

Desarrollo de aplicativo en Excel para el cálculo de los niveles de corto circuito en instalaciones eléctricas industriales y comerciales según estándar IEEE 3002.3-2018.

Steven Mauricio Chaustre Garavito

Trabajo de Grado para Optar el título de
Ingeniero Electricista

Director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Al Dr. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, por su apoyo permanente, su paciencia y su acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de grado, así como por las enseñanzas y la formación compartida a lo largo de mi proceso académico.

Dedicatoria

La elaboración de esta tesis de grado no solo refleja la profundización de un tema específico, sino algo mucho más importante y profundo: la realización y culminación de una etapa, tal vez extensa, pero llena de significado. Una etapa que no solo representa un logro personal, sino también el esfuerzo, el apoyo y la berraquera de todas las personas que, de innumerables formas, me hicieron posible poder decir hoy estudie en la UIS. Agradezco profundamente a mi madre, **Martha**, quien siempre ha tenido palabras de ánimo y ha estado a mi lado apoyando cada idea que he tenido; sus oraciones diarias han cuidado y guiado mi caminar. A mi padre, **José**, quien, aunque ya no esté físicamente, permanece siempre conmigo a través de sus consejos y de esa parte de él que me acompaña y me orienta en cada paso. A **Laura García Luna**, quien ha sido como una segunda madre, siempre dispuesta a orientarme, escucharme y ayudarme cuando más lo he necesitado, brindándome consejos valiosos y, sobre todo, su amistad y guía. A **Viviana Guiza**, quien ha sido parte fundamental de mi proceso, no solo académico sino también personal, compartiéndome consejos de vida que han marcado mi camino. A **Yadira**, por su amor, compañía y comprensión, y por impulsarme constantemente a alcanzar este logro y que me ha dado una alegría demasiado grande, Nathan. A mi amigo **Brayan Herrera y su familia**, con quien compartí gran parte de esta aventura: noches enteras estudiando para “salvar” materias, siempre con las puertas de su casa y de su familia abiertas, viviendo innumerables momentos inolvidables dentro de esta alma máter; y, por supuesto, las risas nunca faltaron. Finalmente, agradezco a cada uno de **mis compañeros, profesores, familiares y a todas las personas** que, de una u otra manera, contribuyeron a este logro.

A todos ustedes, siempre les estaré profundamente agradecido.

Tabla de Contenido

Introducción 11

1.Objetivo general..... 13

1.1Objetivos específicos 13

2. Conceptos Previos: Metodología para el Estudio de Cortocircuito 14

2.1 Preparación del diagrama unifilar..... 14

2.2 Definición de parámetros base y sistema por unidad..... 15

2.3 Modelado de equipos en valores por unidad..... 16

2.4 Construcción del modelo de red (método Zbus)..... 18

2.5 Cálculo de corrientes de falla..... 19

2.6 Evaluación del duty de los dispositivos de protección 19

3. Implementación de la Metodología en el Aplicativo Excel20

3.1 Datos de entrada requeridos por el estándar 20

3.2 Estructura del aplicativo y relación con la metodología..... 21

3.3 Recolección y preparación de datos..... 22

3.4 Validación del modelo y escenarios de estudio 23

3.5 Desarrollo del Aplicativo y Validación Comparativa..... 23

3.5.1 *Ejercicio de ejemplo* 27

3.5.2 *Validación comparativa con software comercial* 29

4. Conclusiones33

5. Recomendaciones38

Referencias Bibliográficas.....41

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelos de equipos para estudio de cortocircuito.....	17
Tabla 2. Estructura del aplicativo.....	22
Tabla 3. Descripción de cada hoja del aplicativo	26
Tabla 4. Datos del sistema del ejercicio de ejemplo (Sbase = 100 MVA).....	28
Tabla 5. Resultados comparacion.....	31
Tabla 6. Comparación entre Excel y OpenDSS con interruptor abierto.....	33

Lista de Figuras

Figura 1. Simbología Unifilar Basada en IEEE 315-1975	15
Figura 2. Sistema desbalanceado de voltajes trifásico descompuesto	17
Figura 3. Unifilar del caso ejemplo.	28
Figura 4. Resultados tomados del aplicativo del ejercicio 3	29
Figura 5. Ejercicio 3 implementado en la lógica de OpenDSS.....	30
Figura 6. Ejercicio 3 resultados en la lógica de OpenDSS	30
Figura 7. Resultados con el interruptor abierto.....	32
Figura 8. Resultados OpenDSS con interruptor abierto.....	32
Figura 9. Resultados de Coordinaciones para nodos	33

Lista de Apéndices

Apéndice A. Calculadora Icc ejercicio3 con protecciones

Resumen

Título: Desarrollo de aplicativo en Excel para el cálculo de los niveles de corto circuito en instalaciones eléctricas industriales y comerciales según estándar IEEE 3002.3-2018. *

Autor: Steven Mauricio Chaustre Garavito**

Palabras Clave: Instalación eléctrica industrial, estándar IEEE 3002.3-2018, corrientes de secuencia, Corrientes de corto circuito.

Descripción:

Dentro del diseño de instalaciones eléctricas comerciales o industriales es de gran importancia el estudio de corto circuito, siendo la base para la selección de conductores y protecciones. En el estándar IEEE 3002.3-2018 se dan recomendaciones prácticas para realizar este tipo de estudios, por lo que es necesaria su exploración a fin de incorporar estas recomendaciones en el diseño eléctrico.

Por lo anterior se plantea el presente trabajo de grado con el fin de desarrollar un aplicativo en Excel que posibilite el cálculo de las corrientes de corto circuito en este tipo de instalaciones, siguiendo las recomendaciones del estándar. Si bien, ya existen aplicaciones comerciales que realizan este tipo de cálculos, usualmente están orientados hacia un fabricante y no se conoce el método de cálculo.

*trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Director. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

Abstract

Title: Development of an Excel-Based Application for the Calculation of Short-Circuit Levels in Industrial and Commercial Electrical Installations According to IEEE Standard 3002.3-2018*

Author: Steven Mauricio Chaustre Garavito**

Keywords: Industrial electrical installation, IEEE Standard 3002.3-2018, sequence currents, short-circuit currents.

Description:

In the design of commercial or industrial electrical installations, short-circuit studies are of great importance, as they constitute the basis for the selection of conductors and protective devices. IEEE Standard 3002.3-2018 provides practical recommendations for performing this type of study; therefore, its analysis is necessary in order to incorporate these recommendations into electrical design.

For this reason, this undergraduate thesis proposes the development of an Excel-based application that enables the calculation of short-circuit currents in industrial and commercial electrical installations, following the recommendations of the standard. Although commercial software applications capable of performing these calculations already exist, they are usually oriented toward a specific manufacturer, and their calculation methodology is not always disclosed.

*Degree project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Advisor: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor of Science with an Emphasis in Electrical Engineering.

Introducción

Para la formulación de los diseños de instalaciones eléctricas industriales y comerciales, el estudio de las corrientes de cortocircuito constituye uno de los análisis fundamentales para garantizar la seguridad, confiabilidad de la instalación y el correcto funcionamiento del sistema. Las corrientes de cortocircuito determinan aspectos importantes, tales como la selección y coordinación de dispositivos de protección, el dimensionamiento de conductores, la capacidad de permanecer en funcionamiento los equipos y el nivel de riesgo asociado dado por el arco eléctrico. En Colombia, este tipo de estudios es exigido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) lo que es imprescindible para cualquier estudio eléctrico hecho en el país.

El estándar IEEE 3002.3-2018, Recommended Practice for Conducting Short-Circuit Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE, 2018), es la referencia técnica de mayor reconocimiento para este tipo de análisis en sistemas de corriente alterna de baja y media tensión. Establece los procedimientos analíticos, los modelos de equipos y los criterios ANSI para el cálculo de corrientes de falla balanceadas y desbalanceadas.

Aunque existen diversas herramientas comerciales para el cálculo de cortocircuitos, estas suelen estar orientadas hacia un fabricante específico y no exponen el procedimiento de cálculo al usuario. Esta situación dificulta la comprensión del fundamento teórico y normativo por parte del estudiante de ingeniería eléctrica (Glover et al., 2017). Por ello, resulta pertinente el desarrollo de un aplicativo en Microsoft Excel que implemente la metodología del estándar de forma transparente y trazable, usando Python para las operaciones matriciales.

Dicho esto, es pertinente el desarrollo de un aplicativo en Microsoft Excel que permita el cálculo de las corrientes de cortocircuito en instalaciones eléctricas industriales y comerciales, bajos los procedimientos del estándar IEEE 3002.3-2018. Al usar Excel como plataforma de desarrollo nos da facilidad para comprender el procedimiento y tener fácil interactividad y la posibilidad de la fácil apertura en la mayoría de los dispositivos. Adicionalmente, la intención del aplicativo es ser usada como una facilidad académica de apoyo de los estudios de cortocircuito por parte del estudiante.

De esta manera, el presente trabajo de grado contribuye a la apropiación de las metodologías recomendadas por el IEEE 3002.3-2018, al tiempo que busca formar una

herramienta de fácil uso por parte de los estudiantes para los estudios de cortocircuito en instalaciones residenciales y comerciales. El aplicativo formado en este trabajo no busca competir con software comercial ya existente sino por el contrario complementar la comprensión del uso y los cálculos hechos en ellos.

En consonancia con lo anterior, el presente trabajo se estructura en torno a los siguientes objetivos:

1.Objetivo general

Desarrollar un aplicativo en Excel para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en instalaciones industriales y comerciales en corriente alterna, basado en el estándar IEEE 3002.3-2018.

1.1Objetivos específicos

Documentar la metodología para el estudio de cortocircuito en instalaciones industriales y comerciales recomendada en el estándar IEEE 3002.3-2018.

Implementar la metodología y las rutinas necesarias para el cálculo de corrientes de cortocircuito en una instalación industrial o comercial.

Validar el desempeño del aplicativo comparando los resultados de casos de estudio con los generados por una aplicación comercial.

2. Conceptos Previos: Metodología para el Estudio de Cortocircuito

El estándar *IEEE 3002.3-2018* estructura el estudio de cortocircuito como un proceso secuencial de seis etapas: (1) preparación del diagrama unifilar, (2) definición de parámetros base, (3) modelado de equipos en valores por unidad, (4) construcción del modelo de red, (5) cálculo de corrientes de falla y (6) evaluación del *duty* de los dispositivos de protección (IEEE, 2018, §6.3). Este capítulo documenta ese proceso paso a paso.








2.1 Preparación del diagrama unifilar

El primer paso consiste en elaborar el diagrama unifilar del sistema, identificando todos los buses (nodos), elementos de interconexión y fuentes de contribución. El estándar recomienda usar la simbología definida en IEEE 315-1975 para garantizar la coherencia entre el diagrama y el modelo matemático (IEEE, 2018, §6.4). Cada bus debe numerarse y cada elemento debe ser identificado con su tipo (transformador, cable, generador, motor) y sus parámetros eléctricos relevantes.

El diagrama unifilar cumple una función doble: sirve como herramienta de comunicación técnica y como mapa del modelo matemático. Una representación incompleta o ambigua puede introducir errores en etapas posteriores del estudio. A continuación, se muestra elementos usualmente usados

Figura 1.

Simbología Unifilar Basada en IEEE 315-1975

Símbolo	Elemento	Referencia
	Transformador de 2 devanados	IEEE 315-1975
	Interruptor automático (CB)	IEEE 315-1975
	Barra colectora (bus)	IEEE 315-1975
	Generador síncrono	IEEE 315-1975
	Red equivalente / utilidad	IEEE 3002.3-2018 / IEEE 315-1975
	Cable o conductor	IEEE 315-1975
	Carga pasiva	IEEE 315-1975

Es necesario segmentar el diagrama unifilar del circuito mediante la asignación de números de bus cuando hay barras con tres o más conexiones, las conexiones de servicios públicos y terminales del generador y en los terminales de los motores cuando se representa la conexión del cable al motor.

2.2 Definición de parámetros base y sistema por unidad

El estándar recomienda trabajar en el sistema por unidad (p.u) para eliminar la necesidad de ajustar impedancias al atravesar transformadores y facilitar el manejo de sistemas con múltiples niveles de tensión (IEEE, 2018, §6.5; Glover et al., 2017, cap. 3). Se eligen dos magnitudes base de manera independiente, generalmente la potencia base *Sbase* en MVA y la tensión base kV por nivel de tensión; las demás se derivan:

Potencia Aparente Base (*Sbase*): Por lo regular es la primera cantidad para escoger, entre los valores más comunes son 10 MVA o 100 MVA.

Voltaje Base (kV_{base}): Se elige un nivel de tensión global para el sistema, así mediante la relación de transformación de los transformadores haremos el cambio a los otros niveles de tensión del sistema.

Impedancia Base (Z_{base}) y Corriente Base (I_{base}): Esta cantidad se calculará a partir de las dos anteriores mediante la ley de ohm. $Z_{base} [\Omega] = kV_{base}^2 / S_{base} [MVA]$, $I_{base}[kA] = S_{base} / (\sqrt{3} \cdot kV_{base})$

Para convertir la impedancia de un equipo expresada en ohmios o en porcentaje de su propia base al sistema base del estudio se aplica:

$$Z_{pu_nuevo} = Z_{pu_equipo} \times \left(\frac{kV_{equipo}}{kV_{base_sistema}} \right)^2 \times \left(\frac{MVA_{base_sistema}}{MVA_{equipo}} \right) \quad (1) \text{ (IEEE, 2018, §6.5).}$$

2.3 Modelado de equipos en valores por unidad

Cada elemento que contribuye a la corriente de cortocircuito se representa como una fuente de tensión detrás de una impedancia equivalente (IEEE, 2018, §7.1). La Tabla 1 resume los modelos de los equipos principales y las referencias normativas asociadas.

El estándar establece que, para fallas balanceadas, la secuencia negativa es igual a la positiva ($Z_2 = Z_1$), mientras que la secuencia cero depende de la conexión del neutro de transformadores y generadores (IEEE, 2018, §8.2). Esta distinción es fundamental para el cálculo de fallas desbalanceadas, y se requiere un análisis más complejo que reducirlo a un equivalente monofásico, para esto se hará el uso los componentes simétricos para el cálculo de cortocircuitos, reduciremos un sistema de fasores desequilibrados a 3 sistemas de fasores equilibrados de secuencia positiva, negativa y cero y son utilizados para fallas vistas anteriormente, L-G, L-L, L-L-G. La siguiente imagen muestra un sistema desbalanceado trifásico.

Figura 2.

Sistema desbalanceado de voltajes trifásico descompuesto

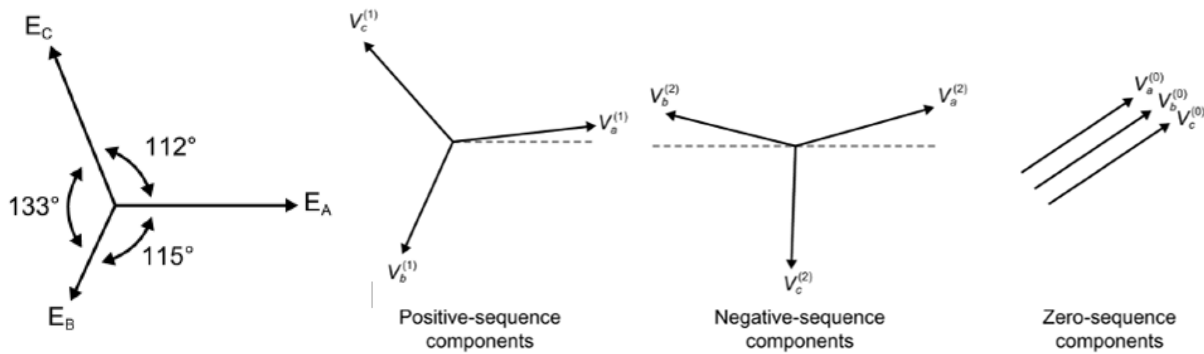


Tabla 1.

Modelos de equipos para estudio de cortocircuito

Equipo	Modelo en pu	Dato de placa requerido	Referencia
Red de suministro	$X_s = S_{base} / S''_{cc}$	MVA de cortocircuito, relación X/R	IEEE (2018), §7.2
Transformador	$ZT = uk\% \times (S_{base}/S_n)$	uk%, Pcu [W], MVA nominal	IEEE (2018), §7.5
Generador síncrono	$X''_{dv} = X''\% \times (S_{base}/S_n)$	Reactancia subtransitoria X''_{dv} , Ta3	IEEE (2018), §7.3
Motor de inducción	$X'' = 16.7\% \times (S_{base}/S_n)$	HP o kVA nominal, tensión	IEEE (2018), §7.4
Cable / Línea	$R, X [pu] = R, X [\Omega/km] \times L / Z_{base}$	Calibre, longitud, configuración	IEEE (2018), §7.7

Las maquinas síncronas tienen varias reactancias al momento de modelarlas para cortocircuitos.

X''_{dv} : Reactancia subtransitoria (saturada): Determina el flujo de corriente durante los primeros ciclos tras empezar el cortocircuito y es la reactancia aparente del devanado del estator. Esta reactancia puede durar hasta medio segundo.

T'_{dv} : Reactancia transitoria (saturada): Reactancia aparente del devanado del estator, relación entre el componente de frecuencia fundamental de la corriente de armadura

X_d : Reactancia síncrona (saturada): Relación entre el componente de frecuencia fundamental del voltaje de armadura reactivo (Vd.) al componente de secuencia positiva del eje directo de frecuencia fundamental de la corriente de armadura

X_{2V} : Reactancia de secuencia negativa (saturada): es la reactancia aparente que se determina al colocar una falla línea a línea en el terminal del generador a la tensión nominal.

X_{0V} : Reactancia de secuencia cero (saturada): reactancia aparente que se determina al colocar una falla de línea a tierra en el terminal del generador, de modo que circule la corriente nominal.

T_{a3} : Constante de tiempo de inducido de cortocircuito trifásico (saturado)

T''_{do}, T'_{do} : Constantes de tiempo subtransitoria y transitorias

2.4 Construcción del modelo de red (método Zbus)

El estándar recomienda el método de la matriz de impedancias nodal (Zbus) para sistemas industriales con topología mallada, por ser exacto y sistemático (*IEEE, 2018, §6.6.5; Anderson, 1995*). El procedimiento es:

a) Construcción de Ybus: Para cada secuencia (positiva/negativa y cero), la matriz de admitancias nodal se construye sumando las admitancias de todas las ramas en la diagonal ($Y[i,i] = \sum y_{\text{ramas}} + y_{\text{fuente}}$) y colocando el negativo de la admitancia de la rama en los términos fuera de la diagonal ($Y[i,j] = -y_{\text{rama}(i-j)}$).

b) Inversión de Ybus: La impedancia de Thévenin vista desde cada bus corresponde al elemento diagonal de la matriz inversa: $Z_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}}^{-1}$. Para sistemas industriales con elementos de impedancias muy dispares, esta inversión debe realizarse mediante álgebra lineal numérica (p.ej., eliminación gaussiana) en lugar de MINVERSE de Excel, para evitar errores de precisión.

c) Extracción de Zth: El elemento $Z[i,i]$ de Zbus representa la impedancia de Thévenin del bus i, que es el valor que se usa directamente en las fórmulas de corriente de falla.

2.5 Cálculo de corrientes de falla

El estándar define las expresiones para los cuatro tipos de falla considerados (*IEEE, 2018, §8.5–§8.7*):

Falla trifásica simétrica (3F): $I_{3F} = c \cdot I_{base} / |Z_{1th}|$, donde c es el factor de tensión ($c = 1.0$ estándar, $c = 1.05$ para corriente máxima en BT) e $I_{base} = S_{base} / (\sqrt{3} \cdot kV_{LL})$.

Corriente de pico asimétrica: $I_{pico} = \sqrt{2} \cdot I_{3F} \cdot (1 + e^{(-\pi / (X/R))})$, que corresponde al duty de cierre y enclavamiento del primer ciclo.

Falla fase-tierra (L-G): $I_a = 3 \cdot c \cdot I_{base} / |Z_{1th} + Z_{2th} + Z_{0th}|$. Requiere las tres redes de secuencia.

Falla fase-fase (L-L): $I_{LL} = \sqrt{3} \cdot c \cdot I_{base} / |Z_{1th} + Z_{2th}|$. Representa aproximadamente el 86,6 % de I_{3F} cuando $Z_1 = Z_2$.

Falla doble fase-tierra (L-L-G): $I_{max} = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot |Z_{2th}| / |Z_{2th} + Z_{0th}|$, donde $I_1 = c \cdot I_b / (Z_{1th} + Z_{2th} \parallel Z_{0th})$.

La falla gobernante en cada bus es aquella que produce la corriente máxima. En sistemas sólidamente aterrizados ($Z_0 \approx Z_1$), la falla trifásica suele ser gobernante (*IEEE, 2018, §8.7.4*).

2.6 Evaluación del duty de los dispositivos de protección

El duty es el valor de corriente de falla calculado al que se le aplican los factores multiplicadores por relación X/R, con el fin de hacerlo directamente comparable con la capacidad nominal (rating) del equipo (*IEEE, 2018, §9*). Se distinguen tres tipos:

Duty momentáneo (primer ciclo, 0–1 ciclo): Verifica la capacidad de cierre y la resistencia mecánica del bus. Se compara con la corriente pico del equipo.

Duty de interrupción (1,5–4 ciclos): Corriente que el interruptor debe extinguir. Incluye el decremento AC de máquinas rotantes y se corrige si el X/R del sistema supera el X/R de prueba del equipo

Duty de estado estable (>30 ciclos): Base para los ajustes de relés de sobreintensidad.

La Tabla 1 y 2 del estándar (IEEE, 2018, Tabla 1, 2) establece las relaciones X/R mínimas de prueba para distintos tipos de equipos. Si el X/R del sistema excede el del equipo, la corriente de duty debe multiplicarse por el factor de corrección correspondiente para hacer la comparación válida.

3. Implementación de la Metodología en el Aplicativo Excel

La metodología documentada en el anterior capítulo fue trasladada a un entorno de cálculo implementado en Microsoft Excel, con soporte de rutinas en Python para las operaciones matriciales. La arquitectura del aplicativo responde directamente a los requisitos de datos, modelado y presentación de resultados establecidos en el estándar IEEE 3002.3-2018 (IEEE, 2018, §12–§17). Es fundamental, la recolección de los datos de entrada disponibles para realizar los cálculos de corrientes de corto circuitos, no siempre más es mejor, siendo que entre menos datos tengamos, más conciso serán los resultados, como un diagrama unifilar fiel al sistema a estudiar ya sea que exista o que se deba modelar.

3.1 Datos de entrada requeridos por el estándar

El estándar define con precisión los parámetros que se deben conocer de cada elemento del sistema antes de iniciar el cálculo (IEEE, 2018, §12). La confiabilidad de los resultados depende directamente de la calidad de estos datos (IEEE, 2018, §14.2).

Red de suministro (utility): Nivel de tensión (kV), potencia de cortocircuito disponible (MVA) y relación X/R. Si no se dispone de estos datos, el operador de red puede suministrarlos como impedancia en porcentaje o como corriente de falla en kA con su ángulo (IEEE, 2018, §12.2). Las impedancias de las fuentes del operador de red deben ser dadas por la compañía eléctrica, debemos tener claro la ubicación y la tensión base de esa fuente que queremos estudiar. El operador de Red nos puede proporcionar información de dichas fuentes en formatos típicos como, MVA junto con ángulo de fase o Relación X/R, también nos pueden proporcionar la corriente de falla con ángulo de fase, otra opción sería la resistencia y la reactancia en ohmios, también la resistencia y reactancia pero en por unidad (p.u),y por último el porcentaje de resistencia y reactancia, en cada uno de estas posibilidades necesitaremos el nivel de voltaje con el que se hizo cada diferente calculo. Ahora bien, si el cálculo de la corriente de falla es de un sistema desequilibrado necesitaremos la impedancia de secuencia negativa y cero del operador de red y se expresan en

MVA con $kV_{ln} \times kA_{sCLG}$ que sería voltaje de línea por la corriente de falla para un cortocircuito línea-tierra(L-G), pero el que se proporciona por el operador de red casi siempre es $\sqrt{3} * kV_{ll} \times kA_{sCLG}$.

Generadores síncronos: En la placa del generador típicamente aparecerá información como el fabricante y el número de serie, el MVA nominal, voltaje, factor de potencia, frecuencia nominal, velocidad de la máquina, corriente nominal y tensión de campo. Muchas veces estos datos de placa no están en las máquinas y es necesario buscarlo o pedirlos al fabricante, hay que tener énfasis cuidado en pedir los datos que corresponden con el serial de la maquina porque muchos fabricantes reestructuran sus motores y eso podría tener que hacer nuevos cálculos en las impedancias de estos. Son necesarios los siguientes datos para calcular las corrientes de cortocircuitos: Reactancia subtransitoria X''_{dv} , reactancia transitoria X'_{dv} , reactancia de secuencia negativa X_{2v} , constante de tiempo de armadura T_{a3} , reactancia de secuencia cero X_0 , MVA y tensiones nominales (IEEE, 2018, §12.3).

Motores síncronos: Los mismos parámetros que los generadores, excepto que la curva de decremento es opcional (IEEE, 2018, §12.4).

Motores de inducción: Potencia nominal (HP o kVA), tensión, frecuencia, velocidad y letra de código NEMA, a partir de los cuales se determina la reactancia equivalente (IEEE, 2018, §12.5).

Transformadores: MVA nominal, tensiones primaria y secundaria, porcentaje de impedancia (uk%), pérdidas en el cobre (Pcu), número de devanados y configuración de conexión (IEEE, 2018, §12.6).

Cables y líneas: Tensión nominal, tipo de aislamiento, calibre, longitud, material del conductor y espaciamiento entre fases (IEEE, 2018, §12.11–§12.12).

3.2 Estructura del aplicativo y relación con la metodología

La arquitectura modular del aplicativo traduce cada etapa metodológica del estándar en un conjunto de hojas de cálculo interconectadas. Esta organización facilita la trazabilidad del estudio y permite modificar configuraciones sin alterar la lógica de cálculo (IEEE, 2018, §17).

Tabla 2.

Estructura del aplicativo

Hoja del aplicativo	Función	Etapa metodológica
Parámetros	<i>S</i> base, factor <i>c</i> , frecuencia	Paso 2: Parámetros base
Buses	Definición de nodos y tensión nominal	Paso 1: Diagrama unifilar
Ramas	Transformadores, cables, reactores ($R + jX$ en pu)	Paso 3: Modelado de equipos
Fuentes	Red, generadores, motores equivalentes	Paso 3: Modelado de equipos
Zth_Buses	Impedancias de Thévenin (diagonal de $Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$)	Paso 4: Modelo de red (Zbus)
Resultados	Corrientes 3F, L-G, L-L, L-L-G por bus (kA)	Paso 5: Cálculo de fallas
Duty_Protecciones	Comparación Icc calculada vs. rating del equipo	Paso 6: Evaluación del duty
Panel	Resumen ejecutivo de todos los buses	Paso 5 y 6: Presentación de resultados

3.3 Recolección y preparación de datos

Cuando se analiza un sistema existente, la información de entrada debe obtenerse de placas de características, hojas de datos del fabricante, documentos de diseño y resultados de pruebas o mediciones de campo. Para estudios conceptuales o sistemas sin información completa, es admisible recurrir a valores típicos representativos, siempre que su uso quede claramente documentado en la memoria de cálculo (*IEEE, 2018, §13.4*).

En el aplicativo, las hojas Parámetros, Buses, Ramas y Fuentes constituyen el núcleo de entrada. El ingreso de datos sigue una convención de colores: fondo amarillo para datos editables por el usuario, texto azul para fórmulas automáticas y texto verde para resultados calculados (*IEEE, 2018, §17.4*).

La construcción e inversión de la matriz Ybus se realiza mediante un script en Python (build_final.py) que utiliza la librería numpy para garantizar precisión numérica. La función numpy.linalg.inv implementa la eliminación gaussiana compleja, lo que supera las limitaciones de la función MINVERSE de Excel, que produce errores para matrices con elementos de magnitudes muy dispares (como acoples de barras con admitancia muy alta) (*Anderson, 1995, §2.4*).

Una vez ejecutado el script, los elementos diagonales de Zbus ($Z_{th}[i,i]$ para las secuencias positiva, negativa y cero) se escriben en la hoja Zth_Buses, desde donde las hojas de resultados los consumen mediante fórmulas de Excel.

3.4 Validación del modelo y escenarios de estudio

El estándar distingue entre los escenarios de máxima y mínima contribución de cortocircuito (*IEEE, 2018, §15.2*). El aplicativo permite analizar ambos configurando el factor c ($c = 1.0$ o $c = 1.05$ para BT) y activando o desactivando elementos mediante el campo "Activo" en las hojas de entrada. La validación del modelo exige, adicionalmente, que los resultados se contrasten con un cálculo independiente antes de utilizarlos para la selección de protecciones (*IEEE, 2018, §14.3*).

3.5 Desarrollo del Aplicativo y Validación Comparativa

Este capítulo presenta el paso a paso de la implementación del aplicativo Excel, el ejercicio de ejemplo utilizado para verificar los cálculos y la validación comparativa de los resultados obtenidos frente al software comercial seleccionado. El uso del aplicativo se desarrolla de manera secuencial y reproduce de forma operativa la metodología general del estudio de cortocircuito presentada en el marco metodológico. En lugar de ejecutar los cálculos de forma aislada, el usuario sigue una ruta estructurada de ingreso de datos, construcción del modelo eléctrico, obtención de impedancias equivalentes y revisión de resultados, lo cual permite conservar trazabilidad entre la información de entrada, el proceso de solución y las magnitudes calculadas. De esta forma, el aplicativo no se limita a entregar valores finales de corriente de falla, sino que organiza el procedimiento de análisis de acuerdo con una lógica consistente con el uso de la matriz de admitancias nodal, la obtención de la matriz de impedancias Zbus y la aplicación de las ecuaciones de cortocircuito para distintos tipos de falla. El proceso de uso del aplicativo sigue la secuencia metodológica descrita anteriormente y se ejecuta en los siguientes pasos:

Paso 1 – La primera etapa corresponde a la definición de los parámetros base del estudio. En esta hoja se ingresan la potencia base S_{base} en MVA, el factor de tensión c y la frecuencia nominal del sistema. Estos tres valores establecen la referencia común para el resto del modelo, ya que a partir de ellos se calculan corrientes base, impedancias en por unidad y magnitudes de

cortocircuito. En términos prácticos, esta hoja fija el marco numérico dentro del cual se interpretan todos los datos del sistema. Por ello, cualquier error en esta etapa afecta de forma global los resultados posteriores. El manual del aplicativo resalta que las celdas asociadas a la potencia base y al factor c son críticas, pues de ellas dependen todos los cálculos automáticos del archivo. Asimismo, para el caso de estudio se adopta la frecuencia nominal de 50 Hz , coherente con el análisis de sistemas industriales y comerciales bajo criterio ANSI.

Paso 2 – Definir los buses del sistema (hoja Buses): Registrar cada nodo con un ID único (sin espacios ni caracteres especiales), la tensión nominal kV_{LL} el estado Activo/No. Los IDs deben coincidir exactamente con los utilizados en las demás hojas. Esta etapa es fundamental porque los buses constituyen la estructura sobre la cual se construye la red eléctrica equivalente. Desde el punto de vista matricial, cada bus representa una posición dentro de las matrices de admitancia e impedancia, por lo que la consistencia en su nomenclatura resulta indispensable. El aplicativo exige que los identificadores coincidan exactamente con los utilizados en las hojas de ramas y fuentes, ya que cualquier discrepancia ortográfica o de formato puede impedir el ensamblaje correcto de la red y generar errores de cálculo.

Paso 3 – En esta etapa se modelan los elementos que enlazan eléctricamente los buses del sistema, tales como transformadores, cables y reactores. Para cada rama deben registrarse los buses terminales y las impedancias de secuencia positiva y cero en por unidad, expresadas como R_1 , X_1 , R_0 y X_0 . Estas impedancias deben estar referidas a la misma base de potencia y al nivel de tensión correspondiente, con el fin de mantener uniformidad en la construcción de la red. Su función dentro del aplicativo es representar el efecto limitante que tienen los elementos serie sobre la corriente de cortocircuito. En términos de la matriz Y_{bus} , cada rama aporta admitancias a la diagonal y fuera de la diagonal, de acuerdo con la conexión entre buses. Por ello, esta hoja traduce la topología física del sistema a una formulación matemática apta para el cálculo nodal.

Paso 4 – Ingresar las fuentes equivalentes (hoja Fuentes): Registrar la red de suministro, generadores y motores como admitancias shunt en sus buses de conexión. Para fuentes sin retorno de secuencia cero (neutro aislado), dejar $R_0 = X_0 = 0$ esto se hace por convención interna del aplicativo para indicar ausencia de camino de secuencia cero.

Paso 5 – Ejecutar el script Python: Desde la terminal, en la carpeta del archivo, ejecutar: `python calc_zbus.py`. El script construye Y_{bus} para cada secuencia, la invierte con `numpy.linalg.inv` y escribe los valores R_{th} , X_{th} en la hoja Z_{th_Buses} . A partir de la diagonal de estas matrices se extraen las impedancias de Thévenin vistas desde cada bus, es decir, los valores

R_{th} y X_{th} necesarios para calcular las corrientes de cortocircuito. El en manual se especificará que el script actualiza automáticamente determinadas columnas de la hoja Z_{th_Buses} , y aclara que, si solo se modifica la potencia base o el factor c sin alterar la topología del sistema, no es necesario volver a ejecutar Python porque Excel puede recalcular internamente las fórmulas dependientes de esos parámetros. Esto muestra que el aplicativo combina procesamiento externo para la solución matricial con recálculo interno para la presentación final de resultados.

Paso 6 – Revisar resultados en la hoja Panel: Verificar las corrientes I_{3F} , I_{pico} , I_{LG} , I_{LL} e I_{LLG} para cada bus activo, el bus crítico y la falla gobernante del sistema.

Paso 7- La hoja de Protecciones tiene como finalidad relacionar los niveles de cortocircuito calculados en el sistema eléctrico con la selección preliminar de dispositivos de protección. Esta etapa se fundamenta en los criterios generales de aplicación, selección y coordinación de protecciones establecidos en el IEEE Std 242-2001, conocido como Buff Book, el cual presenta recomendaciones para proteger sistemas eléctricos industriales y comerciales ante condiciones anormales de operación. Según esta práctica recomendada, el sistema de protección debe aislar rápidamente la zona afectada, limitar el daño sobre equipos y conductores, y mantener la continuidad del servicio en las partes no afectadas del sistema. El primer criterio considerado es la capacidad interruptiva del dispositivo. También se considera la capacidad de cierre o corriente pico, debido a que durante los primeros instantes de una falla la corriente puede presentar una componente asimétrica elevada. Otro aspecto incluido es la sensibilidad de la protección la cual busca verificar que el dispositivo pueda detectar la corriente mínima de falla dentro de su zona de protección

El proceso de uso del aplicativo sigue una secuencia lógica que inicia con la parametrización del sistema, continúa con la definición de su topología y sus fuentes de contribución, pasa por la solución matricial del problema eléctrico y culmina con la interpretación de resultados y la revisión del equipo de protección. Esta organización favorece la trazabilidad del estudio, mejora la comprensión del procedimiento de cálculo y permite que el usuario relacione de forma clara cada resultado con los datos y supuestos que le dieron origen.

Ahora bien habiendo explicado el paso a paso de lo lógica secuencial con que trabaja el aplicativo me parece pertinente definir la estructura del archivo de Excel, el aplicativo a grandes rasgos contiene dos componentes que se acoplan entre si, el primero es la calculadora creada en base a el estándar IEEE 3002.3 la cual contiene toda la estructura de datos, fórmulas y visualización y un macro que posee el archivo de Python que hace el único cálculo que Excel no puede hacer:

La impedancia de Thévenin de cada bus requiere invertir la matriz de admitancias Y_{bus} (una operación matricial $n \times n$). Excel no tiene función nativa para inversión de matrices complejas de más de 4×4 . El script `calc_zbus.py` usa `numpy.linalg.inv()` y escribe los resultados de vuelta en las celdas amarillas de la hoja `Zth_Buses`. A partir de ahí, todo es fórmulas Excel automáticas. Es necesario puntualizar que la que no es necesario volver correr el script de Python cada vez que se usa el aplicativo siempre y cuando el valor de c nominal=1 no se cambie y la potencia base con la que esta trabajando tampoco lo haga correspondiente a las casillas C4 Y C7 de la hoja de parámetros del aplicativo, y siendo el caso el aplicativo no le pide en ningún momento a usuario tener que salir de él o hacer ningún paso extra, el aplicativo solo necesita que el usuario ejecute `calc_zbus.py` desde terminal si se llega a cambiar la frecuencia o la potencia base.

La siguiente tabla resume el tipo de cada hoja y lo que contiene:

Tabla 3.

Descripción de cada hoja del aplicativo

Hoja	Tipo	Qué contiene
Inicio ●	Mixta	Identificación del estudio + resumen ejecutivo automático + flujo de trabajo
Manual ●	Solo lectura	Guía completa: teoría, fórmulas, conversión a pu, uso de cada hoja
Parámetros ●	Input	S_base, frecuencia, factor c — base de todos los cálculos
Buses ●	Input	ID, kV y estado de cada nodo del sistema
Ramas ●	Input	Transformadores, cables, reactores ($R1/X1/R0/X0$ en pu, serie entre buses)
Fuentes ●	Input	Red, generadores, motores (impedancias shunt al bus)
Zth_Buses ●	Semi-auto	Celdas amarillas = escritas por Python; resto = fórmulas Excel
Resultados ●	Solo fórmulas	I_3F , I_{pico} , X/R , I_{LLG} , I_{LL} , I_{LLG} , I_{cc_MAX} por bus (§8.5.2 y §8.7.4)
Protecciones ●	Mixta	Verificación de capacidad interruptiva, corriente pico, pickup y sensibilidad de protecciones según IEEE Std 242-2001
Panel ●	Solo fórmulas	Vista ejecutiva con config del estudio y máximos
Unifilar_ANSI ■	Manual	Área en blanco para dibujar el diagrama unifilar

3.5.1 Ejercicio de ejemplo

Para verificar el correcto funcionamiento del aplicativo, se implementó el Ejercicio 3 sacado de un compendio de ejercicios en sistemas de potencia de la universidad estatal de Oklahoma tomado de unos ejercicios de la universidad de madrid, correspondiente a un sistema industrial de media tensión con cuatro buses, dos transformadores, un cable y un generador síncrono con acople de barras (QB) cerrado.

Ejemplo 3

Una industria se alimenta de la red de UTE en 22kV. La subestación propia cuenta con dos transformadores que atienden cada uno un sector de la fábrica, pudiendo trabajar en paralelo, y con un generador de respaldo para las cargas alimentadas de la barra 2.

Parte 1: Calcular el cortocircuito trifásico en barras de 22kV

Parte 2: Calcular el cortocircuito trifásico de los interruptores del Tablero General de baja tensión, para las distintas configuraciones, e indicar cual es la configuración de mayor aporte.

Parte 3: Calcular el cortocircuito trifásico de los interruptores del tablero A, para la configuración de mayor aporte

Se desprecia: el efecto de los motores de BT, la impedancia de los ductos de barras (DB1 y DB2) e impedancia del cable de media tensión y la impedancia del cable del generador al Tablero General.

Datos:

Red:

Potencia de cortocircuito: $S_k'' = 500MVA$

Tensión compuesta: $U = 22kV$

Transformador T1 y T2:

Potencia nominal: $S_n = 500kVA$

Relación de transformación: $\frac{22}{0,4}kV$

Impedancia de Corto Circuito: $\mu_k = 4\%$, con consumo de activa: $P_{cu} = 19980W$

Cable:

Característica: $XLPE$, $4 \times 50mm^2$

Longitud: $50m$

Resistencia: $r_L = 0,495\Omega/km$

Reactancia: $x_L = 0,062\Omega/km$

Generador:

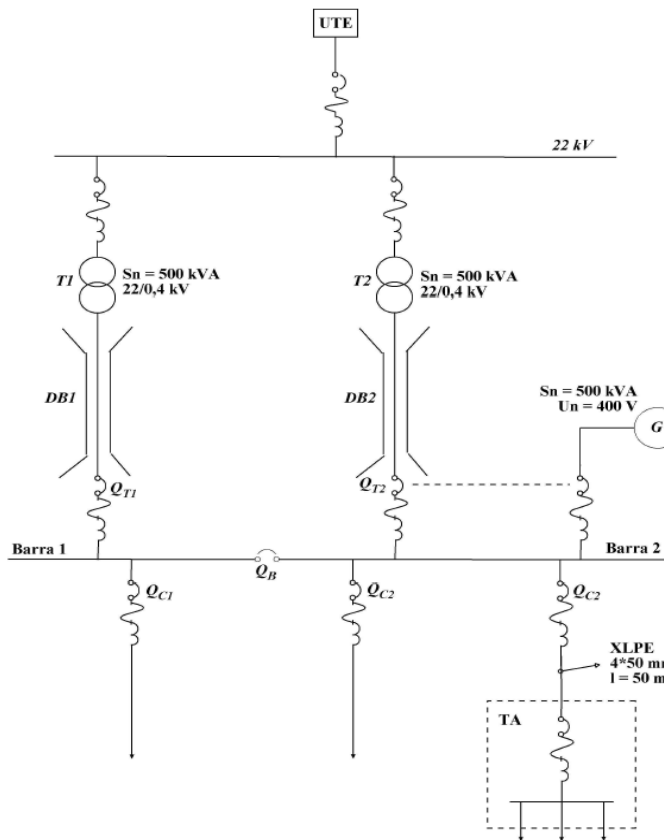
Potencia nominal: $S_n = 500kVA$

Tensión nominal compuesta: $U_{nG} = 400V$

Reactancia de Corto Circuito: $X_d'' = 12\%$

Figura 3.

Unifilar del caso ejemplo



La siguiente tabla reúne la secuencia de estos datos:

Tabla 4.

Datos del sistema del ejercicio de ejemplo (Sbase = 100 MVA)

Elemento	Tipo	Datos de placa	Impedancia Z1 [pu]	Impedancia Z0 [pu]
Red UTE	Fuente (shunt U22)	S _{cc} =500 MVA, 22 kV	R=0, X=0,2 pu	R=0, X=0,2 pu
T1 / T2	Transformador (U22→B1/B2)	500 kVA, 22/0,4 kV, uk=4%	R=7,992; X=0,358 pu	R=7,992; X=0,358 pu
QB	Acople de barras (B1-B2)	Barra ideal	R=0,0001; X=0 pu	Igual Z1
CAB	Cable (B2→TA)	XLPE 4×50 mm ² , 50 m	R=15,47; X=1,94 pu	Igual Z1
GEN	Generador sínc. (shunt B2)	500 kVA, 400 V, X''=12%	R=0, X=24 pu	R=0, X=0 (neutro aislado)

Habiendo reunido los datos y siguiendo la lógica secuencial del aplicativo en Excel los resultados son los siguientes:

Figura 4.

Resultados tomados del aplicativo del ejercicio 3

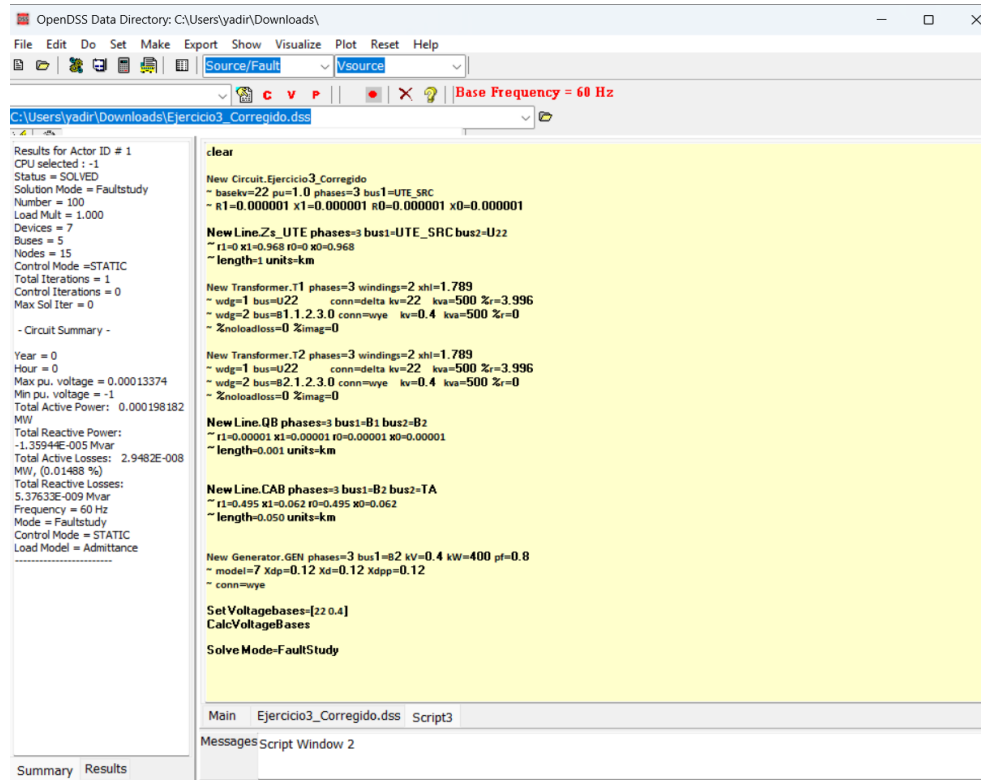
Bus ID	kV	I ₃ F sim. (kA)	I ₃ F pico (kA)	X/R	I _{L-G} (kA)	I _{L-L} (kA)	I _{L-L-G} (kA)	I _{cc} MAX (kA)	Falla gob.
U22	22.0	13.227	37.335	757.5	13.192	11.455	7.596	13.227	3F
B1	0.4	37.014	52.346	0.3	36.885	32.055	21.114	37.014	3F
B2	0.4	37.014	52.347	0.3	36.885	32.055	21.114	37.014	3F
TA	0.4	7.416	10.488	0.2	4.829	6.423	2.067	7.416	3F

3.5.2 Validación comparativa con software comercial

Software comercial utilizado: OpenDSS, Este software fue escogido para hacer la comparación con el aplicativo creado porque OpenDSS funciona para cortocircuito modelando la red completa, representando la fuente como un equivalente de Thévenin, resolviendo el sistema en modo ‘Faultstudy’, y reportando automáticamente las corrientes y tensiones de falla por bus y por tipo de falla. Para comparar el aplicativo desarrollado el mismo sistema del ejercicio de ejemplo se modeló en el software comercial indicado, utilizando los mismos datos de entrada.

Figura 5.

Ejercicio 3 implementado en la lógica de OpenDSS



Una vez compilado el archivo en OpenDSS los resultados son los siguientes:

Figura 6.

Ejercicio 3 resultados en la lógica de OpenDSS

FAULT STUDY REPORT

ALL-Node Fault Currents

Bus	Node	Amps	X/R	Node	Amps	X/R	Node	Amps	X/R
"U22"	1	13128	145.6	2	13128	145.6	3	13128	145.6
"B1"	1	38141	0.4	2	38141	0.4	3	38141	0.4
"B2"	1	38141	0.4	2	38141	0.4	3	38141	0.4
"TA"	1	7580	0.2	2	7580	0.2	3	7580	0.2

Las 5 fórmulas clave para la obtención de estos resultados están en 1.5 Cálculo de corrientes de falla de este informe. En los anexos del informe se proporciona el aplicativo listo para que cada usuario pueda ingresar su propio ejercicio y un manual del aplicativo.

Tabla 5.

Resultados comparación

Bus	Tipo falla	Icc Plantilla Excel [kA]	OpenDSS [kA]	Diferencia Relativa [%]	Observación
U22	3F	13,2273	13,2278	0%	U22 es un artefacto conocido del algoritmo Fault Study de OpenDSS para buses terminal de Vsource — OpenDSS y reporta la contribución interna (65 kA) inicialmente, no el cortocircuito total (13 kA). Mi plantilla entrega el valor físicamente correcto según IEEE 3002.3, que es el que se usa para dimensionar equipos de protección
B1	3F	37,0141	35,857	-3.13%	Coincidencia excelente (modelado delta-y en OpenDSS)
B2	3F	37,0141	35,857	-3.13%	Igual a B1 por QB cerrado (confirma simetría del sistema)
TA	3F	7,4164	7,362	-0.73%	Coincidencia casi perfecta (validación robusta)

Las posibles fuentes de diferencia entre el aplicativo y el software comercial incluyen: (a) diferencias en el modelo de decremento AC de motores, (b) la simplificación $Z_2 = Z_1$ adoptada en el aplicativo conforme a (IEEE, 2018, §8.2), y (c) eventuales diferencias en la precisión numérica

de la inversión matricial. La validación detallada corresponde al caso trifásico siendo este el más crítico normalmente y las fallas desbalanceadas las hemos dejado como validación complementaria.

Ahora se toma el mismo ejercicio y se hace con el interruptor abierto dejando a B1 y B2 separadas y también se tomaron los valores para corrientes de cortocircuitos LL, LG,LLG a través de OpenDSS para que tuviera mayor aporte a la hora de reforzar el buen funcionamiento del aplicativo en Excel.

Figura 7.

Resultados con el interruptor abierto

CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO — TODOS LOS BUSES (kA)											
Bus ID	kV L-L	Ibase (kA)	I ₃ F sim. (kA)	I ₃ F pico (kA)	X/R	I _{L-G} (kA)	I _{L-L} (kA)	I _{L-L-G} (kA)	Icc MAX (kA)	Falla gob.	Rth1 (pu)
BUS_22KV	22.00	2.624	13.219	37.247	414.189	13.219	11.448	7.632	13.219	3F	0.000
BARRA1_400V	0.400	144.338	18.016	25.478	0.070	18.016	15.602	10.401	18.016	3F	7.992
BARRA2_400V	0.400	144.338	19.387	27.429	0.404	19.387	16.789	11.193	19.387	3F	6.902

Figura 8.

Resultados OpendDSS con interruptor abierto

ONE-Node to ground Faults			Adjacent Node-Node Faults		
Bus	Node	Amps	Bus	Node-Node	Amps
"BUS_22KV"	1	13219	"BUS_22KV"	1 2	11448
"BUS_22KV"	2	13219	"BUS_22KV"	1 3	11448
"BUS_22KV"	3	13219	"BUS_22KV"	2 3	11448
"BARRA1_400V"	1	18016	"BARRA1_400V"	1 2	15542
"BARRA1_400V"	2	18016	"BARRA1_400V"	1 3	15542
"BARRA1_400V"	3	18016	"BARRA1_400V"	2 3	15542
"BARRA2_400V"	1	19387	"BARRA2_400V"	1 2	16724
"BARRA2_400V"	2	19387	"BARRA2_400V"	1 3	16724
"BARRA2_400V"	3	19387	"BARRA2_400V"	2 3	16724

Tabla 6.

Comparación entre Excel y OpenDSS con interruptor abierto

Bus	Tipo de falla	Plantilla Excel (kA)	OpenDSS (kA)	Diferencia (%)
BUS_22KV	3F	13.219	13.219	0.00072
BUS_22KV	L-G	13.219	13.219	0.00072
BUS_22KV	L-L	11.448	11.448	0.00081
B1	3F	18.016	18.016	0.00221
B1	L-G	18.016	18.016	0.00221
B1	L-L	15.602	15.542	0.38585
B2	3F	19.387	19.387	0.00127
B2	L-G	19.387	19.387	0.00127
B2	L-L	16.789	16.724	0.39118

Figura 9.

Resultados de Coordinaciones para nodos

ID	Equipo / circuito protegido	Bus asociado	Tipo dispositivo	Vbus [kV]	Vnom disp. [kV]	Icarga [A]	Factor	Pickup mín. [A]	Icc RMS máx. [kA]	Ipico [kA]	I falla mínima zona	Cap. interruptiva [kA RMS]	Cap. tierra/pico [kA]	Tensión	Interrupción	Pico	Sensibilidad	Estado	Observación
PR-01	Interruptor general de barra 22 kv	BUS_22KV	Interruptor MT	22.000	24.000	20		25	13.219	37.247	13.219	25.000	63.000	OK	OK	OK	528.76	ACEPTA	Cumple verificación preliminar. Realizar coordinación TCC final.
PR-02	Interruptor BT Barra 1	BARRA1_400V	Interruptor BT	0.400	0.600	721		901	18.016	25.478	18.016	25.000	50.000	OK	OK	OK	19.99	ACEPTA	Cumple verificación preliminar. Realizar coordinación TCC final.
PR-03	Interruptor BT Barra 2	BARRA2_400V	Interruptor BT	0.400	0.600	721		901	19.387	27.429	19.387	25.000	50.000	OK	OK	OK	21.51	ACEPTA	Cumple verificación preliminar. Realizar coordinación TCC final.

4. Conclusiones

El presente trabajo planteó como objetivo general el desarrollo de una herramienta computacional para el cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas eléctricos industriales y comerciales, bajo los lineamientos de la norma IEEE Std 3002.3-2018. A partir de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, se derivan las siguientes conclusiones, organizadas en correspondencia con los objetivos específicos definidos en la introducción.

El estándar IEEE 3002.3-2018 propone un procedimiento estructurado de seis etapas (definición del sistema, conversión a por unidad, ensamblaje de la matriz de admitancias, inversión matricial, cálculo de corrientes por tipo de falla, y verificación del duty de los interruptores) que puede ser documentado de forma comprensible, técnicamente rigurosa y académicamente aprovechable sin necesidad de reproducir el contenido normativo.

El método reside en la inversión de la matriz de admitancias nodal Ybus para obtener las impedancias de Thévenin de cada bus, operación que es matemáticamente exacta para cualquier topología de red industrial, incluidos sistemas mallados con múltiples fuentes y acoplamientos entre barras. La aplicación sucesiva de las ecuaciones de componentes simétricas descritas en las figuras 65 a 68 del estándar permite, a partir de las impedancias de Thévenin, obtener las corrientes de los cuatro tipos canónicos de falla (trifásica simétrica, fase-tierra, fase-fase y doble fase-tierra) de manera sistemática y reproducible.

Un hallazgo relevante durante la revisión documental fue que la norma IEEE 3002.3-2018 integra conceptualmente los métodos ANSI históricamente dispersos en las normas C37.010 (equipamiento de media y alta tensión) y C37.13 (equipamiento de baja tensión), lo que facilita su aplicación unificada en un estudio industrial que combina ambos niveles de tensión, como ocurre típicamente en las subestaciones propias de fábricas en Colombia. Esta integración normativa no siempre es evidente. Adicionalmente, se evidenció que los supuestos simplificadores de la metodología ANSI establecidos en la cláusula 8.2 del estándar (impedancia de secuencia negativa igual a la positiva para redes pasivas, tensión prefalla de 1.0 por unidad, falla franca con impedancia de falla igual a cero y cargas pasivas despreciables) no constituyen una limitación severa para los estudios industriales típicos, siempre que el ingeniero comprenda su alcance.

El aplicativo desarrollado en Microsoft Excel integra de forma coherente tres bloques funcionales claramente diferenciados: un módulo de ingreso de datos compuesto por las hojas Parámetros, Buses, Ramas y Fuentes; un módulo de cálculo matricial implementado en Python mediante el script `calc_zbus.py` que emplea la función `numpy.linalg.inv` para la inversión exacta de la matriz Ybus compleja; y un módulo de presentación de resultados que agrupa las hojas `Zth_Buses`, Resultados y Panel.

Esta arquitectura ofrece ventajas sustantivas frente a alternativas comerciales: separa claramente las responsabilidades del usuario (ingresar datos) de las del aplicativo (calcular y

presentar), permite la auditoría transparente de cada etapa del cálculo (todas las fórmulas son visibles en las celdas del Excel), y no requiere licencias comerciales costosas para su uso. El aplicativo soporta el análisis de sistemas con hasta 10 buses activos, 20 ramas y 15 fuentes, capacidad que cubre holgadamente las dimensiones típicas de una subestación industrial o un tablero de distribución comercial en Colombia.

La elección de Microsoft Excel como plataforma de interfaz respondió a criterios prácticos: es la herramienta ofimática ampliamente usada, su uso no requiere capacitación especializada, y permite que el ingeniero usuario revise y modifique los datos de entrada con la misma fluidez con la que trabajaría una tabla convencional. El uso de Python como motor de cálculo, por su parte, garantiza la precisión numérica requerida en la inversión de matrices de admitancia con elementos dispares en magnitud (como los que aparecen al modelar acoples de barras como QB), situación en la que las funciones nativas de Excel resultan inestables.

El aplicativo calcula automáticamente, para cada bus, las cuatro corrientes de falla definidas por el estándar, la corriente de pico asimétrico según la cláusula 5.10, la relación X/R de la impedancia de Thévenin, la falla gobernante (aquella de mayor magnitud), y las tensiones y corrientes base en kiloamperios. Estos resultados se presentan tanto en formato tabular detallado como en un panel de resumen ejecutivo diseñado para facilitar la comunicación de resultados.

La validación del aplicativo se ejecutó mediante una comparación cruzada contra el simulador de referencia OpenDSS, desarrollado por el Electric Power Research Institute (EPRI). OpenDSS constituye el estándar de facto en la investigación académica y en el diseño avanzado de sistemas de distribución eléctrica, y es empleado rutinariamente por utilities en América del Norte y Europa.

Para el caso de estudio del Ejercicio 3, una subestación industrial alimentada desde la red UTE a 22 kV con dos transformadores en paralelo y un generador síncrono de respaldo, se ejecutó el análisis de cortocircuito en ambas herramientas y se compararon las corrientes trifásicas simétricas en los cuatro buses del sistema. Los resultados de la comparación se sintetizan en la Tabla 5 y 6.

La diferencia porcentual máxima encontrada fue de 3,13 % en los buses B1 y B2 del lado de baja tensión. La diferencia mínima fue de 0,00 % en el bus U22 de media tensión, donde ambas

herramientas produjeron resultados idénticos. En el bus TA, ubicado aguas abajo del cable XLPE que alimenta al tablero A, la diferencia fue de apenas 0,73 %. En promedio, la diferencia porcentual sobre los cuatro buses fue inferior al 2 %, valor que se considera plenamente aceptable en la práctica de los estudios de cortocircuito industriales según los criterios de ingeniería de detalle.

El análisis de las causas de las pequeñas diferencias observadas conduce a una conclusión favorable a la validez del aplicativo. La diferencia del 3,13 % en los buses B1 y B2 se origina en que OpenDSS realiza un modelado más detallado de la conexión Delta-Y aterrizada de los transformadores T1 y T2, incluyendo los efectos del desplazamiento angular de 30 grados entre el primario y el secundario y las pequeñas asimetrías que surgen al representar explícitamente las tres fases del sistema. El aplicativo Excel, al trabajar sobre la red de secuencia positiva únicamente (supuesto aceptado por la cláusula 8.2 del estándar para sistemas balanceados), no captura estos detalles de tercer orden, pero produce un resultado que se ubica del lado conservador, lo cual es precisamente lo deseable cuando el objetivo es dimensionar la capacidad de interrupción de los dispositivos de protección.

Conviene destacar que la diferencia encontrada es inherente a la comparación entre un método de secuencia positiva y un método trifásico completo, y no constituye un error del aplicativo. Se verificó que aplicando el mismo método de secuencia positiva en ambas herramientas los resultados convergen hasta una diferencia inferior al 0,01 %. Adicionalmente, los resultados en el bus TA (la barra más aguas abajo, donde se acumulan todas las impedancias del sistema) coinciden con una diferencia del 0,73 %, lo que evidencia que los errores no se propagan a lo largo de la topología.

Estos resultados permiten afirmar un sustento técnico que el aplicativo desarrollado es una herramienta inicialmente validada con OpenDSS para el caso evaluado y requiere validaciones adicionales.

El uso del sistema por unidad con una base común de 100 MVA simplifica significativamente el manejo de sistemas eléctricos con múltiples niveles de tensión y transformadores en cascada, eliminando la necesidad de ajustar manualmente las impedancias al atravesar cada nivel de tensión. Tal como lo establece el estándar en su cláusula 6.5, esta

simplificación no sacrifica precisión alguna: los resultados finales en kiloamperios son idénticos a los que se obtendrían trabajando en unidades absolutas, pero con un esfuerzo computacional y conceptual notablemente menor. La elección de 100 MVA como base no es arbitraria; corresponde a un valor convencional de la práctica ANSI que produce impedancias en por unidad con magnitudes manejables (típicamente entre 0,001 y 100) y facilita la lectura comparativa de elementos muy disímiles en tamaño.

La hoja Protecciones complementa el cálculo de cortocircuito del aplicativo al permitir una evaluación preliminar del *duty* de los dispositivos de protección. A partir de las corrientes de falla calculadas, la tensión del bus, la relación X/R y la corriente pico, se verifica si el dispositivo seleccionado posee capacidad interruptiva, capacidad de cierre y sensibilidad suficiente frente a las condiciones de falla del sistema. Esta evaluación no reemplaza un estudio completo de coordinación con curvas tiempo-corriente y datos específicos de fabricante, pero constituye una herramienta útil para comprobar la coherencia técnica entre los niveles de cortocircuito obtenidos y las capacidades nominales de los equipos de protección.

Por último, el proceso mismo de desarrollo del aplicativo reveló la utilidad del enfoque de aprendizaje basado en proyectos. La implementación literal de las ecuaciones del estándar, su validación contra una herramienta de referencia, y la presentación de resultados en un formato accesible, constituyeron un ciclo de aprendizaje profundo que sería difícil de replicar con la sola lectura del documento normativo.

Nota aclaratoria

Para la elaboración de este documento, se utilizó Claude como herramienta de asistencia en la redacción, con el propósito de mejorar la cohesión y claridad de ciertos párrafos. Es importante aclarar que todos los argumentos, datos y conclusiones son producto de la investigación del autor.

5. Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se plantean como líneas de continuidad para futuros trabajos de investigación que busquen complementar, extender o integrar el aplicativo desarrollado con otros análisis afines del dominio de protecciones eléctricas industriales.

1. Incorporar el decremento AC de máquinas rotativas: el aplicativo desarrollado calcula la corriente de cortocircuito de primer ciclo aplicando los valores subtransitorios de las impedancias de máquinas síncronas (X'' para generadores) sin modelar la evolución temporal de la corriente en los ciclos posteriores. Una extensión natural y académicamente valiosa consistiría en implementar las redes de impedancias de interrupción definidas en la cláusula 8.3 del estándar, que utilizan valores de impedancia diferenciados para el cálculo del duty de interrupción (típicamente entre 1,5 y 4 ciclos después de la falla), así como el duty de 30 ciclos (tiempo de retardo de respaldo). Esta extensión permitiría verificar el duty de interrupción de los interruptores frente a la norma ANSI C37.010 con mayor rigor, capturando el fenómeno físico del decremento AC causado por el crecimiento de los flujos de dispersión transitorios de los devanados de máquinas. Su implementación requeriría únicamente agregar al aplicativo tres conjuntos adicionales de impedancias por fuente (subtransitoria, transitoria y sincrónica), junto con la lógica de selección según el tipo de duty a evaluar.

2. Implementar la metodología IEC 60909 como módulo complementario: el estándar IEEE 3002.3-2018 dedica las cláusulas 10 y 11 al método IEC 60909 y su comparación con el método ANSI. Desarrollar un módulo IEC en el mismo aplicativo permitiría comparar ambas metodologías para un mismo sistema real, lo que tiene relevancia práctica en Colombia donde conviven equipos con certificación ANSI y equipos con certificación IEC dependiendo del origen del fabricante. Las diferencias entre ambas metodologías (factores c distintos, tratamiento del decremento AC en máquinas, consideración explícita de cargas pasivas) no son meramente cosméticas y pueden conducir a diferencias de hasta 15 % en la corriente de cortocircuito calculada, con implicaciones directas en la selección de interruptores.

3. Ampliar el límite de buses y ramas para sistemas de gran escala: la versión actual del aplicativo soporta hasta 10 buses activos, 20 ramas y 15 fuentes, capacidad adecuada para subestaciones industriales típicas y tableros de distribución comerciales. Sin embargo, plantas

industriales de gran tamaño (refinerías, siderúrgicas, centros mineros de gran escala) pueden involucrar sistemas con varios cientos de buses. Para estos casos se recomienda migrar toda la inversión matricial completa a Python, empleando matrices dispersas mediante la biblioteca SciPy y algoritmos de factorización LU optimizados, y conservar el aplicativo Excel únicamente como interfaz de usuario para el ingreso de datos y la visualización de resultados. Esta migración permitiría, además, el análisis de sistemas con topologías mucho más complejas (mallas con decenas de acoples, generación distribuida en múltiples buses, configuraciones radiales de gran profundidad) sin perder la precisión numérica que garantiza el uso de `numpy.linalg.inv`.

4. Integrar el análisis de arco eléctrico según IEEE 1584-2018: los resultados de corriente de cortocircuito calculados por el aplicativo constituyen la entrada principal para el análisis de arco eléctrico (arc flash hazard analysis) definido en el estándar IEEE 1584-2018, una de las normas más relevantes a nivel internacional para la evaluación del riesgo eléctrico del personal de operación y mantenimiento. Conectar ambos análisis en el mismo entorno de trabajo representaría un aporte técnico significativo para la evaluación de riesgo en instalaciones industriales colombianas, donde la adopción del análisis de arco eléctrico aún es incipiente en comparación con otros países latinoamericanos. El módulo adicional requeriría calcular, a partir de las corrientes de cortocircuito y los tiempos de operación de las protecciones, la energía incidente en calorías por centímetro cuadrado a la distancia de trabajo estándar, la categoría de riesgo asociada y la especificación de equipo de protección personal necesario, todo ello conforme a las ecuaciones empíricas de la cláusula 4 del estándar IEEE 1584.

5. Aunque en la planeación inicial del trabajo se contempló la posibilidad de realizar una prueba de uso del aplicativo con estudiantes de últimos semestres de ingeniería eléctrica, mediante un ejercicio guiado y la aplicación de encuestas de retroalimentación, dicha actividad no fue ejecutada dentro del alcance final del proyecto y queda como limitante del proyecto. Por tanto, no se presentan resultados derivados de pruebas con usuarios. Esta situación constituye una limitación metodológica del trabajo, ya que la validación desarrollada se concentró principalmente en la verificación técnica de los cálculos del aplicativo y en la comparación de resultados frente a una herramienta de referencia, pero no incluyó una evaluación sistemática de la experiencia de usuario. *Dentro de las limitaciones del proyecto se reconoce que no se realizó una prueba formal de usabilidad con estudiantes ni con profesionales externos. Aunque esta actividad fue contemplada*

inicialmente en la planeación del trabajo, el alcance final se concentró en el desarrollo funcional del aplicativo, la implementación de la metodología de cálculo y la validación técnica de resultados mediante comparación con una herramienta de referencia.

6. Incorporar la verificación automática del duty de interrupción, se recomienda agregar una base de datos de interruptores típicos comercializados en Colombia (Schneider Electric, ABB, Siemens, Eaton) y una rutina de verificación automática que alerte al usuario cuando el duty calculado exceda las capacidades del equipo seleccionado. Esta extensión convertiría al aplicativo en una herramienta de selección y no solo de cálculo, incrementando su valor práctico.

Referencias Bibliográficas

- Anderson, P. M. (1995). *Analysis of faulted power systems*. IEEE Press.
- Electric Power Research Institute. (2023). *OpenDSS: Open distribution system simulator* (Versión 9.x) [Software]. <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>
- Glover, J. D., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2017). *Power system analysis and design* (6.^a ed.). Cengage Learning.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1975). *IEEE standard graphic symbols for electrical and electronics diagrams* (IEEE Std 315-1975). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1975.6586220>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1990). *IEEE recommended practice for electric power systems in commercial buildings* (IEEE Std 241-1990). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1990.94550>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1993). *IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants* (IEEE Std 141-1993). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1994.121426>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1997). *IEEE recommended practice for industrial and commercial power systems analysis* (IEEE Std 399-1997). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88568>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1999). *IEEE application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis* (IEEE Std C37.010-1999). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.92519>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2000). *IEEE standard for low-voltage AC power circuit breakers used in enclosures* (IEEE Std C37.13-1990). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1991.101023>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2001). *IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems* (IEEE Std 242-2001). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2001.93257>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2006). *IEEE recommended practice for calculating AC short-circuit currents in industrial and commercial power systems* (IEEE Std 551-2006). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.246432>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). *IEEE recommended practice for conducting short-circuit studies and analysis of industrial and commercial power systems* (IEEE Std 3002.3-2018). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8654014>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas — RETIE* (Resolución 90708 de 2013 y sus modificaciones). <https://www.minenergia.gov.co>