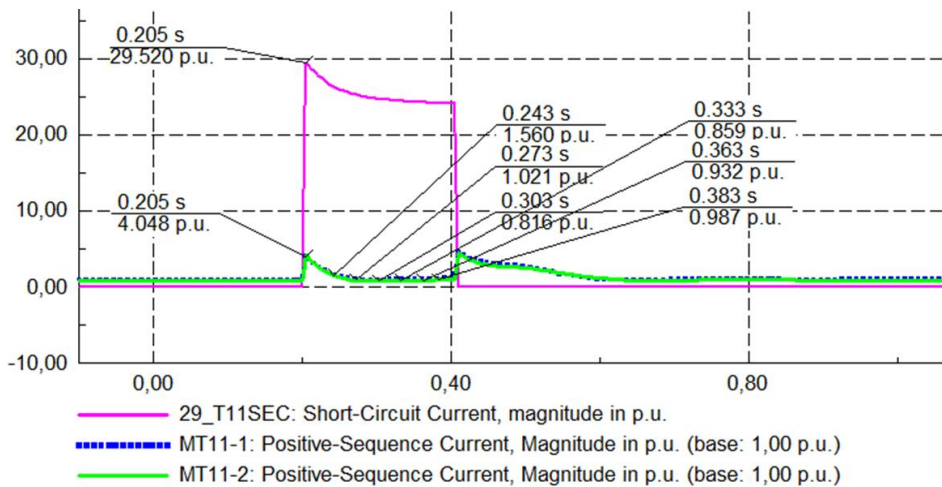


Figura 26. Puntos de toma de valores para ambos motores, M-T11-1 Y M-T11-2
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

Tabla 22. Valores tomados de los dos motores durante la falla

Decaimiento del aporte de los motores M-T11-1 y M-T11-2 conectados a la barra 29T11SEC @0,48 kV		
puntos de ar	T1 (s)	I1 (p.u)
Punto 0 (falla)	0,205	4,048
Punto 1	0,243	1,56
Punto 2	0,273	1,021
Punto 3	0,303	0,816
Punto 4	0,333	0,859
Punto 5	0,363	0,932
Punto 6	0,383	0,987

Nota: la falla se presenta a los 0,2 s y dura 0,2 s

Fuente: elaboración propia

En la Figura 27, se ve cómo se comporta el aporte de corriente de los motores ante una falla monofásica en la barra 29T11Sec, en la que se observa que el aporte, inicialmente cae y se estabiliza de manera estacionaria a un valor de 1 p.u, hasta la finalización del evento.

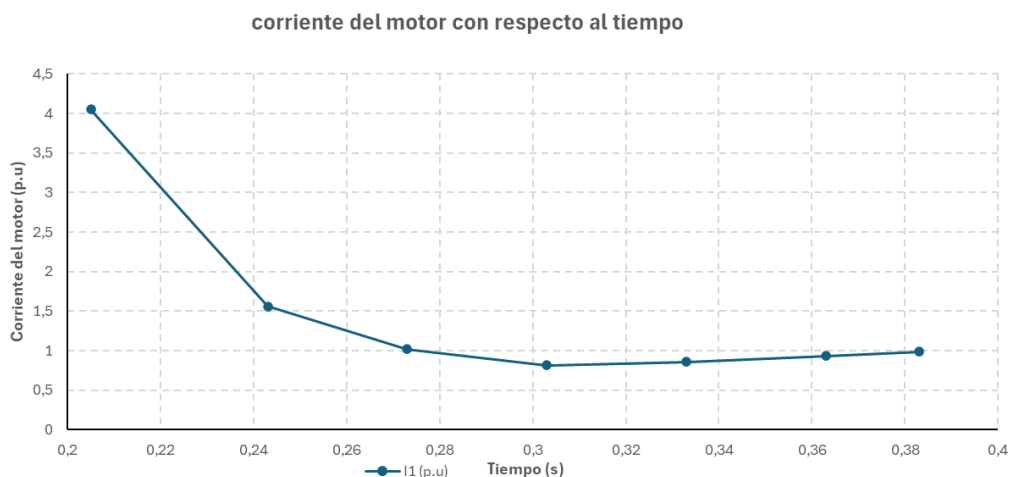


Figura 27. Grafica del comportamiento de la corriente de los motores durante la falla
Fuente: Elaboración propia extraída del DigSilent

En la Tabla 23 resumiendo los datos del aporte de los motores, se obtuvo una corriente de pico máximo de 29,529 p.u en la barra 29T11sec; teniendo en cuenta que el aporte de cada uno de los motores MT11-1 Y MT11-2 fue de 4,048 p.u. De esta manera se deduce que, el aporte total de la red eléctrica es de 21-424 corriente p.u. En porcentaje, cada motor contribuyo con el 13,71 %, ambos aportaron el 27,43% y el restante 72,57% provino del sistema.

Tabla 23. Datos y resultados del aporte de los motores al sistema

RESUMEN.		
FALLA MONOFASICA EN LA BARRA 29T11SEC @0,48 kV Y EL APOORTE AL CORTOCIRCUITO DE LOS MOTORES M-T11-1 y M-T11-2		
Variable	I (p.u)	t (s)
Cortocircuito 2F 29T11SEC (p.u)	29,520	0,205
Aporte Motor MT11-1 (625 HP)	4,048	0,205
Aporte Motor MT11-2 (465HP)	4,048	0,205
Aporte del sistema	21,424	--
Cada motor aporta a la falla	13,71%	--
Total aporte de ambos motore	27,43%	--
El aporte restante proviene del siste	72,57%	--

Fuente: elaboración propia

7 Conclusiones

Al comparar el flujo de carga realizado en DigSilen con el modelo presentado en la norma IEEE Std 399-1997, se puede afirmar que las diferencias de resultados obtenidos para cada uno de los elementos que componen la red están dentro del rango aceptable según los criterios que permite la solución numérica. Estas diferencias, que son inferiores al 2.5%, son indicativas de una alta consistencia entre ambos modelos. Este margen de discrepancia es técnicamente aceptable y se puede atribuir a pequeños ajustes en los algoritmos de cálculo o diferencias mínimas en los parámetros de entrada entre los dos sistemas.

Los resultados obtenidos no solo confirman la validez de los métodos utilizados en la simulación de carga, sino que también avalan la precisión y robustez del software DigSilent. En este sentido, los datos empleados para la construcción del modelo son confiables y adecuados para este tipo de estudios de simulaciones de una red eléctrica tipo industrial.

Esta validación es fundamental dentro de nuestra investigación, ya que proporciona una base sólida en el análisis del aporte de los motores de inducción al cortocircuito, contribuyendo a una mejor toma de decisiones en el diseño y la operación de sistemas eléctricos.

Tras concluir que el modelo es numéricamente confiable, se procedió a realizar las pruebas de arranque de los motores. Durante estas pruebas, se observó una alta corriente de arranque de los motores, que puede afectar a otros dispositivos electrónicos conectados a la red; aunque una forma de mitigar este efecto es utilizando arrancadores suaves o variadores de frecuencia. Estos dispositivos evitan caídas de tensión excesiva durante el arranque de los motores, mejorando la estabilidad del sistema eléctrico en su conjunto. Por esta razón, es fundamental emplear un diseño eléctrico de tipo industrial que ofrezca un alto nivel de confiabilidad, no solo para optimizar el rendimiento de los motores, sino también para prevenir futuras altas variaciones en la tensión y la corriente.

Conocer el aporte de los motores de inducción a los cortocircuitos a través de un software de simulación es fundamental para asegurar la eficiencia y la seguridad de un sistema eléctrico. Esto permite calcular con precisión las corrientes de falla en diferentes puntos de la red, lo que es esencial para dimensionar correctamente dispositivos de protección, celdas de seccionamiento y centro de control de motores entre otros equipos.

Además, tener en cuenta el aporte de los motores durante un cortocircuito es crucial para prevenir posibles daños en equipos y accidentes sobre el personal operativo.

Es importante destacar que, en el caso de una falla trifásica, la magnitud del aporte de los motores es considerablemente mayor en las barras de baja tensión en comparación con aquellas de media tensión.

En un sistema de baja tensión, los motores pueden contribuir significativamente a la corriente de cortocircuito debido a su menor impedancia interna, lo que permite que fluyan mayores corrientes de falla cuando ocurre un cortocircuito. Esto se traduce en una respuesta rápida y un aporte elevado de corriente.

8 Bibliografía

- De Metz-Noblat, B., Dumes, F., & Thomasset, G. (2000). *Cuaderno Técnico n° 158 Cálculo de corrientes de cortocircuito*. <http://www.schneiderelectric.es>
- Howard, D. F., Habetler, T. G., Harley, R. G., IEEE Power & Energy Society, IEEE Power Electronics Society, IEEE Industry Applications Conference, IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2013.05.12-15 Chicago, Ill., & Howard, D. F. (2013). *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 12-15 May 2013, Chicago, Illinois, USA*.
- Huening Jr, W. C. (1982). Calculating Short-Circuit Currents with Contributions from Induction Motors. In *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* (Issue 2).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. (2006). *IEEE Std 551-2006 Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Violet Book)*.
- Maljkovic, Z., Cettolo, M., & Pavlica, M. (n.d.). *INDUCTION MOTOR'S CONTRIBUTION TO SHORT CIRCUIT CURRENT*.
- Maljkovic, Z., Cettolo, M., & Pavlica, M. (2001). *The Impact of Induction Motor on Short-Circuit Current*. 11–17.
- Sorrentino, E., & Vera, A. (2023). Improved equation to describe the induction motor currents during nearby three-phase short-circuits. *IET Electric Power Applications*, 17(3), 370–380. <https://doi.org/10.1049/elp2.12274>
- Stojanovic, D., Veselinovic, M., Mitrovic, N., Korunovic, L., & Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2000). *2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference*. (Vol. 3). IEEE.
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (1997). *IEEE Std 399-1997 Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88568>
- Yu, L. Y., Minceff, I., Hamilton, D. W., & Bottrell, G. W. (1982). Motor Contribution During Three-Phase Short Circuit Fault. In *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* (Issue 6).

