

**SIMULACIÓN DE ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS DE
CORTOCIRCUITO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE BAJA
TENSIÓN A TRAVÉS DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

LEONARDO CAICEDO GIRALDO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2016**

SIMULACIÓN DE ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS DE CORTOCIRCUITO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN A TRAVÉS DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

LEONARDO CAICEDO GIRALDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**DIRECTOR(ES):
ING. GUILLERMO APONTE MAYOR PhD.
ING. ANDRES FELIPE ZUÑIGA Esp.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2016**

DEDICATORIA

Este trabajo se lo quiero dedicar a mí familia y compañeros, en especial a mi querida madre RUTH NORA GIRALDO KNUTH, a mi padre RAUL CAICEDO ASTUDILLO, a mi hijo SANTIAGO CAICEDO BOLAÑOS quien es mi gran motivación, a mi segunda mamá BLANCA HELENA TULANDE, a mi novia SANDRA LORENA VALDERRAMA y a todas las personas que estuvieron apoyándome durante todo mi proceso de formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerles a las siguientes personas por guiarme en la realización de este trabajo de grado:

- ANDRES FELIPE ZUÑIGA CALVACHE: por ser la persona que me orientó durante todo el proceso sin importar el día y la hora de la semana.
- GUILLERMO APONTE MAYOR: por permitirme trabajar en este tema de trabajo de grado y estar siempre atento.
- CARLOS ALFONSO DIAZ: tutor de mi trabajo de grado quien también me oriento en el entendimiento de los fenómenos mecánicos.
- EDUARDO MARLES SAENZ: profesor que dedico de su valioso tiempo en el entendimiento de los fenómenos electromagnéticos que ocurren durante un cortocircuito.
- HAROLD JOSÉ DÍAZ: profesor que dedico parte de su tiempo en la enseñanza de uno de los programas utilizados en este trabajo y uno de los mejores profesores que tuve en mi paso por la universidad.

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES DE LOS TABLEROS ELÉCTRICOS	13
1.1	NORMAS RELATIVAS A LOS TABLEROS DE BAJA TENSIÓN	14
1.2	CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS.....	16
1.2.1	Tableros eléctricos de baja tensión.....	17
1.2.2	Clasificación de los tableros de baja tensión.	17
1.2.3	Componentes de los tableros eléctricos de baja tensión	18
1.3	PRUEBAS A TABLEROS ELÉCTRICOS DE BAJA Y MEDIA TENSIÓN	20
1.3.1	Grado de protección IP.	21
1.3.2	Prueba de incremento de temperatura.	22
1.3.3	Propiedades dieléctricas.....	23
1.3.4	Distancia de aislamiento y fuga.	23
1.3.5	Efectividad del circuito de protección.	23
1.3.6	Comprobación del funcionamiento mecánico de sistemas de bloqueo, puertas, y otros elementos.	23
1.3.7	Resistencia a la corrosión del encerramiento.	24
1.3.8	Arco Interno.	24
1.4	PRUEBA DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO.....	26
1.4.1	Prueba a barrajes principales.	28
1.5	FENÓMENO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO	28
2.	CÁLCULOS DE FUERZAS MAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN TABLEROS DE BAJA TENSIÓN	31
2.1	FORMULACIONES PARA CÁLCULO DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	31
2.2	MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA MAGNÉTICA.....	34
2.3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL CÁLCULO DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS	36
2.4	SOFTWARE SWITCHGEAR DESIGN PARA EL CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LOS SOPORTES DE LOS CONDUCTORES	39
2.5	MÉTODO DE NORMA IEC 60865 PARA CÁLCULO DE FUERZAS ELECTRODINÁMICAS ENTRE BARRAS.	41
2.6	MÉTODO IEC 60865-1 PARA EL CÁLCULO DE FUERZA SOBRE LOS SOPORTES DE LAS BARRAS.	44

2.7	TRABAJOS RELACIONADOS CON FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN SISTEMAS DE BARRAS	47
3.	SIMULACIONES DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN TABLERO DE BAJA TENSIÓN A PARTIR MEF Y EL PROGRAMA SWITCHGEAR DESIGN....	51
3.1	SIMULACIONES DE ESFUERZOS ELECTRODINAMICOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS	52
3.1.1	Construcción de la geometría y parámetros de la simulación.	53
3.1.2	Condiciones de frontera y Construcción del mallado.	54
3.1.3	Contribución de las fuerzas de Lorentz.....	55
3.1.4	Simulación para distintos refinamientos en el mallado.....	56
3.1.5	Simulación con conductores circulares en el sistema de barras.	58
3.1.6	Simulación para onda de corriente con atenuación exponencial.....	58
3.1.7	Simulación con conductores en posición vertical.	60
3.1.8	Simulación con conductores circulares formando triángulo equilátero. 61	
3.1.9	Simulación para tres conductores rectangulares por fase.....	63
3.2	SIMULACIONES DE ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SWITCHGEAR DESIGN	64
3.3	CALCULO DE ESFUERZOS SOBRE BARRAS Y SOPORTE DE LOS TABLERO A PARTIR DE LA NORMA IEC 60865-1	65
3.3.1	Calculo de fuerza magnética en barras	65
3.3.2	Esfuerzo de flexión en conductor σ_m y fuerza de flexión en soportes <i>Fd</i> (Método simplificado).	66
3.3.3	Esfuerzo de flexión en conductor σ_m y fuerza de flexión en soportes <i>Fd</i> (Método detallado).....	67
3.3.4	Comparación de resultados de los programas computacionales con la norma IEC 60865-1.....	69
4.	REALIZACIÓN PRUEBA PILOTO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS...	71
4.1	DISEÑO DEL TABLERO.....	71
4.2	SISTEMA DE MEDIDA.....	72
4.3	PRUEBAS.....	73
4.3.1	Pruebas estáticas.	73
4.3.2	Ensayos de cortocircuito.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación para tableros de baja tensión según el tipo y la norma correspondiente.	17
Tabla 2. Especificación de los grados de protección IP para encerramientos de tableros	21
Tabla 3. Densidad de fuerzas locales para los diferentes métodos.....	35
Tabla 4. Posibles valores para los factores de fuerzas	46
Tabla 5. Factores $\alpha - \beta - \gamma$ para diferentes arreglos de soporte de barras.....	47
Tabla 6. Valores de fuerza a través de la norma IEC 60865 y la diferencia porcentual con los resultados obtenidos a través de los diferentes mallados	48
Tabla 7. Resultados obtenido del estudio elaborado por Yusop, Kamarol y Ishak	49
Tabla 8. Resultados de máximo de fuerzas en artículo de Gholamreza y Keyhan	50
Tabla 9. Parámetros simulaciones esfuerzos de cortocircuito.....	51
Tabla 10. Densidad de corriente para cada fase en el sistema de barras.	54
Tabla 11 Comparación de resultados en simulación temporal a partir de IEC 60865 y MEF.....	56
Tabla 12 Resultado de simulación para diferentes número de elementos del mallado	57
Tabla 13. Resultados estáticos de valores máximos y mínimos de fuerza	58
Tabla 14. Densidad de corriente considerando efecto de asimetría.....	59
Tabla 15. Valores de fuerzas para arreglos de barras horizontal y vertical	61
Tabla 16. Comparación Resultados Comsol y la norma IEC 60865-1 en el cálculo de máximo de fuerza electromagnética de cortocircuito.	69
Tabla 17 Comparación de esfuerzo de flexión en conductor y fuerzas de flexión en soportes	69
Tabla 18. Comparación resultados prueba piloto con switchgear Design	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadena productiva de la energía eléctrica	13
Figura 2. Características de las normas IEC 60439 e IEC 61439	15
Figura 3. Clasificación de los tableros según la ubicación.....	16
Figura 4. Tablero de baja tensión con interruptores y equipos de protección y medida	16
Figura 5. Celda de media tensión con circuito de arranque de motor	17
Figura 6. Interruptores miniatura de baja tensión	18
Figura 7. Interruptor de caja moldeada tipo industrial (MCCB's).....	18
Figura 8. Contactor y relé de sobre carga	19
Figura 9. Luces piloto y señalización.....	19
Figura 10. Pruebas a tableros de baja y media tensión	20
Figura 11. Cifra y letra del código de protección IP	21
Figura 12. Sentido de las fuerzas electromagnéticas en barraje trifásico	29
Figura 13. Diagrama esquemático del modelaje matemático de un problema.....	37
Figura 14. Etapas del método de elementos finitos	38
Figura 15. Etapas del modelado en COMSOL Multiphysics.	39
Figura 16. Etapas para la simulación de esfuerzos electrodinámicos en tableros de baja tensión mediante programa Switchgear design.	40
Figura 17 Interfaz de entrada de datos módulo de fuerzas electrodinámicas programa Switchgear Design	41
Figura 18. Factor $k1s$ para cálculo distancia efectiva entre conductores	43
Figura 19. Sistema de barras (a) posición vertical, (b) posición horizontal	44
Figura 20. Diagrama unifilar para prueba de cortocircuito en el barraje principal de un tablero de baja tensión	52
Figura 21. Geometría del sistema de barras trifásicas para la simulación.	53
Figura 22. Región de la simulación para el sistema de barras.	53
Figura 23. Mallado de Simulación temporal.	54
Figura 24. Densidad de flujo magnético para $t=0.05s$ obtenida a través del MEF. 55	
Figura 25. Contribución de fuerza de lorentz, Componente en X (Nm^3) en $t=0.05$, Simulación temporal.....	55
Figura 26. Simulación Máximo de fuerzas electrodinámicas-temporal.	56
Figura 27. Grafica de convergencia para los diferentes mallados	57
Figura 28. Geometría de simulación con barras circulares	58
Figura 29. Resultado de fuerzas utilizando onda de corriente de cortocircuito exponencial	59
Figura 30. Arreglo de barras en posición vertical	60
Figura 31. Contribución de fuerzas en el eje “Y” para arreglo de barras vertical ..	60
Figura 32. Geometría para arreglo de barras circulares en triángulo equilátero ...	61

Figura 33. Fuerzas Magnética en el eje x para simulación de conductores circulares en triángulo equilátero.....	62
Figura 34. Fuerzas Magnética en el eje y para simulación de conductores circulares en triángulo equilátero.....	62
Figura 35. Geometría para simulación de tres conductores rectangulares por fase	63
Figura 36. Fuerza total para tres conductores por fase	63
Figura 37. Parámetros simulación en Switchgear Design	64
Figura 38. Resultados de simulación Switchgear Design	65
Figura 39. Valores de VF , $V\sigma$ para la relación de frecuencias	67
Figura 40. Valores de V_{rm} para la relación de frecuencias	68
Figura 41. Dispositivo para medición de fuerzas electrodinámicas.....	71
Figura 42. Galgas extensiométricas en el dispositivo y esfuerzos electrodinámicos sobre fases de cobre.....	72
Figura 43. Diagrama de cuerpo libre del soporte de un aislador eléctrico en el dispositivo	73
Figura 44. Esquema del montaje para el cortocircuito.....	74
Figura 45. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 1	75
Figura 46. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 2	75
Figura 47. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 3	75
Figura 48. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 4	76

RESUMEN

Este trabajo de grado se encuentra dividido en cuatro capítulos, el primero muestra conceptos generales de los tableros eléctricos, como su clasificación y pruebas a la que son sometidos; el segundo capítulo se enfoca en la teoría de las fuerzas electromagnéticas y hace un preámbulo a los métodos y normas a utilizar para el cálculo de fuerzas electrodinámicas en conductores; en el tercer capítulo se realiza el modelado y las simulaciones para diferentes arreglos de barras en el método de elementos finitos para el cálculo de fuerzas electrodinámicas en los barrajes principales de un tablero y adicionalmente se simulan los esfuerzos de flexión en conductores y fuerzas de flexión en los soportes en el programa Switchgear Design comparándolos con procedimientos propuestos en la normas IEC 865-1 en el cálculo de estas; el cuarto capítulo se enfoca en la realización de la prueba piloto de cortocircuito en un tablero de baja tensión, en esta parte también se comparan los resultados de las simulaciones y cálculos teóricos con los valores obtenidos en las pruebas.

Palabras clave: Tablero, RETIE, esfuerzos, fuerzas magnéticas, corriente de cortocircuito, Comsol Multiphysics, Switchgear Design, soportes, barraje principal

SUMMARY

This work of degree is divided in four chapters, the first one shows general concepts of the electrical panel boards, as their classification and tests to which they are submitted; The second chapter focuses on the theory of electromagnetic forces and makes a preamble to the methods and standards to be used for the calculation of electrodynamics forces in busbars; In the third chapter the modeling and the simulations for different arrangements of busbars with the finite element method for the calculation of electrodynamics forces in the main busbars of a board are carried out and additionally the flexural stresses in conductors and flexural forces in support in Switchgear Design program comparing them with procedures proposed in the IEC 865-1 standards in the calculation of these; The fourth chapter focuses on conducting the short-circuit pilot test on a low-voltage panel board, this part also compares the results of the simulations and theoretical calculations with the values obtained in the tests.

Keywords: Panel board, RETIE, Electromagnetic forces, short-circuit Current, Comsol Multiphysics, Switchgear Design, Support, Main busbar

INTRODUCCIÓN

La fabricación de los tableros eléctricos debe cumplir con una serie de normas internacionales que permiten verificar su diseño y garantizar un funcionamiento adecuado de sus componentes. Considerando las actualizaciones normativas con relación a la fabricación de tableros y celdas que se viene dando a nivel internacional, el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE en la actualización del 2013, adoptó nuevos requerimientos para la certificación de tableros y celdas, uno de los requerimientos es la verificación de la resistencia al cortocircuito de los tableros y celdas.

La prueba de resistencia al cortocircuito exige para su realización utilizar una fuente de alimentación de gran potencia, actualmente los laboratorios eléctricos de Colombia no tienen la capacidad para cumplir las exigencias de este ensayo, ante esta dificultad la normatividad colombiana permite validar el cumplimiento de esta condición a través de simulaciones y cálculos analíticos.

El RETIE permitirá por un periodo de hasta cinco años (a partir del 2013), que la condición de resistencia al cortocircuito se verifique mediante cálculos y/o simulaciones, siempre y cuando el modelo a utilizar tenga bases adecuadas en su literatura y haya sido validado por un laboratorio de ensayos. Con el objetivo de simular las pruebas, las empresas fabricantes de tableros de la región adquirieron el software Switchgear Design como una herramienta computacional para verificar la condición de resistencia al cortocircuito, incremento de temperatura y arco interno.

El programa adquirido no cuenta con reportes de pruebas o comparaciones con otros programas que permitan verificar la validez de sus resultados. En este trabajo de grado se realizarán simulaciones para calcular los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito en diferentes arreglos de barras, mediante programas que ya tienen validados sus procesos de cálculo y son ampliamente utilizados para el diseño de equipos eléctricos.

El objetivo de este trabajo de grado es el de modelar y simular los esfuerzos de cortocircuito en un tablero de baja tensión utilizando un programa de elementos finitos y el software Switchgear Design, cabe resaltar que el programa de elementos finitos calcula fuerzas de origen magnético sobre las barras principales y el software Switchgear Design calcula fuerza y esfuerzo sobre las barras y fuerzas en soportes. En el marco de este trabajo se realizaron un conjunto de pruebas piloto en un tablero eléctrico de baja tensión cuyos resultados serán comparados con los de las simulaciones.

Los esfuerzos de flexión en los soportes son proporcionales a las fuerzas magnéticas y tienen en cuenta el número de apoyos, tipo de travesaño, tipo de soporte, tipo de circuito, factores de fuerza, módulo de sección y distancia entre soportes

1. GENERALIDADES DE LOS TABLEROS ELÉCTRICOS

En este capítulo se tratarán temas generales relacionados con el tablero eléctrico de baja tensión, se explicarán los tipos de tableros, las partes constitutivas, las especificaciones y las pruebas. En la parte final del capítulo se revisan aspectos relacionados con la prueba de resistencia al cortocircuito, el objetivo del ensayo y las afectaciones en los tableros cuando se somete a una condición de cortocircuito.

La cadena productiva de la energía eléctrica está conformada por los procesos de generación, transformación, transmisión, distribución y consumo por usuarios residenciales, comerciales o industriales (ver Figura 1). Uno de los elementos más utilizados en estos procesos son los tableros eléctricos, estos equipos están presentes en las subestaciones y en instalaciones de uso final de la energía eléctrica.

Figura 1. Cadena productiva de la energía eléctrica



Fuente: (Csanyi, 2003) (tomado de la web: mbie.govt.nz/)

Los tableros eléctricos son encerramientos generalmente metálicos donde se totaliza la carga, estos equipos son parte constitutiva de las instalaciones eléctricas residenciales, comerciales e industriales; alojados en los tableros podemos encontrar dispositivos de medición, conexión, maniobra, control, protección, alarma y señalización. Una de las funciones principales de los tableros eléctricos es la de evitar el contacto directo de los operarios con las partes energizadas del sistema, garantizar la continuidad del servicio y proteger los equipos alojados en su interior [1].

1.1 NORMAS RELATIVAS A LOS TABLEROS DE BAJA TENSIÓN

La norma IEC 61439-1 [2] modifica el concepto del tablero eléctrico de distribución y maniobra que se encontraba invariable desde el año 1990, donde el concepto de tableros montados en fábrica fue reemplazado por tableros de tipo probado y tableros de tipo parcialmente probados. La norma considera que el tablero es un componente estándar de la instalación eléctrica, como un interruptor o una toma de corriente con la diferencia de que los tableros están constituidos por dispositivos agrupados en columnas.

Los tableros están constituidos por cajas o envoltentes que tiene como función el soporte y la protección mecánica de los componentes y el equipo eléctrico; todos los tableros deben ser montados de manera que cumplan los requisitos de seguridad y ejecuten de forma óptima las funciones para las cuales han sido diseñados. Los aspectos constructivos, definiciones y requerimientos técnicos de tableros de baja tensión están cubiertos bajo la serie de normas IEC 61439-1, estos estándares aplican para tableros de baja tensión con voltaje nominal de hasta 1kV AC y 1,5 kV DC.

La norma IEC 61439-1 establece los requerimientos generales para los tableros de baja tensión; la IEC 61439-2 hace referencia a Tableros de distribución de potencia y maniobra; la IEC 61439-3 está relacionada con tableros de distribución; la norma IEC 61439-4: define los requerimientos de los Tableros para obras; la IEC 61439-5 está asociada con Paneles de aparamenta para redes de Distribución Publica; la norma IEC 61439-6 está asociada con Sistemas de canalización para barrajes; adicionalmente, en el reporte técnico IEC TR 60890-2014 se describe un método para la evaluación de sobre temperatura mediante calculo en tableros de baja tensión.

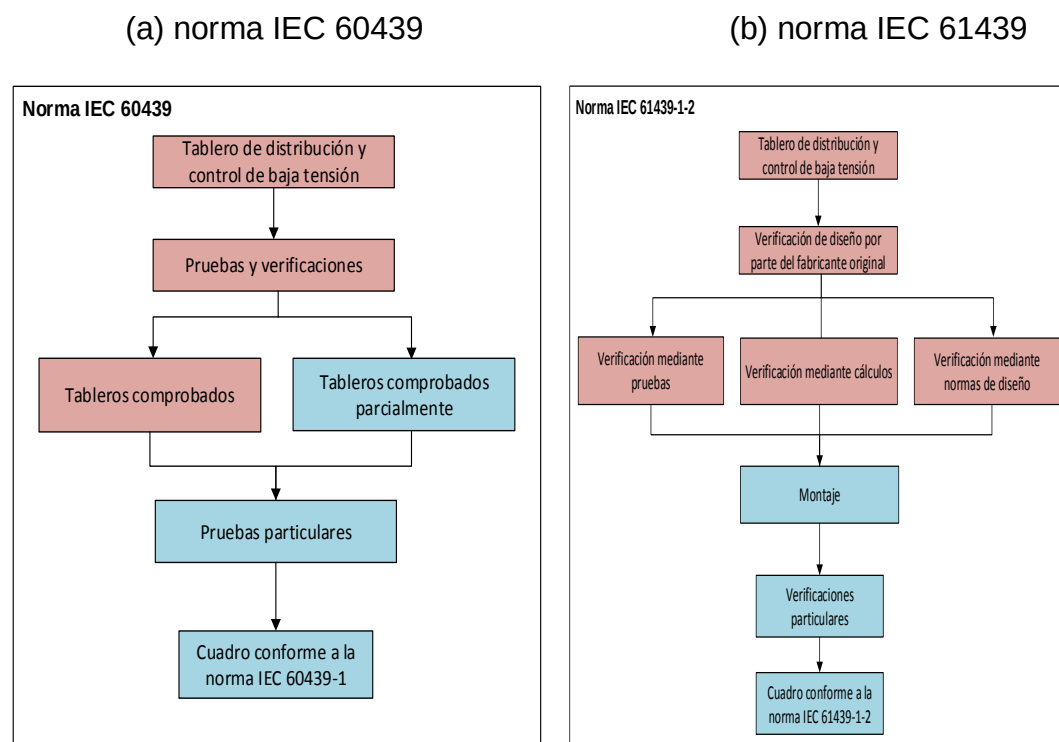
La norma IEC 61439 utiliza el concepto de tablero “Conforme” para cualquier tablero que cumpla las especificaciones de la norma. Con ese fin este estándar introduce tres tipos de verificaciones para evaluar el cumplimiento de la conformidad del tablero, estas son:

- Verificación mediante pruebas en el laboratorio (antes llamadas pruebas de tipo y ahora llamadas verificación mediante prueba).
- Verificación mediante calculo (Uso de algoritmos).
- Verificación mediante el cumplimiento de las normas de diseño (verificación mediante criterios físicos/análíticos o deducciones de diseño).

La norma IEC 61439-1 también introduce el concepto de Fabricante “original” y fabricante del “Tablero”. El primero es el responsable de realizar el diseño del tablero, con ese fin lleva a cabo las verificaciones de diseño, cálculos y comprobación de las normas. El fabricante del “tablero” es quien construye el tablero, de acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante original, ensamblando las distintas partes e instalándolas de manera apropiada.

La tarea del fabricante original será la de diseñar la gama de tableros deseada, probar distintos prototipos a la gama de tableros diseñada, superar las pruebas de verificación de la norma, derivar de las pruebas otras configuraciones mediante calculo o mediciones, añadir otro tipo de configuraciones obtenidas sin pruebas con normas de diseño adecuadas y finalmente recopilar toda la información y ponerla a disposición de los clientes a través de catálogos o software. A continuación, se muestra en la Figura 2. Los principales cambios y novedades que tuvo la norma IEC 60439.

Figura 2. Características de las normas IEC 60439 e IEC 61439



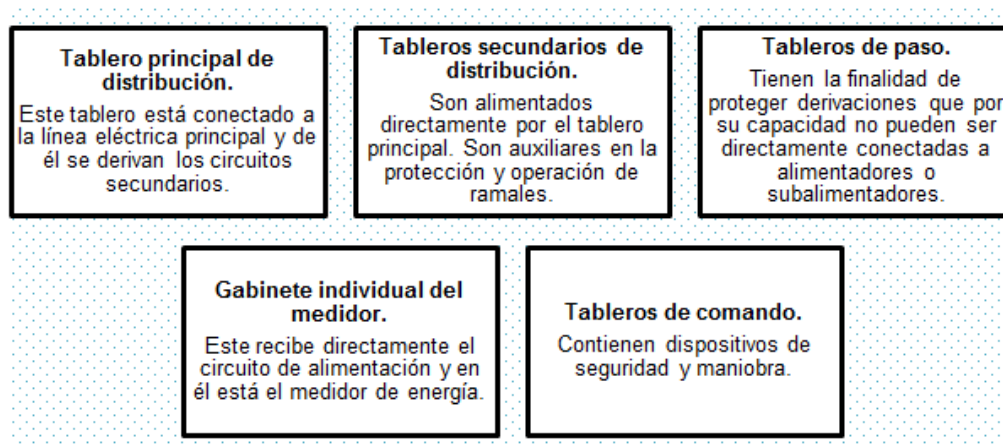
Fuente: Imagen tomada de cuaderno de aplicaciones técnicas ABB

En Colombia se tiene la norma NTC 3278 de 2001 referente a los tableros de maniobra y control de baja tensión, la NTC 2050 de 1998 Código eléctrico colombiano su función es salvaguardar a las personas y los bienes contra los riesgos que pueden aparecer debido al uso de la electricidad.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS

Los tableros son clasificados de diversas maneras, ya sea por su nivel de tensión, su ubicación en la instalación eléctrica o según el tipo de aplicación. Según la ubicación, los tableros pueden clasificarse como se indica en la Figura 3.

Figura 3. Clasificación de los tableros según la ubicación



De acuerdo al nivel de tensión en el que operan se tienen: Tableros de baja tensión (ver Figura 4), Celdas de media tensión (ver Figura 5) y Celdas de alta tensión. Los tableros de baja tensión operan a tensiones menores o iguales a 1kV, las celdas de media tensión trabajan con voltajes entre 1kV y 57,5kV y las celdas de alta tensión operan a tensiones mayores a 57,5kV.

Figura 4. Tablero de baja tensión con interruptores y equipos de protección y medida



Fuente: Tablero principal de baja tensión, tipo PRISMA P, Schneider Electric (tomada de la web: skaaret.as)

Figura 5. Celda de media tensión con circuito de arranque de motor



Fuente: Allen-Bradley centro de control de motores de media tensión.
(Tomada de la web: arrowspeed.com).

1.2.1 Tableros eléctricos de baja tensión.

De acuerdo al Reglamento técnico de instalaciones eléctricas[3], se denomina tablero cuando este opera a tensiones inferiores a 1kV y celdas o gabinetes cuando trabajan en instalaciones con tensiones entre 1kV hasta 60kV.

1.2.2 Clasificación de los tableros de baja tensión.

En la Tabla 1 se presenta la clasificación dada por el RETIE para los tableros de baja tensión, los requerimientos normativos serán definidos de acuerdo a su forma constructiva.

Tabla 1. Clasificación para tableros de baja tensión según el tipo y la norma correspondiente.

TIPO DE TABLERO	NORMA IEC	NORMA UL	NTC
De distribución	60439-3 61439-1/3	67	3475 2050
De potencia	60439-1 61439-1/2	591 508	3278
Para instalaciones temporales	60439-4 61439-1/4		3278 2050
Para redes de distribución publica	60439-5 61439-1/5		3278 2050

Fuente: Anexo general-RETIE[1]

1.2.3 Componentes de los tableros eléctricos de baja tensión

Interruptores miniatura: Son dispositivos de interrupción que protegen elementos internos del tablero contra sobre corrientes, son utilizados en circuitos de control y para alimentación de pequeñas cargas en baja tensión, ver Figura 6.

Figura 6. Interruptores miniatura de baja tensión



Fuente: Interruptores miniatura, EATON (tomada de la web: eaton.com.pa).

Interruptores de caja moldeada y de potencia: Estos interruptores están diseñados para la protección de sistemas de distribución en baja tensión de carácter industrial, su principal función es la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, ver Figura 7.

Figura 7. Interruptor de caja moldeada tipo industrial (MCCB's)



Fuente: Nuevos interruptores automáticos en caja moldeada de baja tensión, SACE Tmax XT (Tomada de la web: sudel.com.uy).

Contactores y Relés de Sobrecarga: Los contactores son dispositivos que permiten controlar la energización de elementos a través de una bobina, la conmutación se produce cuando esta es energizada o des energizada.

Los relés de sobrecarga son dispositivos de protección que actúan cuando se presentan sobre corrientes por efectos de sobre carga, estos no ofrecen protección para cortocircuito, ver Figura 8.

Figura 8. Contactor y relé de sobre carga



Fuente: Catálogo de contactores, botonería, arrancadores, relevadores y switch de presión, Siemens (tomado de la web: cedsarobotica.com).

Luces piloto y señalización: Estas indican el estado en que se encuentra un dispositivo eléctrico, su función es de aviso y señalización para protección del personal, ver Figura 9.

Figura 9. Luces piloto y señalización



Fuente: luz piloto (tomada de la web: gefarelectricidad.wordpress.com).

Envolvente: asegura protección a los diferentes componentes contra los impactos mecánicos, vibraciones e influencias externas que puedan interferir con la integridad operativa de los elementos internos.

Barraje: son elementos utilizados como conexión entre el tablero y la red que lo alimenta, el tamaño y número de barras depende de la capacidad nominal del tablero.

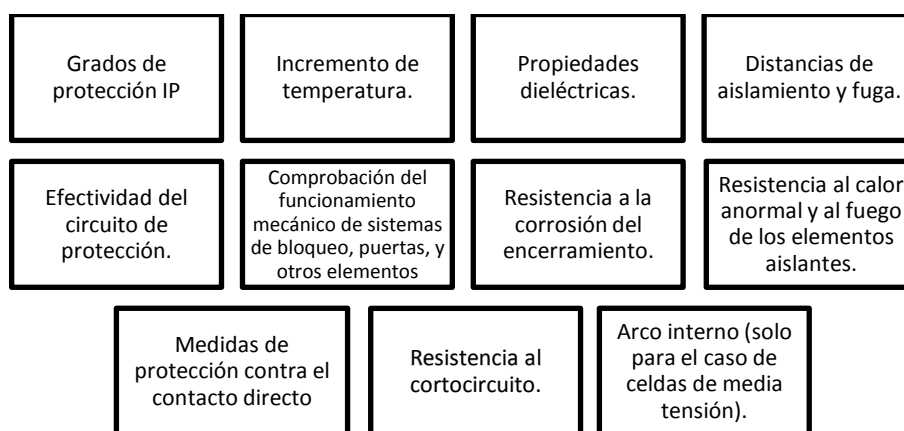
Soportes y aisladores: estos elementos fijan las barras dándole estabilidad ante las fuerzas electrodinámicas, además sirven como aislamiento eléctrico entre las barras y otros elementos del tablero.

1.3 PRUEBAS A TABLEROS ELÉCTRICOS DE BAJA Y MEDIA TENSIÓN

En la fabricación y ensamble de tableros eléctricos se debe garantizar la seguridad de los operarios y de los elementos del tablero, por lo tanto, los tableros se someten a pruebas que verifican sus especificaciones y correcto funcionamiento.

Para la certificación de los tableros de baja y media tensión, la verificación debe realizarse a través de las pruebas que se muestran en la Figura 10, esto teniendo en cuenta el reglamento técnico de instalaciones eléctricas colombiano.

Figura 10. Pruebas a tableros de baja y media tensión



Fuente: tomado del reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE.

Se debe tener en cuenta que algunos de estos ensayos son tipo y otros de rutina, los ensayos tipo se realizan para garantizar la conformidad de un cuadro eléctrico y verificación de las características del mismo; los ensayos de rutina tienen como objetivo encontrar fallas en los materiales y en la fabricación.

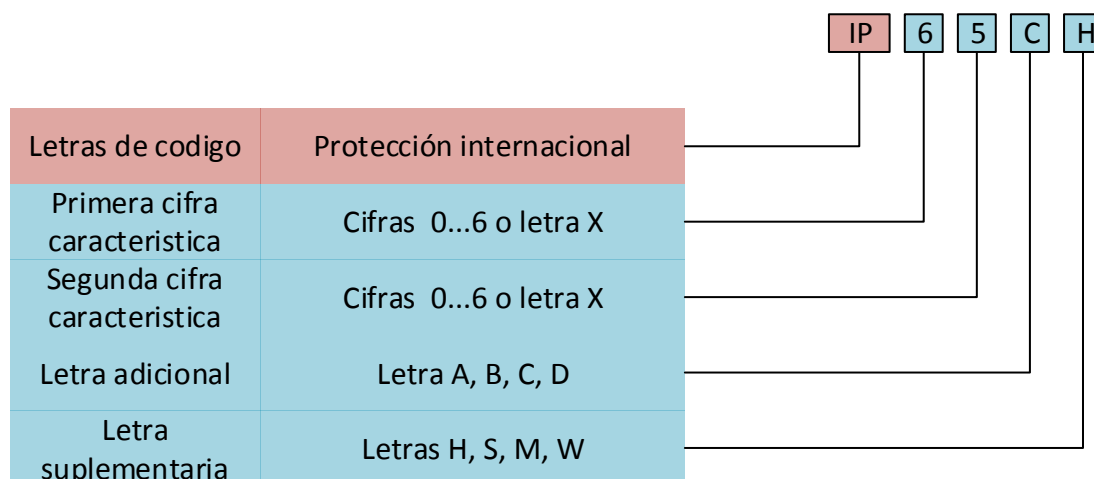
Los ensayos tipo son: verificación de los límites de aumento de temperatura, verificación de las propiedades dieléctricas, verificación de la capacidad de resistencia al cortocircuito, verificación de la efectividad del circuito de protección,

verificación de las distancias de aislamiento y fuga, verificación de la operación mecánica y verificación del grado de protección y los ensayos de rutina son inspección visual del panel incluyendo cableado, ensayo dieléctrico y verificación de medidas de protección.

1.3.1 Grado de protección IP.

El grado de protección IP define las especificaciones de la envolvente contra el acceso de elementos sólidos o líquidos a las partes energizadas. La identificación del código se encuentra conforme a la norma IEC 60529 como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Cifra y letra del código de protección IP



Fuente: Imagen tomada de cuaderno de aplicaciones técnicas ABB.

La primera cifra es la protección a elementos sólidos externos al tablero, La segunda cifra es la protección contra agua las letras adicionales proporcionan información sobre el grado de protección de personas contra las partes energizadas del tablero y suplementarias detallan especificaciones de la envolvente, en la Tabla 2

Tabla 2. Especificación de los grados de protección IP para encerramientos de tableros

Primera Cifra característica	Segunda Cifra Característica	Letra suplementarias y letras adicionales
0 No tiene protección.	0 No protegido.	H Aparato de alta tensión.
1 Protección a elementos mayores o iguales a 50	1 Caída vertical.	M Prueba de agua con equipos en marcha.

mm De diámetro.		
2 Protección a elementos mayores o iguales a 12.5 mm De diámetro.	2 Caída de gotas de agua con inclinación de 15 grados.	S Prueba de agua con equipos estacionarios.
3 Protección a elementos mayores o iguales a 2.5 mm De diámetro.	3 Lluvias.	W Condiciones atmosféricas.
4 Protección a elementos mayores o iguales a 1 mm De diámetro.	4 Salpicadura de agua.	A una superficie del cuerpo humano como la mano Prueba con: esfera de 50 mm
5 Protegido contra el polvo.	5 Chorro de agua.	B dedos u objetos análogos que no excedan una longitud de 80 mm Prueba con dedo de 12 mm de diámetro y longitud de 80 mm
6 Totalmente protegido contra el polvo.	6 Chorros potentes.	C Herramientas, alambres, etc. con diámetro o espesor superior a 2.5 mm prueba con varilla de 2.5 mm de diámetro y 100 mm de largo
	7 Inmersión temporal.	D Alambres o cintas con un espesor superior a 1 mm prueba con varilla de 1 mm de diámetro y 100 mm de largo
	8 Inmersión continua.	

1.3.2 Prueba de incremento de temperatura.

Esta prueba permite verificar el correcto funcionamiento de los tableros en condiciones máximas de utilización (corriente, número de aparatos, volumen de la envolvente). Los circuitos del tablero son energizados bajo diferentes configuraciones y se verifica que la temperatura en los componentes como el barraje, las conexiones y la envolvente no superen ciertos límites especificados en la norma IEC 61439-1 [2].

los principales objetivos de la prueba de elevación de temperatura son: proveer fiabilidad del estado de funcionamiento del tablero garantizando la disponibilidad del suministro de energía eléctrica, elevar el tiempo de vida de los componentes constitutivos del tablero, evitar daños en las conexiones y deterioro o mal funcionamiento de los componentes electrónicos.

1.3.3 Propiedades dieléctricas.

Esta prueba verifica la capacidad del aislamiento y la correcta conexión del tablero, el ensayo se realiza con el tablero descontado desde el lado de suministro y carga, se aplica la tensión de prueba con todos los elementos de protección y maniobra cerrados, el ensayo también se puede efectuar aplicando la tensión de prueba a los distintos circuitos del tablero.

La prueba es satisfactoria si al aplicar la tensión no se produce ninguna perforación o cortocircuito con emisión de chispas. Durante la prueba Deberán desconectarse todos los dispositivos que consuman corriente como bobinados, fuentes de alimentación, instrumentos de medición, que puedan resultar dañados por la aplicación de la tensión de prueba.

1.3.4 Distancia de aislamiento y fuga.

Los elementos que hacen parte del tablero deben mantener las distancias de acuerdo con las especificaciones de construcción correspondiente, estas distancias deben mantenerse en condiciones normales de utilización. Cuando se montan los elementos en el tablero se deben obedecer las distancias de aislamiento y las líneas de fuga o las tensiones soportadas al impulso especificadas, las distancias en los barrajes responderán a las reglas especificadas en los aparatos asociados

1.3.5 Efectividad del circuito de protección.

Esta comprobación permite verificar el correcto funcionamiento de los circuitos de protección reproduciendo las condiciones de servicio. También se puede hacer la comprobación eléctrica de los circuitos de control, señalización, alarma, disparo, cierre, circuitos de iluminación, calentamiento (si los hay), circuitos de medición entre otros.

1.3.6 Comprobación del funcionamiento mecánico de sistemas de bloqueo, puertas, y otros elementos.

Permite verificar el montaje adecuado de los equipos y su respectivo conexionado, el aprisionamiento y posicionamiento de las tuercas y pernos del tablero, correcto funcionamiento de dispositivos de bloqueo de elementos insertables,

enclavamientos mecánicos, bloqueos con llave y mecanismos de maniobra manuales para la extracción de interruptores automáticos y seccionadores mediante palancas u otro tipo de complemento.

1.3.7 Resistencia a la corrosión del encerramiento.

La prueba de resistencia a la corrosión [4] no se encuentra incluida dentro de las normas nacionales o internacionales, estas hacen parte de la experiencia del fabricante del tablero y se pueden encontrar en los documentos internos de los fabricantes.

1.3.8 Arco Interno.

La seguridad del operador y de la instalación en caso de arco en el interior de un cuadro eléctrico de baja tensión pueden lograrse a través de filosofías como:

1. Cuadros mecánicamente resistentes al arco interno (protección pasiva)
2. Cuadros dotados de dispositivos que limitan los efectos del arco interno (protección activa)
3. Cuadros dotados de interruptores limitadores

Estas tres soluciones (también combinables entre sí) han alcanzado un notable desarrollo en el ámbito industrial y han sido aplicadas con éxito por los principales fabricantes de cuadros eléctricos de baja tensión. Como se verá a continuación al examinar las dos primeras soluciones, una protección para los defectos de arco de tipo activo es intrínsecamente más compleja que una protección pasiva.

Esto se debe a la presencia de dispositivos electromecánicos/electrónicos adicionales que limitan los efectos del arco y que pueden estar sujetos por naturaleza a defectos o a intervenciones fallidas.

Según el manual de tableros de ABB [5], en el diseño de celdas el objetivo principal es el de evitar fallos que puedan ocasionar un arco eléctrico, por lo tanto en el diseño eléctrico y mecánico se debe considerar que en caso de que ocurra un arco eléctrico la celda debe seguir funcionando y la parte afectada puede ser reemplazada.

La probabilidad de aparición de un arco puede disminuirse considerablemente con un diseño adecuado, los efectos de un arco accidental pueden ser limitados mediante la reducción del tiempo de formación del arco con la ayuda de sensores

que operan ante variaciones de luz, temperatura o presión, los sensores disparan la alimentación principal en periodos de 40 a 80 ms reduciendo el tiempo del arco

La prueba de arco eléctrico está especificada en la norma IEC 61641 de 2008[6], de acuerdo a esta la duración del arco en la prueba se prefiere que sea entre 100ms y 500ms, el objeto sometido a ensayo se evalúa teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Seguridad apropiada para que las puertas no abran
- Las piezas que puedan representar peligro no deben aflojarse
- El arco no debe quemar las zonas accesibles
- Los protectores de los conductores expuestos a la falla deben conservarse
- Deben tenerse indicadores de algodón alrededor de la envolvente de la celda y estos no deben quemarse para garantizar que los gases generados por el arco se evacuaron por la zona dispuesta para este propósito.

1.3.9 Resistencia al calor anormal y al fuego de los elementos aislantes

Para verificar la resistencia al calor anormal y al fuego de los elementos aislantes se realiza una prueba llamada “hilo incandescente” sobre las partes del ensamble

Las temperaturas de hilo incandescente serán de

- 950°C para las partes que necesitan retener conductores por donde circula corriente
- 850°C para envoltentes destinados para el montaje en paredes huecas
- 650°C en el resto de partes

1.3.10 Medidas de protección contra el contacto directo

La protección contra los contactos directos consiste en tomar las medidas destinadas a proteger a las personas contra los peligros que resultan de un contacto con partes activas de los materiales eléctricos evitando que el contacto tenga lugar. La protección se puede obtener por medidas de protección apropiadas en el mismo panel o por medidas adicionales que se tomen durante la instalación.

Un ejemplo de medidas adicionales por tomar es la instalación de un panel tipo abierto sin permitir mayores disposiciones, en un lugar donde el acceso esta solamente permitido a personal autorizado.

La protección de las partes vivas se deberá cubrir completamente con aislamiento que solo se podrá retirar destruyéndolo.

El aislamiento deberá ser fabricado por materiales que resistan los esfuerzos mecánicos, eléctricos y térmicos a los cuales puede someterse en servicio.

1.4 PRUEBA DE RESISTENCIA A CORTOCIRCUITO

Uno de las principales pruebas denotadas en la norma IEC 61439-1 [2] y NTC 3278 [7] Es la prueba de resistencia al cortocircuito, los equipos exentos de este ensayo son:

- tableros cuya intensidad nominal de corta duración o intensidad nominal de cortocircuito es menor a 10 kA.
- tableros protegidos por dispositivos de limitación de corriente inferior a 17 kA.
- Circuitos auxiliares del tablero que se encuentren conectados a transformadores cuya potencia nominal no supera los 10kVA con una tensión nominal del secundario inferior a 110V y cuya tensión de cortocircuito mínima no sea inferior a 4 %.
- Equipos del tablero que ya han sido sometidos a pruebas de verificación válidas para las condiciones existentes.

Hay tres diferentes formas de verificar la resistencia al cortocircuito de los tableros de baja tensión, la primera es a través de comparación con un diseño de referencia usando una lista de chequeo, es decir el tablero es comparado con otro que tiene características similares mediante la tabla 13 de la norma IEC 61439 [2]. La segunda alternativa es la comparación con un diseño de referencia mediante cálculo, en este caso la fuerza entre el sistema de barras debido a un cortocircuito es calculada en conformidad con la norma IEC 60865-1 DE 2011[8], sin embargo, el cálculo solo se realiza utilizando el pico de corriente de cortocircuito además los tableros deben cumplir con los ítem 6-8-9-10 de la tabla 13 de la norma IEC 61439, si no es posible la verificación a través de estos dos métodos alternativos se debe realizar la prueba.

Durante el ensayo de resistencia al cortocircuito se deben someter a prueba los siguientes elementos del tablero:

- Circuitos de salida
- Circuitos de entrada y sistema de barras principales
- Conexiones a las unidades de salida
- Conductor neutro
- Circuito de protección

Durante la prueba de cortocircuito los medios de bloqueo y las bisagras de las puertas deben permanecer intactas, cualquier deformación en algún elemento del tablero conduce a que el ensamble no cumpla con los requisitos de la prueba. Se cumple con la prueba de resistencia al Corto Circuito, si no se presenta alteración del IP del Tablero y si se supera la prueba de tensión aplicada o HI-POT.

Como se explicó anteriormente, debido a los requerimientos este ensayo se realiza en instalaciones especializadas para pruebas de alta potencia, en Latinoamérica se pueden llevar a cabo en las instalaciones del Centro de Pesquisa de Energia Elétrica CEPEL (Brasil) y en el Laboratorio de Pruebas Equipos y Materiales LAPEM (México).

La verificación de la resistencia a la corriente de cortocircuito se basa principalmente en dos parámetros del cuadro:

- intensidad nominal admisible de corta duración (I_{CW})
- intensidad nominal de cortocircuito condicional (I_{CC})

Empleando uno de estos dos valores es posible determinar si el cuadro es adecuado para ser instalado en un punto de la instalación.

Debe verificar que los poderes de corte de los equipos en el interior del cuadro son compatibles con los valores de corriente de cortocircuito de la instalación[4].

I_{CW} Es el valor eficaz rms de corriente, declarado por el fabricante, soportado durante un segundo en la prueba de cortocircuito sin que las protecciones se abran y que puede soportar el cuadro sin daños, si la prueba es superada se define el valor de I_{CW} .

La norma también define la intensidad nominal admisible de pico I_{PK} como el valor pico de corriente de cortocircuito, y sirve para determinar las tensiones electrodinámicas, se obtiene multiplicando la corriente de corta duración por un factor n, conforme a la tabla 7 de la norma IEC 61439-1.

La intensidad nominal de cortocircuito condicional I_{CC} es el valor de corriente de cortocircuito prevista, declarado por el fabricante del cuadro, que éste puede resistir durante un tiempo de funcionamiento total (tiempo de corte) del dispositivo de protección contra cortocircuito.

1.4.1 Prueba a barrajes principales.

Los paneles con barrajes principales se someterán a un ensayo para probar la resistencia a cortocircuito y el circuito de entrada, incluyendo cualquier unión. El punto donde se produce el cortocircuito deberá estar a $2\text{ m} \pm 0,4\text{ m}$ de distancia del punto de alimentación más cercano. Para la verificación de la intensidad nominal admisible de corta duración y intensidad nominal de cortocircuito condicional, la distancia se puede aumentar si los ensayos se realizan a una tensión menor siempre que el valor de corriente del ensayo sea el valor nominal. Cuando la longitud de los barrajes que se van a ensayar es menor de 1,6 m y no está diseñado a recibir extensiones, entonces se deberá ensayar toda la longitud del barraje y el cortocircuito se establecerá en el extremo de las barras. Si un conjunto de barras consta de diferentes secciones (diferente sección transversal, diferente distancia entre barrajes adyacentes y diferente tipo y número de soportes por metro), cada sección se deberá ensayar separadamente.

Si existe una barra neutra se deberá someter a ensayo para verificar su resistencia al cortocircuito en relación con el barraje de fase más cercana incluyendo las uniones, el valor de la corriente de ensayo en esta barra deberá ser el 60 % de la corriente de fase durante el ensayo trifásico.

1.5 FENÓMENO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO

Es importante resaltar la definición de esfuerzo ya que mecánicamente es la fuerza por unidad de área y está dada en pascuales, sin embargo, en este documento se usa para definir las fuerzas electromagnéticas de cortocircuito de manera general, estas generan esfuerzos en las barras y en los soportes del tablero

Los cortocircuitos son disturbios que ocurren en los sistemas eléctricos, estos eventos generalmente producen altas magnitudes de corriente e interrumpen el flujo normal de la potencia, las fallas de cortocircuito en los sistemas eléctricos se pueden clasificar de acuerdo a los conductores que estén involucrados en el evento (fallas monofásicas, fallas bifásicas y fallas trifásicas). La severidad de un tipo de falla depende de las características del sistema, el nivel de cortocircuito del punto de conexión, la relación de impedancia de secuencia positiva y secuencia cero, el voltaje de pre-falla entre otros factores.

La circulación de corrientes de cortocircuito a través de los barrajes de los tableros produce esfuerzos mecánicos en los soportes y conductores. La generación de fuerzas de cortocircuito se puede explicar suponiendo la siguiente condición.

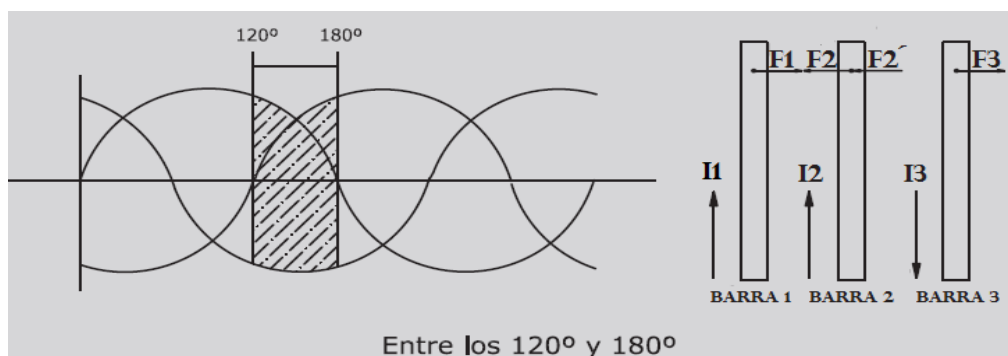
Si a través de dos conductores en paralelo circulan las corrientes I_1 e I_2 respectivamente, la circulación de estas corrientes produce un campo magnético

en cada uno de los conductores, las líneas de campo magnético se establecen radialmente a la posición del conductor, la dirección del campo va a depender del sentido de la corriente en cada uno de ellos.

Si las corrientes en los conductores circulan en el mismo sentido se generan fuerzas de atracción que intentarán unir los conductores, las fuerzas serán de repulsión e intentarán separar los conductores si las corrientes circulan en sentidos opuestos.

El fenómeno de atracción y repulsión producido por la interacción de la corriente y el campo magnético es conocido como fuerza electromagnética. Cuando en un tablero eléctrico de baja tensión se presenta una condición de cortocircuito, los barrajes estarán sometidos a fuerzas de atracción y repulsión de gran magnitud que dependerán de la magnitud de la corriente y el ángulo de fase de los voltajes en el instante de la falla.

Figura 12. Sentido de las fuerzas electromagnéticas en barraje trifásico



Fuente: Tomado de Efectos eléctricos [9]

En la Figura 12. Sentido de las fuerzas electromagnéticas en barraje trifásico se muestra un sistema compuesto por tres barras por las cuales circula corriente alterna trifásica. En ese instante de tiempo las corrientes I_1 e I_2 que circulan sobre las barras 1 y 2 respectivamente tienen la misma dirección, por ende, sus fuerzas son atractivas mientras que las corrientes I_2 e I_3 que circulan sobre las barras 2 y 3 tienen direcciones opuestas y por ende las fuerzas son repulsivas.

Debido a que las corrientes son oscilatorias, las fuerzas electromagnéticas son variables en el tiempo, teniendo un componente estacionario y un componente oscilatorio que pulsa al doble de la frecuencia. Bajo condiciones normales de operación las fuerzas son pequeñas, sin embargo, bajo condición de cortocircuito estas crecen en una proporción que depende del cuadrado del valor de la corriente, a modo de ejemplo, si la corriente nominal de un barraje es de 2000A y la corriente de cortocircuito es de 20000A, las fuerzas de cortocircuito van a ser 100 veces mayores a las que se presentan bajo condición de trabajo nominal.

2. CÁLCULOS DE FUERZAS MAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN TABLEROS DE BAJA TENSIÓN

En este capítulo se describen algunos métodos para el cálculo de las fuerzas de cortocircuito generadas en un conjunto de barras pertenecientes a un tablero de baja tensión, también se presentan referencias bibliográficas en las cuales se ha analizado el fenómeno de fuerzas y esfuerzos de cortocircuito en barrajes de tableros.

2.1 FORMULACIONES PARA CÁLCULO DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las formulaciones utilizadas para solución de problemas computacionales de electromagnetismo se clasifican según el tipo de ecuación en derivadas parciales que resuelve, de esta forma se tienen dos grupos: fórmulas que manejan potenciales escalares o vectoriales y formulas basadas en la solución de las ecuaciones de maxwell.

En el campo de la ingeniería es de interés el cálculo de dos tipos de fuerzas magnéticas, la fuerza local y la fuerza total; el tipo de fuerza local se denomina también densidad de fuerza y es básico para el estudio y análisis de sistemas formados por cuerpos deformables¹, se utilizan para conocer el comportamiento del material, la fuerza total se fundamenta en el movimiento de un sólido rígido² y se utiliza para conocer el comportamiento total de un sistema[10].

Los dos tipos de fuerzas pueden ser hallados mediante la ecuación (1), [10]:

$$F_{total} = \int_{\Omega} f_{local} d\Omega \quad (1)$$

donde Ω es una superficie cualquiera y la fuerza total corresponde a la suma de las fuerzas locales que actúan sobre un cuerpo, cuando las fuerzas locales actúan sobre la superficie de un medio Ω , la forma de realizar dicha suma es desacoplando la fuerza local en sus componentes normal y tangencial[10].

$$F_{total} = \int_{\Gamma} f_t * t + f_n * n d\Gamma \quad (2)$$

¹ Sólido deformable: característica de todos los cuerpos de cambiar forma o tamaño debido a esfuerzos internos causado por fuerzas aplicadas sobre el mismo y se utiliza en la mecánica para estudiar el comportamiento de los sólidos, con resultados muy aproximados a los de un sólido real

² Sólido Rígido: conjuntos de puntos ubicados espacialmente que se mueven sin alterar la distancias entre ellos debido a cualquier tipo de fuerza.

Donde $\mathbf{t}$ y $\mathbf{n}$ denotan los vectores normalizados tangencial y normal a la superficie, $\mathbf{r}$ es el contorno a la superficie Ω .

En la primera formulación, la fuerza electromagnética total se expresa en función de las cargas en movimiento, la intensidad de campo eléctrico y la densidad de flujo magnético; si solo se expresa sobre una carga puntual en movimiento dicha relación se determina a través de la ley de Lorentz como se muestra en (3), siendo $\mathbf{F}_e$ la fuerza eléctrica, $\mathbf{F}_m$ la fuerza magnética y $\mathbf{v}$ la velocidad de la partícula.

$$\mathbf{F}_{em} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

En barras conductoras en donde en lugar de partículas existen densidades de corriente la expresión (3) debe ser modificada en función de la corriente $\mathbf{I}$ (A), una densidad superficial de corriente $\mathbf{k}$ (A/m), y una densidad volumétrica de corriente $\mathbf{J}$ (A/m²), de acuerdo a esto la ecuación anterior se puede definir como se indica en (4), (5) y (6).

$$\mathbf{F}_m = \oint_l \mathbf{I} d\mathbf{L} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_m = \oint_r \mathbf{k} \times \mathbf{B} d\Gamma \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_m = \oint_{\Omega} \mathbf{J} \times \mathbf{B} d\Omega \quad (6)$$

Donde $d\mathbf{l}$ es un diferencial de longitud, $d\Gamma$ un diferencial de superficie y $d\Omega$ un diferencial de volumen; para algunas aplicaciones se pueden encontrar expresiones que consideran la ley de Maxwell-Ampere en el vacío para campos eléctricos estacionarios (ecuación 7) y la identidad de campos vectoriales (ecuación 8), la integral de la ecuación (6) se puede reescribir como se muestra en (9) y (10)

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla \left(\frac{B^2}{2} \right) - (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (8)$$

$$F_m = \int_{\Omega} J \times B \, d\Omega = \int_{\Omega} -\nabla \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) + \frac{1}{\mu_0} (B \cdot \nabla) B \, d\Omega \quad (9)$$

$$F_m = - \int_{\Gamma} \frac{1}{2\mu_0} B^2 n + \frac{1}{\mu_0} B (B \cdot n) \, d\Gamma \quad (10)$$

La ecuación (9) permite calcular la fuerza total en términos del campo magnético, esta expresión solo tiene en cuenta medios conductores y no considera medios magnéticos.

La ecuación (10) por su parte, expresa la fuerza total en función de la energía magnética U , ver ecuación (10) [11], [12].

$$U = \int_{\Omega} \left(\int_0^B H dB \right) d\Omega = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \mu H^2 d\Omega \quad (10)$$

La fuerza magnética total con restricción de flujo magnético constante en la dirección p , se expresa en la ecuación (11) como la derivada parcial de la energía magnética en la dirección p .

$$F_{m,p} = \left(-\frac{\partial U}{\partial p} \right)_{\phi} \quad (11)$$

En la tercera formulación (ecuación 12) se reemplazan los materiales magnéticos por corrientes magnéticas o cargas magnéticas equivalentes y es utilizado comúnmente con campos estacionarios donde la fuerza magnética es calculada a partir de una analogía con la ley de coulomb para el campo eléctrico ($F_e = qE$) [13].

$$F_m = Q_M H = \nabla \left(\frac{1}{\mu_r} \right) * BH \quad (12)$$

Donde Q_M es una carga magnetica, H es la intensidad de campo magnético y μ_r la permeabilidad relativa del medio.

2.2 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA MAGNÉTICA

El cálculo de las fuerzas magnéticas requiere computar previamente el campo magnético mediante el método de elementos finitos o cualquier otro método numérico ya que estos se basan en las tres formulaciones que se exponen en el apartado anterior (ecuaciones (3), (10) y (12)); fundamentalmente hay cinco métodos clasificados para el cálculo de fuerzas magnéticas.

El primer método se denomina **Tensor de tensiones de maxwell**, es basado en las formulaciones (8) y (9), sobre una superficie que englobe el dominio de interés Ω , para ello dicha superficie debe estar ubicada en el vacío. El cálculo de integración de este método se realiza separando las componentes normales y tangenciales. Debido a su sencillez y parecido con el fenómeno físico este método es muy utilizado[10].

El Segundo es llamado **método de trabajo virtual de coulomb**, este se basa en la función de la energía magnética y puede ser desarrollado de 3 maneras diferentes, una de ellas es descomponer la expresión (11) mediante diferencias finitas, otra forma es utilizando matrices jacobinas de la transformación en el método de elementos finitos en los cálculos integrales y la tercera manera es descomponiendo la fuerza en sus componentes tangenciales y normales como se hace en el método de tensor de maxwell[10].

El tercer método denominado **corrientes de magnetización**, sustituye un medio magnético por un medio no magnético donde existe una distribución de corriente magnética, la fuerza es calculada a partir de las componentes tangencial y normal de la fuerza local, este método depende mucho de la calidad del mallado y los resultados son poco precisos, sin embargo en [14] se presenta una versión modificada que permite mejorar los resultados[10].

El cuarto método es llamado **cargas magnéticas**, está basado en sustituir un medio magnético por un medio no magnético donde existe una distribución de cargas magnéticas [15]. La precisión de la fuerza total depende esencialmente del cálculo de B_n , por lo tanto en la implementación de este método se debe hacer especial énfasis en ese cálculo [15][12].

El quinto método denominado **densidad de fuerza superficial** es derivado del método de tensor de maxwell, generando los mismos resultados que el método del trabajo virtual de coulomb, para este caso la fuerza magnética solo depende de la componente normal.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los métodos anteriores para las componentes normales y tangenciales de las densidades de fuerza magnética.

Tabla 3. Densidad de fuerzas locales para los diferentes métodos.

Métodos	$f_{tangencial}$	f_{normal}
Tensor de tensión de maxwell (F_m^{Ttm})	$H_t B_n$	$\frac{1}{2} (\frac{1}{\mu_o} B_n^2 - \mu_o H_t^2)$
Trabajo virtual de coulomb (F_m^{Tvc})	0	$\frac{1}{2} [(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu}) B_n^2 - (\mu_o - \mu) H_t^2]$
Corrientes de magnetización (F_m^{Jm})	$(1 - \mu_r) B_n H_t$	$\frac{1}{\mu_o} (\mu_r^2 - 1) H_t^2$
Cargas magnéticas (F_m^{Qm})	$(1 - \frac{1}{\mu_r}) B_n H_t$	$\frac{1}{\mu_o} (\mu_r^2 - 1) B_n^2$
Densidad de fuerzas superficiales (F_m^{Dfs})	0	$\frac{1}{2} [(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu}) B_n^2 - (\mu_o - \mu) H_t^2]$

Fuente: tabla tomada de revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño de ingeniería- método de elementos finitos en problemas electromagnéticos[10]

Todos los métodos mencionados anteriormente son equivalentes [11], [8], puesto que se cumplen las condiciones indicadas en (13), (14), (15) y (16).

$$F_m^{Jm} = F_m^{Ttm} - \mu_r F_\epsilon \quad (13)$$

$$F_m^{Qm} = F_m^{Ttm} - (\frac{1}{\mu_r}) F_\epsilon \quad (14)$$

$$F_m^{Dfs} = F_m^{Ttm} - F_\epsilon \quad (15)$$

$$F_m^{Dfs} = F_m^{Tvc} \quad (16)$$

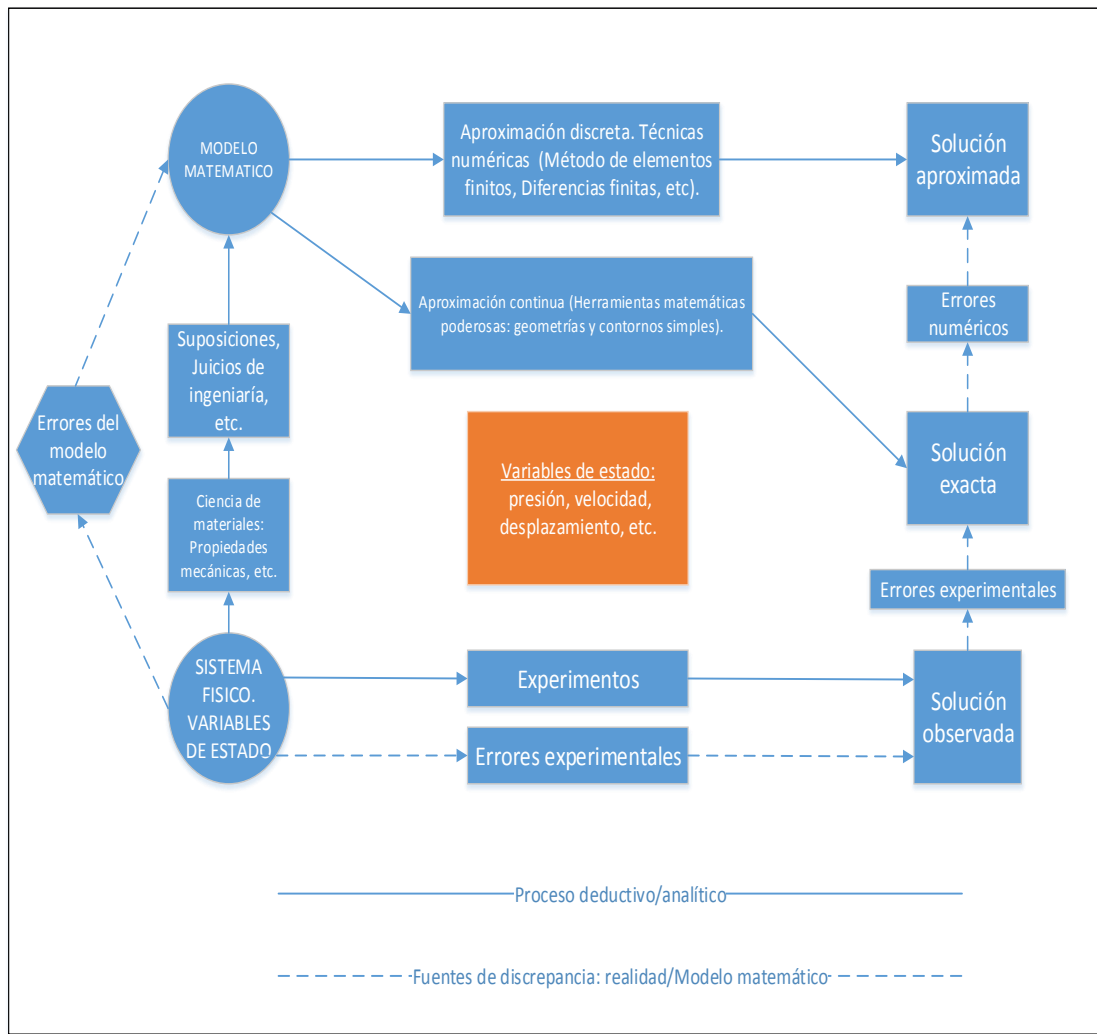
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL CÁLCULO DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

Los métodos de elementos finitos, diferencias finitas, volumen de control y de contorno, son algunos de los métodos numéricos que se han desarrollado y utilizado exitosamente en la solución de problemas en distintas áreas de la ciencia y la ingeniería, aun cuando estos métodos forman parte de una poderosa herramienta para la solución de problemas matemáticos, las soluciones siguen siendo aproximaciones por lo cual se debe tener especial cuidado en el momento de interpretar los resultados.

La aproximación a los resultados en el método de elementos finitos depende de varios factores de los cuales podemos destacar la distribución del mallado en la región de estudio, el tipo de mallado en el tiempo para los problemas no permanentes, la aplicación apropiada de las condiciones de contorno, la correcta inclusión en el modelo de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el problema.

El modelamiento matemático de un problema se puede esquematizar como se muestra en la Figura 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el sistema real del problema a resolver se transforma en un modelo matemático mediante la inclusión de principios físicos, propiedades de los materiales e hipótesis que se pueden incluir en el problema a resolver.

Figura 13. Diagrama esquemático del modelaje matemático de un problema.

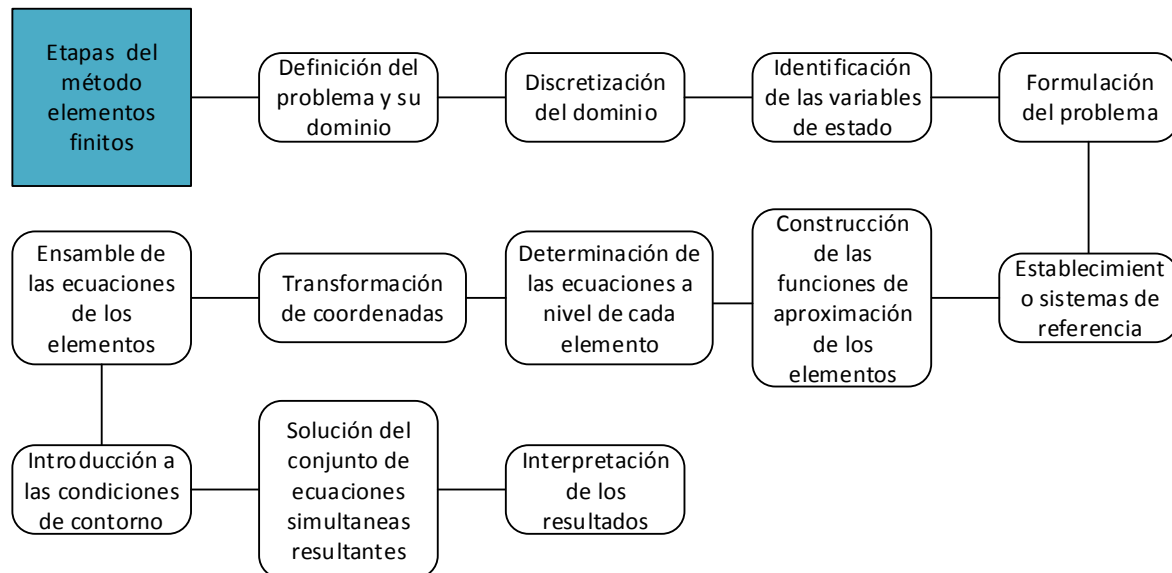


Fuente: Tomado de libro "el método de elementos finitos: una introducción"[16].

El método de elementos finitos es una de las técnicas numéricas más utilizadas debido a la capacidad para modelar dominios irregulares, condiciones de contorno, no-linealidades y por la facilidad en la selección de mecanismos de aproximación de las variables involucradas en problemas específicos [16].

El método de elementos finitos (MEF) es un método de propósito general, requiere de integración de funciones simples, no requiere de mallas estructuradas. En la Figura 14 se observan las etapas básicas de la utilización del método de elementos finitos independientemente del fenómeno físico a analizar.

Figura 14. Etapas del método de elementos finitos



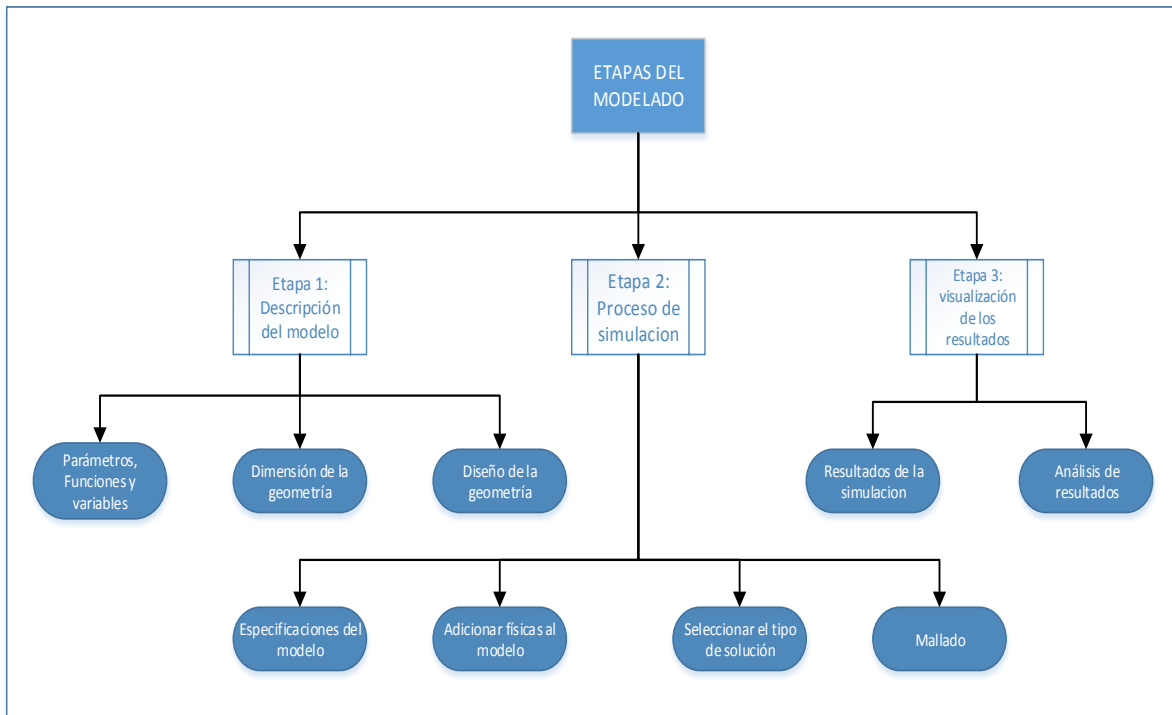
En este trabajo se utilizó el método de elementos finitos para conocer el valor de las fuerzas magnéticas en un sistema de barras de un tablero eléctrico que se encuentra en condiciones de cortocircuito, para ello se utiliza el programa COMSOL Multiphysics [17].

En la Figura 15 se aprecian las etapas para el modelado en el programa COMSOL Multiphysics. en la etapa 1 se definen las características del modelo, las condiciones del análisis y la geometría, en la etapa 2 se ingresan las características del material, condiciones de frontera, el tipo de solución y el establecimiento de la malla y en la etapa 3 se obtienen los resultados de la simulación realizando el análisis de los mismos.

Las fuerzas generadas entre las barras debido a la interacción del campo magnético y la corriente de cortocircuito, se pueden estudiar desde el punto de vista estacionario o temporal.

El estudio estacionario se utiliza para problemas que esperan una solución fija es decir ver la fuerzas en un instante del tiempo determinado, por otra parte, el estudio temporal se utiliza en problemas cuyos resultados son variables en el tiempo.

Figura 15. Etapas del modelado en COMSOL Multiphysics.



Fuente: Imagen tomada de introducción al uso del software COMSOL Multiphysics[18]

2.4 SOFTWARE SWITCHGEAR DESIGN PARA EL CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LOS SOPORTES DE LOS CONDUCTORES

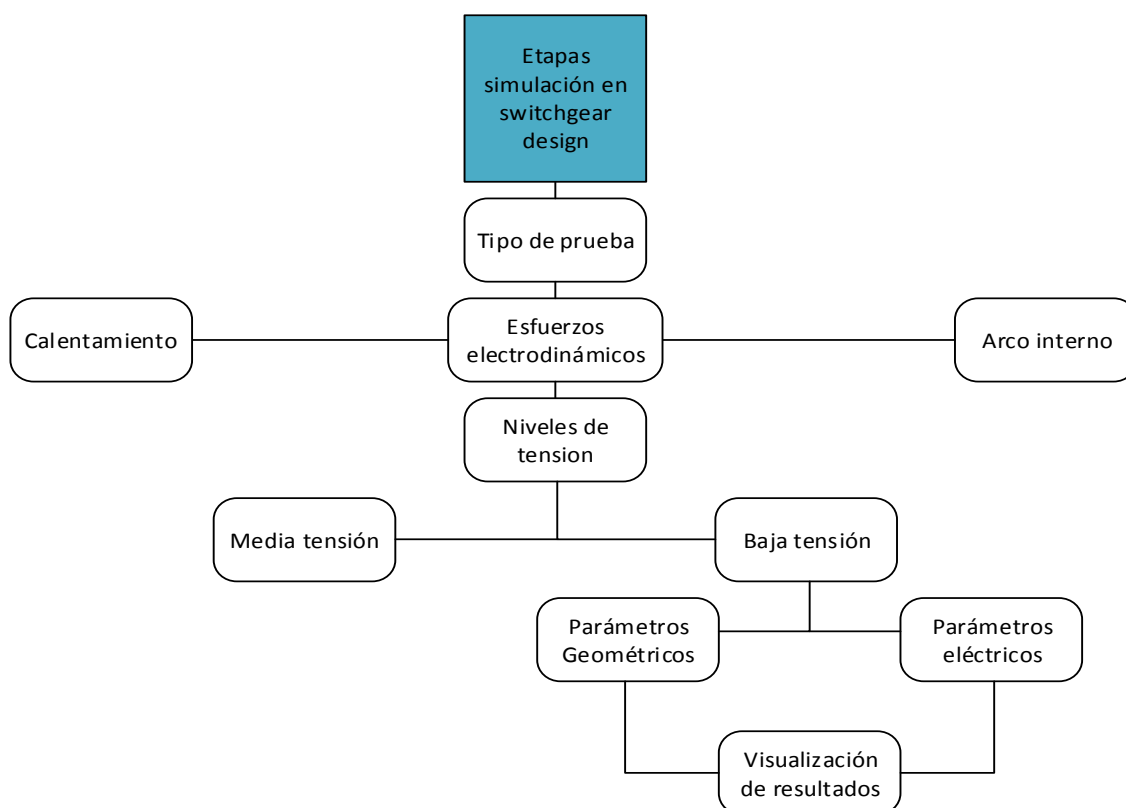
Switchgear Design es un software desarrollado por la empresa brasileña Cognitor, el programa es utilizado para el diseño de equipo para subestaciones de media y baja tensión, principalmente tableros y celdas, canalizaciones eléctricas y seccionadores. El software es aplicable a los productos de las normas IEC 62271 de 2015, IEC 61439 de 2011, IEC 61641 de 2014 [2]; Switchgear Design permite la simulación de los siguientes ensayos:

- Pruebas de corrientes soportables de corta duración y de cresta (Fuerzas electrodinámicas).
- Prueba de calentamiento
- Pruebas de arco interno (cálculo de sobrepresión)

El objetivo del programa es permitirles a los pequeños fabricantes de tableros que tienen dificultades en el acceso a laboratorio de prueba, contar con una herramienta que permita simular algunos ensayos requeridos para la certificación

de sus productos. La simulación de pruebas permite desarrollar tableros con menos materia prima, garantizando la confiabilidad del producto y la competitividad en el mercado. En la Figura 16 se muestra un panorama general relacionado con el uso del programa Switchgear Design para simular la prueba de esfuerzos electrodinámicos.

Figura 16. Etapas para la simulación de esfuerzos electrodinámicos en tableros de baja tensión mediante programa Switchgear Design.



En la Figura 17 se presenta la interfaz del programa Switchgear Design, para el caso de esfuerzos en tableros se selecciona el módulo de esfuerzos electrodinámicos, seguido a ello se selecciona el tipo de equipo (Tableros de media tensión-tableros de baja tensión), luego se selecciona el tipo de tablero de acuerdo a su configuración, finalmente se dan valores a los parámetros geométricos del barraje, número de aisladores, corrientes, materiales, número de conductores por fase y dimensiones. En la opción geometría se puede observar cómo está conformado el tablero y se muestran los parámetros geométricos del equipo.

Figura 17. Interfaz de entrada de datos módulo de fuerzas electrodinámicas programa Switchgear Design.

2.5 MÉTODO DE NORMA IEC 60865 PARA CÁLCULO DE FUERZAS ELECTRODINÁMICAS ENTRE BARRAS.

En el año 1993 se publica un reporte técnico en el cual la IEC un método para el cálculo de las fuerzas y esfuerzos en barrajes trifásicos, para el año 1995 aparece una segunda edición y para el año 2011 se publica su más reciente actualización, este reporte permite determinar los efectos mecánicos y térmicos de las corrientes de cortocircuito y contiene procedimientos para el cálculo de los efectos electrodinámicos en conductores rígidos y conductores flexibles y el efecto térmico sobre conductores desnudos.

Los conductores rígidos pueden ser soportados de diferentes maneras que dependen del tipo, el número de soportes y la tensión mecánica a la que se encuentran los conductores incluyendo su elasticidad. Las tensiones en los conductores y las fuerzas sobre los soportes dependen de la relación entre la frecuencia natural del sistema mecánico y la frecuencia del sistema eléctrico.

En un sistema trifásico con los conductores principales dispuestos a la misma distancia entre centros en el mismo plano, el máximo de fuerzas actúa sobre el conductor central durante un cortocircuito trifásico, esta fuerza se define en la ecuación (17).

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{i_p^2 l}{a_m} \quad (17)$$

Donde “ i_p ” es el valor pico de corriente de cortocircuito trifásico, para el cálculo de las corrientes de cortocircuito se sugiere revisar la norma IEC 60909 de 2001 [19], “ l ” es la distancia central máxima entre soportes adyacentes, “ a_m ” es la distancia efectiva entre conductores principales. Las fuerzas entre conductores dependen de la configuración geométrica y la forma de los conductores, por esta razón es introducida la distancia efectiva a_m entre conductores principales y entre sub-conductores.

La ecuación (17) también se puede utilizar para el cálculo de la fuerza máxima resultante cuando conductores con secciones transversales circulares se encuentran en las esquinas de un triángulo equilátero y donde a_m es la longitud del lado del triángulo.

Si los conductores principales tienen sección circular la distancia efectiva es:

$$a_m = a \quad (18)$$

Si los conductores principales tienen sección transversal rectangular y sub-conductores la distancia efectiva es:

$$a_m = \frac{a}{k_{1s}} \quad (19)$$

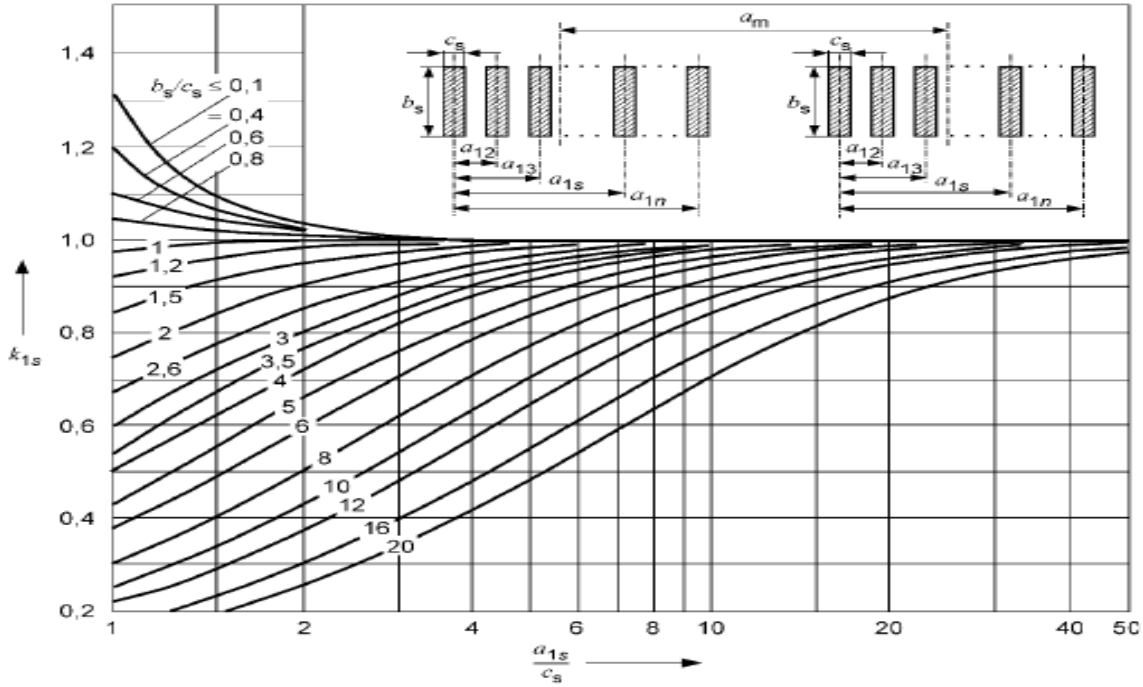
Donde “ k_{1s} ” se estima gráficamente a partir de la Figura 18.

El cálculo de la fuerza máxima de cortocircuito entre conductores durante una falla línea a línea en un sistema trifásico o en dos líneas de un sistema monofásico se realiza mediante la ecuación (20):

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (20)$$

Donde “ i_{p2} ” es el valor pico de corriente de cortocircuito en caso de un cortocircuito línea a línea, “ l ” es la distancia central máxima entre soportes adyacentes, “ a_m ” es la distancia efectiva entre conductores principales.

Figura 18. Factor k_{1s} para cálculo distancia efectiva entre conductores



Fuente: Imagen tomada de IEC 60865-1993 [8]

Donde a_{1s} = distancia entre centro de sub-conductores, b_s = alto del conductor y c_s = ancho del conductor.

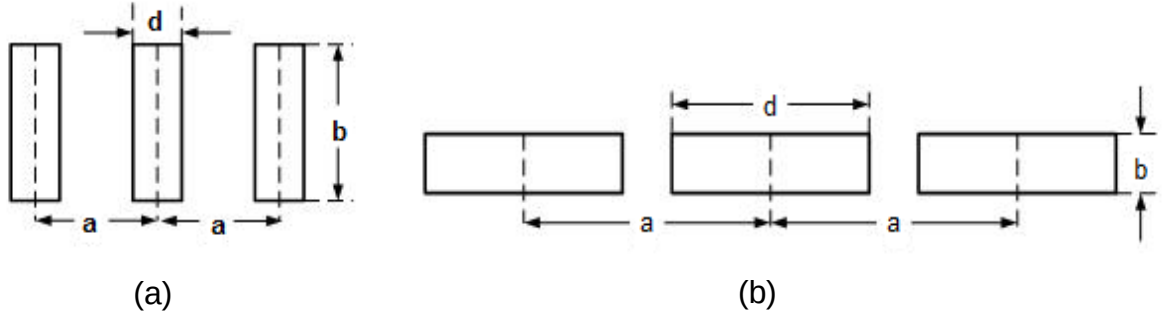
En la norma IEC 60865-1 de 1993 [8] el máximo de fuerza electromagnética se da en la fase central (fase S) del arreglo de conductores que se muestra en la Figura 19, mediante la siguiente expresión 21:

$$F_{mS} = \frac{\mu_0}{2\pi a_m} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \quad (21)$$

El máximo de fuerza electromagnética actuante sobre las otras barras (fase R y fase T), están dadas por la expresión 22:

$$F_{mR} = F_{mT} = \frac{\mu_0}{2\pi a_m} \frac{3 + 2\sqrt{3}}{8} i_p^2 \quad (22)$$

Figura 19. Sistema de barras (a) posición vertical, (b) posición horizontal



Fuente: Tomado [20] estudio de fuerza electromagnética afectada por un corto-circuito en sistema de barras con arreglo horizontal y vertical

2.6 MÉTODO IEC 60865-1 PARA EL CÁLCULO DE FUERZA SOBRE LOS SOPORTES DE LAS BARRAS.

El esfuerzo de flexión σ de un juego de barras no debe exceder el límite especificado en el caso de un corto circuito para evitar una tensión excesiva en el material. La tensión en conductores rígidos (barras colectoras) y las fuerzas sobre los soportes están influenciados por la respuesta oscilatoria de los conductores. Este cambio es dependiente de las condiciones de fijación y la deformación plástica permisible o frecuencia natural del conductor.

Para calcular el estrés sobre conductores principales ver ecuación 23 y con sub conductores ver ecuación 24.

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} * V_{rm} * \beta * \frac{F_m * l}{8 * W_m} \quad (23)$$

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} * V_{rs} * \frac{F_s * l_s}{16 * W_s} \quad (24)$$

Al considerar deformación plástica $V_{\sigma m} * V_{rm} = V_{\sigma s} * V_{rs} = 1$ en sistema bifásico de A.C. y en sistemas trifásicos sin recierre trifásico y $V_{\sigma m} * V_{rm} = V_{\sigma s} * V_{rs} = 1.8$

El estrés total sobre el conductor es la combinación del estrés por conductor principal y sub conductor $\sigma_{total,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d}$

El equivalente estático de fuerza sobre los soportes de los conductores rígidos puede ser calculado como se muestra en la ecuación 25:

$$F_{r,d} = V_f * V_{rm} * \alpha * F_m \quad (25)$$

Donde F_m es el valor de fuerza magnética de un sistema trifásico o de sistemas monofásico de dos líneas, el valor de $V_f * V_{rm}$ puede ser tomado de la Tabla 4, el factor α es independiente del tipo y numero de soportes y se debe tomar de la Tabla 5.

Los conductores se consideran a prueba de cortocircuito cuando $\sigma_{total} \leq q * R_{p0.2}$ y $\sigma_s = R_{p0.2}$, donde q es el factor de plasticidad igual a 1.5 para barras rectangulares y $R_{p0.2}$ el límite de elasticidad del material.

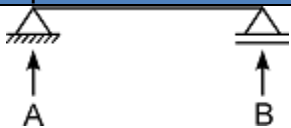
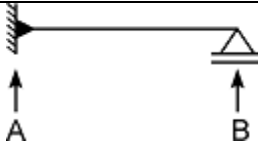
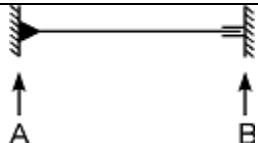
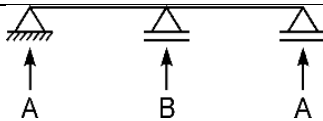
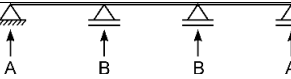
Tabla 4. Posibles valores para los factores de fuerzas

Tipo de cortocircuito	Sistema			
	Sin reconexión trifásica automática	Con reconexión trifásica automática		Con y sin reconexión automática trifásica
	$V_{0m}V_{rm}, V_{0s}V_{rs}$	$V_{0m}V_{rm}, V_{0s}V_{rs}$		$V_F V_{rm}$
		Primer flujo de corriente	Segundo flujo de corriente	
Línea-Línea	1	1	1.8	$2,0$ for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$ $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ RANGO 1 2 3
Trifásico	1	1	1.8	$2,7$ for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$ $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ RANGO 1 2 3

Fuente: tabla 2 de la norma IEC 60865-1 2011

Donde f_y es el esfuerzo correspondiente al límite de tracción $R_{p0.2}$.

Tabla 5. Factores $\alpha - \beta - \gamma$ para diferentes arreglos de soporte de barras

Tipo de travesaño y soporte			α	β^*	γ
Travesaño de un solo vano	A y B: Soportes simples		A: 0,5 B: 0,5	1,0	1.57
	A: Soporte fijo B: soporte simple		A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11}=0.73$	2.45
	A y B: Soportes fijos		A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16}=0.5$	3.56
Travesaño con tramos y apoyos equidistantes	Dos tramos		A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11}=0.73$	2.45
	Tres o más tramos		A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11}=0.73$	3.56
*Incluidos efecto de plasticidad					

Fuente: tabla 3 de la norma IEC 60865-1 2011

2.7 TRABAJOS RELACIONADOS CON FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS DE CORTOCIRCUITO EN SISTEMAS DE BARRAS

Se han desarrollado diversos estudios relacionados con simulaciones en elementos finitos para encontrar las fuerzas electromagnéticas generadas en un sistema de barras durante un cortocircuito.

En el año 1996, D P Labridis y A. Assumpfions desarrolla un trabajo cuyo objetivo era analizar el comportamiento de las fuerzas electromagnéticas y adicionalmente calculan las fuerzas cuando hay presencia de sub-conductores por fase. Los resultados que obtienen los autores de este trabajo son comparados con los calculados a través del reporte técnico IEC 865/1986; en conclusión, los autores obtienen diferencias significativas en el cálculo de fuerzas con respecto a las normas IEC 60865-1 y la norma DINNDE [21].

En el año 1999 Manoj R. Shah, Gary Bedrosian y James Joseph desarrollan un análisis para un sistema de barras de tres fases con corriente de estado estacionario y de cortocircuito utilizando el método de elementos finitos con un circuito acoplado. El sistema de barras consta de 9 conductores de cobre, tres en paralelo por cada fase con un conductor de aluminio. Las corrientes por fase totales no se conocen a priori y se realiza un estudio en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. Los autores concluyen en este trabajo que partiendo de un análisis en estado estacionario simplificado se puede calcular la sección transversal efectiva de los conductores y la resistencia efectiva para cada frecuencia, sin embargo, este método no tienen en cuenta algunos factores como la forma detallada de los conductores, la distribución de corrientes por cada conductor, la proximidad de conductores con otras fases y la interacción con todo el conjunto de barras, afectando el valor de resistencia efectiva [22].

En el año 2003 Dimitris G Triantafyllidis, Petros S. Dokopoulos, Dimitris P. Labridis desarrollaron un trabajo para observar la precisión de los resultados obtenidos a través del método de elementos finitos utilizando diferentes procedimientos de mallado, las corrientes de cortocircuito fueron ingresadas en fasores desplazados 120° [23].

Se utilizaron tres tipos de mallados (LIG, Graded, CDT), dentro de las conclusiones el mallado LIG (let-it-grow), el cual utiliza redes neuronales para la generación automática del mallado es el más rápido, exacto y utiliza menores recursos computacionales. Los resultados en la Tabla 6 indican el porcentaje de diferencia entre los resultados obtenidos comparados con los calculados a través de las formulas propuestas por la norma IEC 60865 de 1993.

Tabla 6. Valores de fuerza a través de la norma IEC 60865 y la diferencia porcentual con los resultados obtenidos a través de los diferentes mallados

Tipo de mallado y Norma	Prueba para caso $b/d=3, a/d=3$			Prueba para caso $b/d=1, a/d=7$		
	Fase			Fase		
	a	b	c	a	b	c
IEC 60865 (REF.)	19.11392	20.48624	19.11392	9.23430	9.89730	9.23430
LIG	1.49	0.06	0.95	-0.35	-0.28	-0.62
Graded	1.53	0.09	1.03	-1.54	-0.10	0.26
CDT	1.54	0.08	0.98	-0.42	-0.07	-0.22

Fuente: tabla V y tabla VI de artículo "Parametric short-circuit force analysis of three-phase busbars, a fully automated finite element approach" [23].

En el año 2009 Canova Aldo, Giaccone Luca desarrollan un trabajo en el cual consideran el método numérico denominado "MC Model o modelo multiconductor",

este es comparado con el método de elementos finitos y adicionalmente realizan simulaciones en donde el posicionamiento de las barras es diagonal y no posicionadas horizontalmente o verticalmente. En la primera barra circula una corriente $I_R = \sqrt{2}I_{eff}\sin(\omega t)$, en la segunda barra circula $I_S = \sqrt{2}I_{eff}\sin(\omega t - 120^\circ)$ y en la tercera barra $I_T = \sqrt{2}I_{eff}\sin(\omega t + 120^\circ)$ donde $i_{eff} = 2500A$. Los autores concluyen para este trabajo que el método numérico no requiere el conocimiento de teoría de elementos finitos y por lo tanto no necesita ningún software especial, con el método numérico MC se pueden calcular las distribuciones de corriente y fuerzas electrodinámicas a partir de un circuito eléctrico equivalente con parámetros. El método tiene una limitación ya que solo puede asumir una densidad de corriente constante en cada conductor [24].

En el año 2011 Yusop Farhana Mohamad, Kamarol Mohamad, Ishak Dahaman, Masri Syafrudin, desarrollaron un estudio para analizar el comportamiento de las fuerzas al cambiar el posicionamiento de las barras, en el estudio se encontró que las barras en posición vertical como aparecen en Figura 19 (a), obtienen aproximadamente el doble de fuerza que la barras en posición horizontal figura 17 (b) y además es posible observar que la barra central para cualquiera de los dos arreglos siempre tiene mayor fuerza en comparación con las barras laterales [20].

En este estudio se asumió que la falla era un cortocircuito trifásico debido a que este tipo de falla produce el mayor estrés mecánico, la distancia entre el centro de las barras es mucho más pequeña comparada con la longitud del conductor de manera que se consideran barras de longitud infinita, la permeabilidad es constante y el tipo de estudio es de estado estacionario con valor de corriente igual al pico de corriente de cortocircuito [20]. En la simulación se utilizó el software de elementos finitos OPERA 2D, en la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos en este estudio los cuales son comparados con los calculados según la norma IEC 60865 de 1993.

Tabla 7. Resultados obtenido del estudio elaborado por Yusop, Kamarol y Ishak

Máximo de fuerza [N/m]	Cálculos	simulación	diferencia
F_{ma}	6578.80	7156.60	8.78%
F_{mb}	7051.14	7266.20	3.05%
F_{mc}	6578.80	7152.50	8.78%

Fuente: tabla tomada de "Study on the electromagnetic force affected by short-circuit current in vertical and horizontal arrangement of busbar system" [20].

En el año 2015 Gholamreza Kadkhodaei, Keyhan Sheshyekan, Mohsen Hamzeh presentan un estudio eléctrico, magnético, térmico y mecánico acoplado en virtud de una corriente de cortocircuito. El estudio es llevado a cabo por el método de elementos finitos, lo que permite modelar varias físicas al mismo tiempo. Este

método evalúa la fuerza magnética, el aumento de temperatura y el desplazamiento mecánico obtenido a través de un análisis tridimensional.

Las corrientes que se asumen para cada una de las barras son las siguientes

$$I_a(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - \frac{V_m}{Z} e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma) \quad (26)$$

$$I_b(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \gamma - 120^\circ) - \frac{V_m}{Z} e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma - 120^\circ) \quad (27)$$

$$I_c(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \gamma - 120^\circ) - \frac{V_m}{Z} e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma - 120^\circ) \quad (28)$$

Donde $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\tau = \frac{L}{R}$, $\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$, $\alpha = \gamma - \frac{\pi}{2}$, Para valores de $V_{rms} = 380V$, $R = 2.1415m\Omega$ (Resistencia de la barra), $L = 0.0264 mH$ (Inductancia de la barra).

Los resultados para las fuerzas electromagnéticas son comparados con la norma IEC 60865 de 1993, ver Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de máximo de fuerzas en artículo de Gholamreza y Keyhan

Máximo de fuerza	Cálculos [N/m]	Simulación [N/m]	Diferencia %
F_{ma}	2945.07	2816.28	4.58
F_{mb}	3135.13	3015.44	3.83
F_{mc}	2945.07	2816.28	4.58

Fuente: tabla tomada en artículo "Steady-state loss and short-circuit force analysis of a three-phase bus using a coupled finite element + circuit approach" [22].

Los autores demuestran que el enfoque presentado en el trabajo puede calcular con precisión el aumento de temperatura y el desplazamiento de los conductores durante un cortocircuito en sistemas de barras, también se encontró que el efecto de los soportes de las barras es notable en el cálculo del desplazamiento del conductor, se demuestra también que la temperatura en el conductor tiene un ligero efecto en el desplazamiento de este, finalmente se encuentra que los resultados del modelado multifísico en campos magnéticos son bastantes diferentes a los obtenidos convencionalmente con una diferencia del 25%.

3. SIMULACIONES DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO EN TABLERO DE BAJA TENSIÓN A PARTIR MEF Y EL PROGRAMA SWITCHGEAR DESIGN

En este capítulo se analizan las fuerzas electromagnéticas de cortocircuito en las barras a través del método de elementos finitos, para este propósito se hizo uso del software Comsol®, estos valores se comparan con los valores de fuerzas calculados en el procedimiento descrito en la IEC 60865-1[8] y el programa computacional Switchgear Design, posteriormente se simularan los esfuerzos en los conductores y las fuerzas de flexión en los soportes de un barraje a través del software computacional Switchgear Design y también serán comparados con los cálculos propuesto por la misma norma.

Actualmente en la UNIVERSIDAD DEL VALLE se cuenta con un tablero eléctrico que resiste los esfuerzos transmitidos por las fuerzas generadas en condición de cortocircuito, la sección transversal de las barras conductoras se eligen en función de la corriente nominal, la separación de las fases se define de acuerdo a los requerimientos de aislamiento y la distancia entre apoyos por cada fase se elige en función de la corriente de cortocircuito [25], Las barras son de cobre y su disposición es similar a la mostrada en la figura 19 (a).

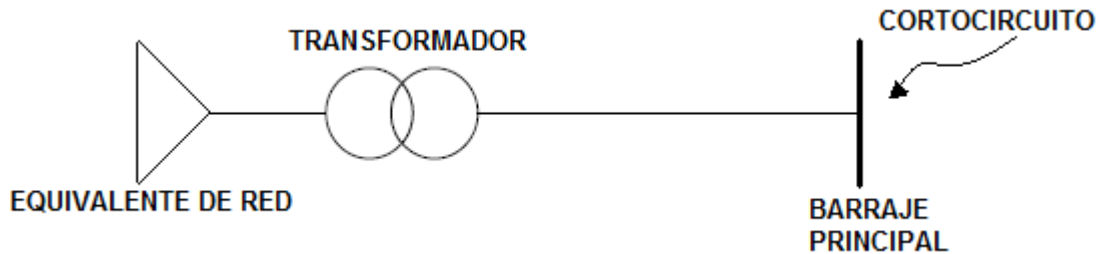
La Tabla 9 presenta Los parámetros que se deben tener en cuenta para las simulaciones.

Tabla 9. Parámetros simulaciones esfuerzos de cortocircuito tablero Universidad del Valle.

Número de conductores por fase	1
Ancho conductor b	19.05 mm
Alto conductor d	4.76 mm
Material	Cobre electrolítico 99.9% pureza
Frecuencia f	60 Hz
Corriente pico de cortocircuito I_{PK}	10000 A
Distancia entre centros	132 mm
Distancia entre soporte adyacentes	210 mm
Módulo de Young	110000 N/mm^2
Resistencia a la tracción $R_{p0.2}$	200-250 N/mm^2
Peso por unidad de longitud m'_m	0.808 Kg/m

En la Figura 20 se muestra el diagrama unifilar para la prueba de cortocircuito en un juego de barras, básicamente consiste de un transformador como fuente de alimentación, en el lado de baja tensión se posicionan las barras donde ocurre el cortocircuito.

Figura 20. Diagrama unifilar para prueba de cortocircuito en el barraje principal de un tablero de baja tensión



3.1 SIMULACIONES DE ESFUERZOS ELECTRODINAMICOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHISYCS

Los parámetros a analizar en Comsol serán:

- Tipo de estudio (Dinamico-Estatico)
- Tipo de Mallado
- disposición del sistema de barras (separación, número de barras por fase, disposición de barras, geometría del conductor).
- función de la corriente de cortocircuito

El modulo AC/DC permite modelar campos electromagnéticos y ondas en el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y estado estacionario, en particular se utiliza el apartado de campos magnéticos, basándose en la solución de casos en el dominio del tiempo sujeto a ciertas condiciones iniciales y condiciones de frontera tales como el potencial magnético cero, aislamiento, etc.

La **Figura 19** mostrada anteriormente se aprecia los arreglos de barras que se consideran para los cálculos numéricos básicos. En la realización de las simulaciones se tendrá en cuenta que la falla es un cortocircuito trifásico, la distancia entre centros de las barras es mucho menor que la longitud del conductor por lo tanto la longitud de las barras es asumida como infinita, la permeabilidad magnética relativa del conductor es 1, la corriente aplicada a las barras es sinusoidal desplazadas 120° y su valor máximo coincide con el valor pico de la corriente de cortocircuito.

3.1.1 Construcción de la geometría y parámetros de la simulación.

El modelado de la geometría consiste de tres rectángulos que representan las barras de cobre, la separación entre centros es 0,132 m, la frontera del dominio de la simulación se escoge como un círculo con un radio igual a 3 veces la distancia de las fases, en la Figura 21 se muestra la geometría, y en la Figura 22 la región de la simulación.

Figura 21. Geometría del sistema de barras trifásicas para la simulación.

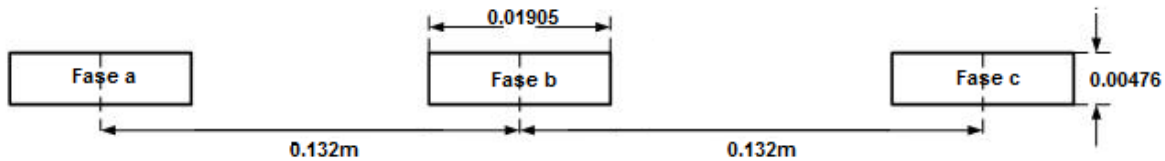
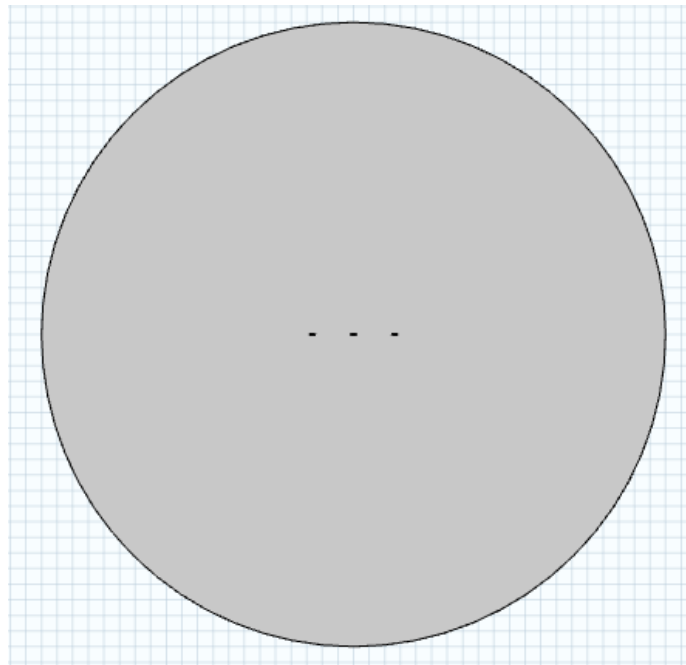


Figura 22. Región de la simulación para el sistema de barras.



La región alrededor de las barras se define como aire mientras que las barras son especificadas por las densidades de corriente que se muestran en la Tabla 10, las simulaciones se realizaron en el dominio del tiempo para analizar el comportamiento de las fuerzas en diversos instantes.

Tabla 10. Densidad de corriente para cada fase en el sistema de barras.

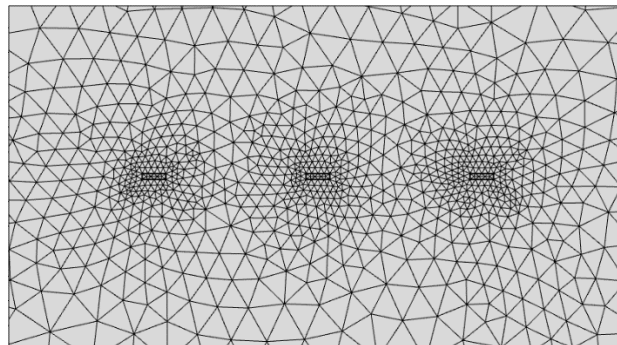
Densidad de corriente externa		Vector	Unidad
J_e Fase R	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$	z	
J_e Fase S	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{3})$	z	
J_e Fase T	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{3})$	z	

La densidad de corriente se calcula para un valor de corriente de 10 kA, ya que fue el valor de corriente obtenido en las pruebas, El valor de f es la frecuencia de oscilación de la red y t es el tiempo.

3.1.2 Condiciones de frontera y Construcción del mallado.

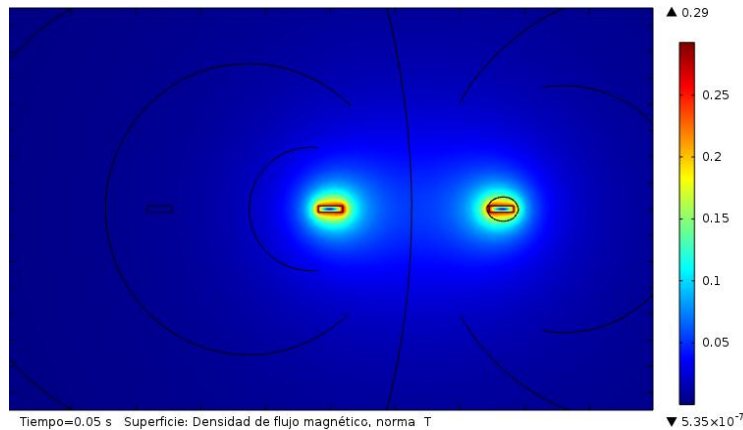
La condición de frontera predeterminada para campo magnético se define como componente tangencial del potencial magnético igual a cero. El mallado se construye a través del generador de malla automático con un tamaño de elemento fino, en la Figura 23 se muestra el mallado para el cual se tienen 2856 elementos triangulares, en la zona cercana a las barras el mallado es más denso ya que corresponde a la zona de interés.

Figura 23. Mallado de Simulación temporal.



El tiempo de simulación se seleccionó aleatoriamente como 5ms, en la Figura 24 se muestra la densidad de flujo magnético para el instante $t=0.05s$.

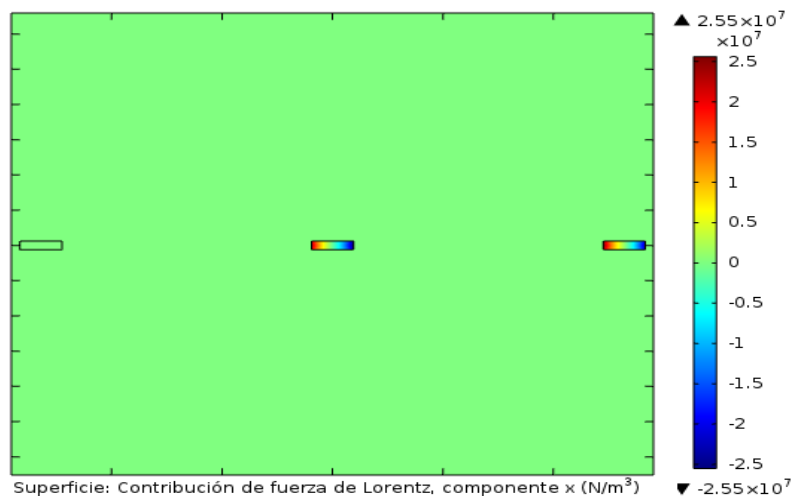
Figura 24. Densidad de flujo magnético para $t=0.05s$ obtenida a través del MEF.



3.1.3 Contribución de las fuerzas de Lorentz.

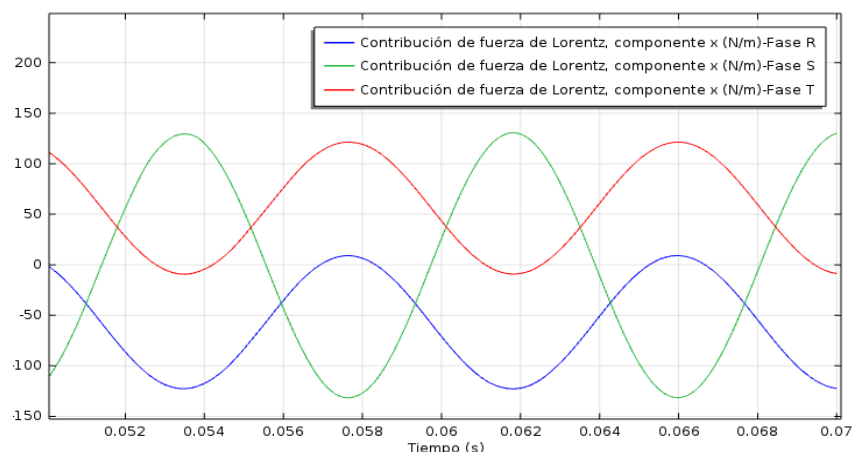
A partir de la densidad de flujo magnético se puede observar la contribución de la fuerza de Lorentz, es decir la densidad de fuerzas generadas por la interacción de los campos magnéticos y la corriente en las barras (ver Figura 25).

Figura 25. Contribución de fuerza de Lorentz, Componente en X (N/m^3) en $t=0.05$, Simulación temporal.



La fuerza total en las barras está determinada por la integral de superficie sobre la barra para la cual se desea calcular, el software calcula el total de la fuerza por unidad de longitud del conductor como la contribución de fuerza de Lorentz, para este arreglo la fuerza en el eje x es mucho más significativa, mientras que la fuerza en el eje “y” es despreciable. En la Figura 26 se muestran los resultados para las fuerzas que se presentan en las barras durante un periodo de 70 ms, el valor máximo se alcanza en la fase central llegando aproximadamente a 130 N/m.

Figura 26. Simulación Máximo de fuerzas electrodinámicas-temporal.



En los resultados del método de elementos finitos se observa que la barra central sufre mayor estrés que las barras laterales, estos resultados se comparan a continuación con los resultados obtenidos a través del procedimiento de la norma IEC 60865-1 de 2011 expuesto en el apartado 2.5 (ver Tabla 11), la máxima diferencia entre estos valores es de 1,23%.

Tabla 11 Comparación de resultados en simulación temporal a partir de IEC 60865-1 y MEF

Fase	Fuerza a partir de MEF (N/m)	Fuerza a partir de IEC (N/m)	Error %
R	122,6	122,4	0,14%
S	129,6	131,2	1,23%
T	121,35	122,4	0,88%

3.1.4 Simulación para distintos refinamientos en el mallado.

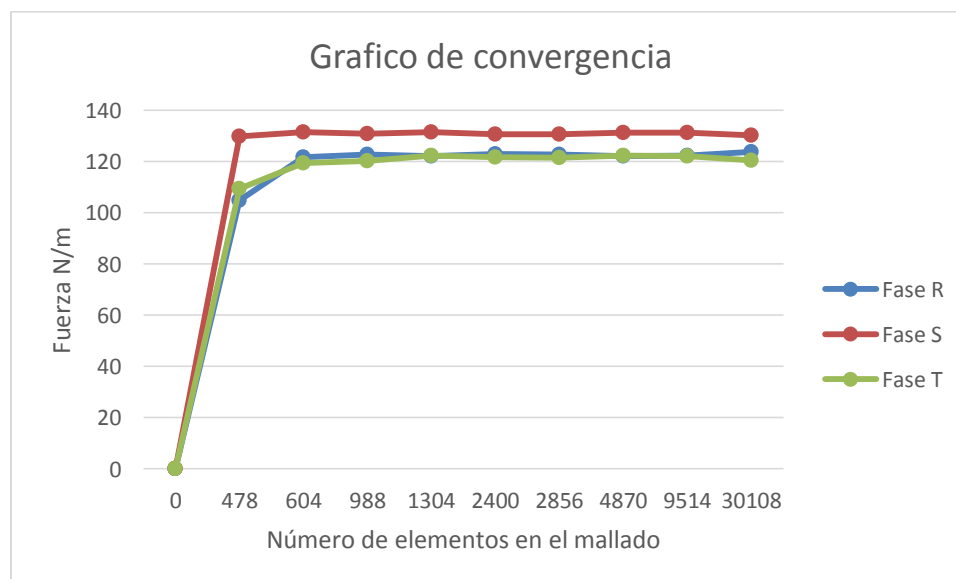
Se realizó un análisis de convergencia de la simulación en el cual se evaluó el efecto del número de elementos del mallado en los resultados, en la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para diferente mallados. Se aclara que la clasificación de la malla la realiza Comsol y se genera de manera automática.

Tabla 12. Resultado de simulación para diferentes números de elementos del mallado.

Malla	Número de elementos	Fuerzas (N/m)		
		Fase a	Fase b	Fase c
Extremadamente gruesa	478	104,71	129,74	109,4
Extra gruesa	604	121,7	131,379	119,449
Más gruesa	988	122,715	130,7943	120,11
gruesa	1304	121,992	131,386	122,236
Normal	2400	122,901	130,674	121,668
fina	2856	122,728	130,692	121,394
Más fina	4870	121,994	131,31	122,244
Extra fina	9514	122,235	131,164	122,07
Extremadamente fina	30108	123,792	130,256	120,393

A menor número de elementos en el mallado el resultado se aleja del dato obtenido a través de la norma IEC 60865, con los datos del análisis de convergencia se construye el grafico de la Figura 27. Cabe resaltar que el mallado se genera de manera automática dependiente del tipo de estudio en el que se está trabajando.

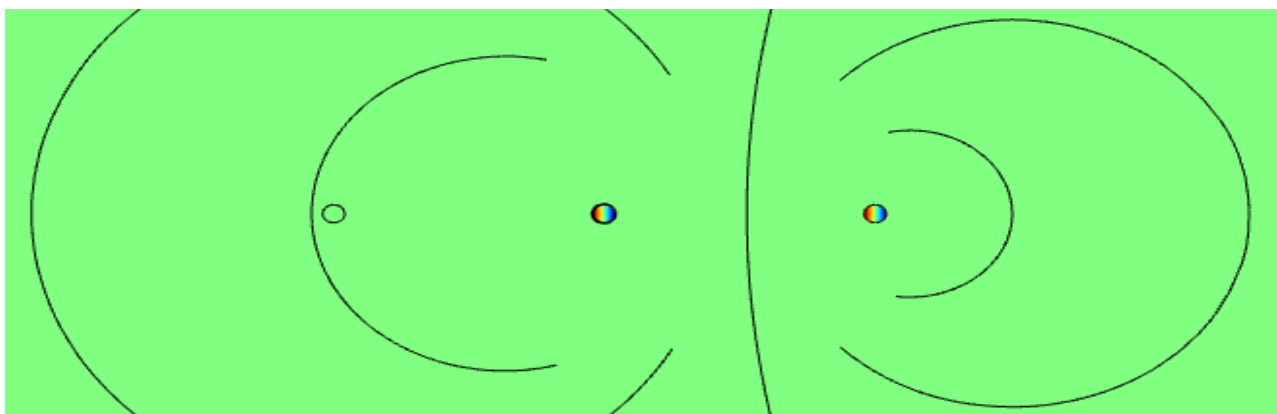
Figura 27. Grafica de convergencia para los diferentes mallados



3.1.5 Simulación con conductores circulares en el sistema de barras.

Se modificó la geometría de las barras conservando el área de la sección transversal (ver Figura 28), para evaluar el efecto de la geometría de las barras en las fuerzas, para esta simulación es utilizado un mallado fino que consta de 6200 elementos.

Figura 28. Geometría de simulación con barras circulares.



Los resultados obtenidos a partir de la simulación con conductores circulares se Muestran en la Tabla 13, siendo mínimas las diferencias comparado con las fuerzas en conductores rectangulares.

Tabla 13. Resultados estáticos de valores máximos y mínimos de fuerza

Mínimo: Componente x Fase R (N/m)	Máximo: Componente x Fase S (N/m)	Máximo: Componente x Fase T (N/m)
121.7284	130.6821	121.6754

3.1.6 Simulación para onda de corriente con atenuación exponencial.

para las simulaciones anteriores se utilizaron ondas sinusoidales cuya amplitud era el pico de corriente de cortocircuito y la cuales se encontraban desfasadas 120 grados entre cada fase, debido a que las corrientes de falla no son completamente sinusoidales sino que presentan un pico asimétrico en los primeros ciclos, se realizaron simulaciones considerando el efecto de la asimetría en las ondas de corriente de cortocircuito, en la Tabla 14 se muestran los valores de densidad de corriente por fase asignados [26], el número de elementos en la malla es de 2138 mallado automático fino.

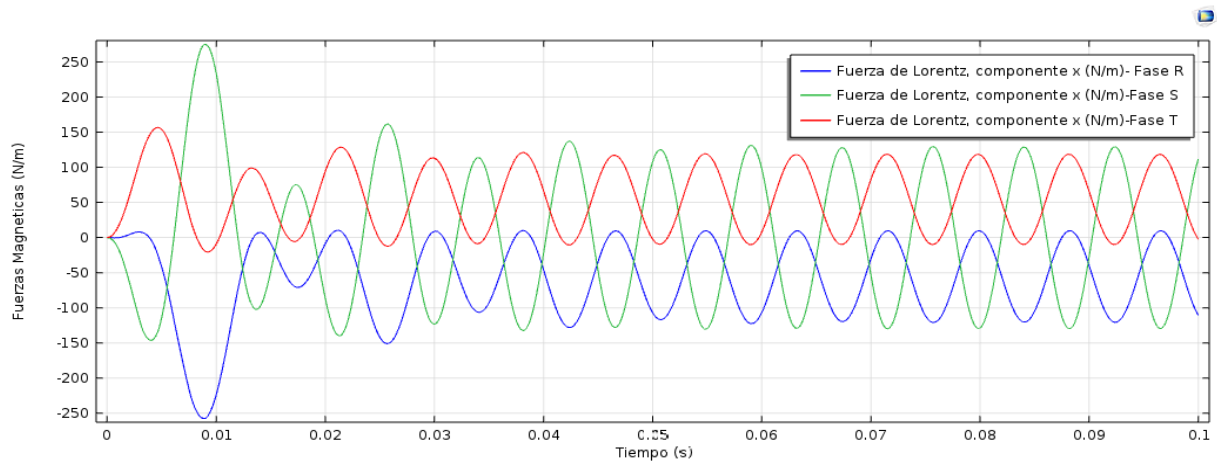
Tabla 14. Densidad de corriente considerando efecto de asimetría

Densidad de corriente externa		Vector	Unidad
J_e Fase R	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi * f * t + \alpha - \gamma) - 110280332.6 e^{\frac{-t}{\tau}} \text{sen}(\alpha - \gamma)$	z	
J_e Fase S	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi * f * t + \alpha - \gamma - 120) - 110280332.6 e^{\frac{-t}{\tau}} \text{sen}(\alpha - \gamma - 120)$	z	
J_e Fase T	0	x	$\frac{A}{m^2}$
	0	y	
	$110280332.6 \text{Sen}(2\pi * f * t + \alpha - \gamma + 120) - 110280332.6 e^{\frac{-t}{\tau}} \text{sen}(\alpha - \gamma + 120)$	z	

Para $\tau = \frac{L}{R}$, $\gamma = \tan^{-1}(\frac{\omega L}{R})$, $\alpha = \gamma - \frac{\pi}{2}$ donde el valor de R y L corresponden al valor de resistencia e inductancia de las barras conductoras.

En las Figura 29 se presenta el comportamiento de las fuerzas para este caso, como se observa el pico de fuerzas que aparece al iniciar el corto está asociado al incremento de la corriente en los primeros ciclos, las fuerzas en las fases laterales son prácticamente unidireccionales, mientras que en la fase central se obtienen valores positivos y negativos de fuerzas

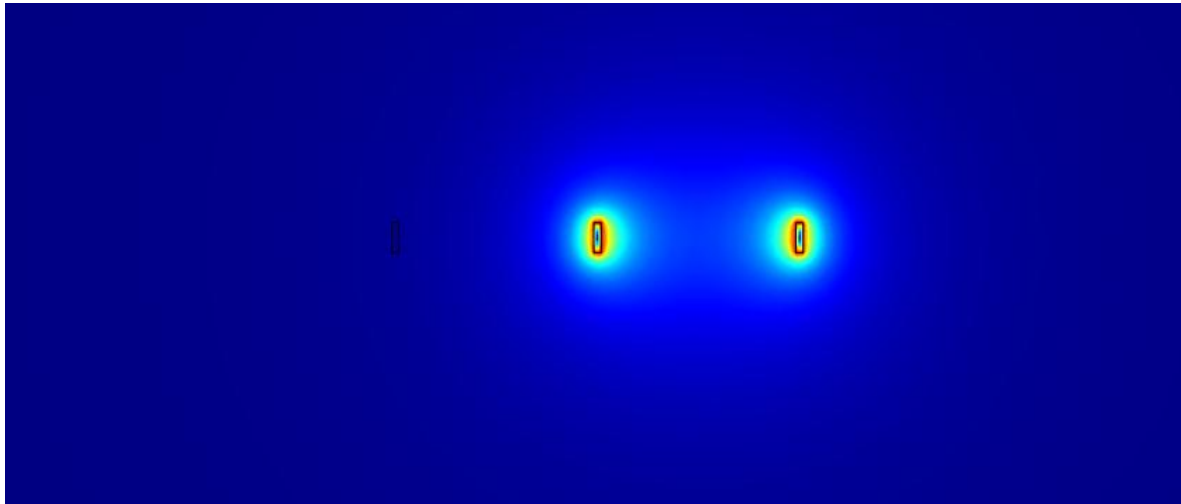
Figura 29. Resultado de fuerzas utilizando onda de corriente de cortocircuito exponencial



3.1.7 Simulación con conductores en posición vertical.

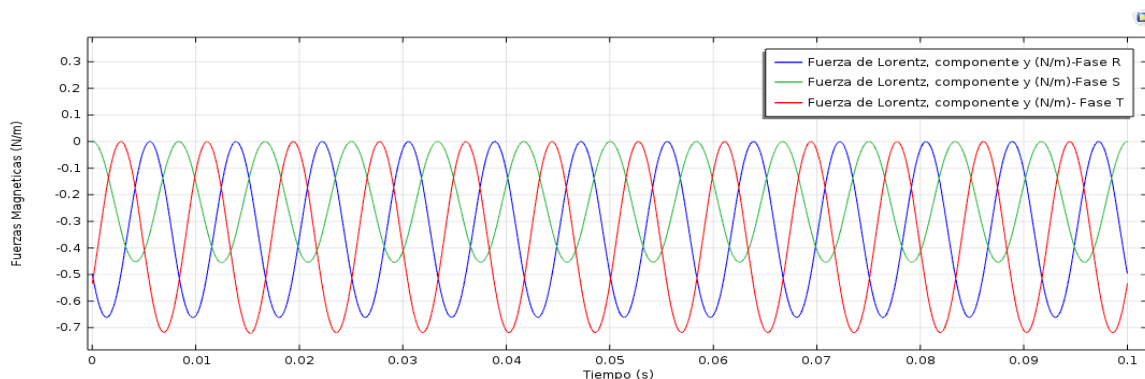
Para esta simulación se siguen utilizando las mismas dimensiones en la geometría de las barras de las simulaciones anteriores, ver Figura 30. Para esta geometría fueron necesarios 2614 elementos triangulares en el mallado (Fino).

Figura 30. Arreglo de barras en posición vertical



El valor de las fuerzas no cambia con respecto a la configuración de barras horizontales debido a que la distancia entre centros es la misma, contrario a lo que se muestra en el trabajo de Farhanna [20], trabajo en el cual concluyen que en el arreglo vertical aparecen el doble de fuerzas que en el arreglo horizontal, esto es debido a que la distancia entre centros para el arreglo horizontal es mucho mayor. En esta configuración se aprovecha para mostrar que los valores de fuerzas en el eje “Y” son muy pequeñas comparadas con las obtenidas en el eje “X” (ver Figura 31).

Figura 31. Contribución de fuerzas en el eje “Y” para arreglo de barras vertical



En la Tabla 15 se muestran los valores obtenidos con el arreglo horizontal y vertical

Tabla 15. Valores de fuerzas para arreglos de barras horizontal y vertical

Fase	Fuerzas (N/m)	
	Posición horizontal	Posición vertical
R	121,7284	121,7284
S	130,6821	130,6821
T	121,6754	121,6754

De esta simulación podemos concluir que la fuerza depende fuertemente de la distancia entre centros de barras.

3.1.8 Simulación con conductores circulares formando triángulo equilátero.

se realizaron simulaciones para analizar el caso de arreglo en triángulo de los conductores, para la simulación que se muestra en la Figura 32 se utilizan conductores circulares, para que la geometría sea simétrica la distancia entre cada uno de los conductores es de 0.132m, se utilizaron 4432 elementos triangulares (fina), los resultados de fuerzas en “x” y “y” se observan en la Figura 33 y Figura 34 respectivamente.

Figura 32. Geometría para arreglo de barras circulares en triángulo equilátero

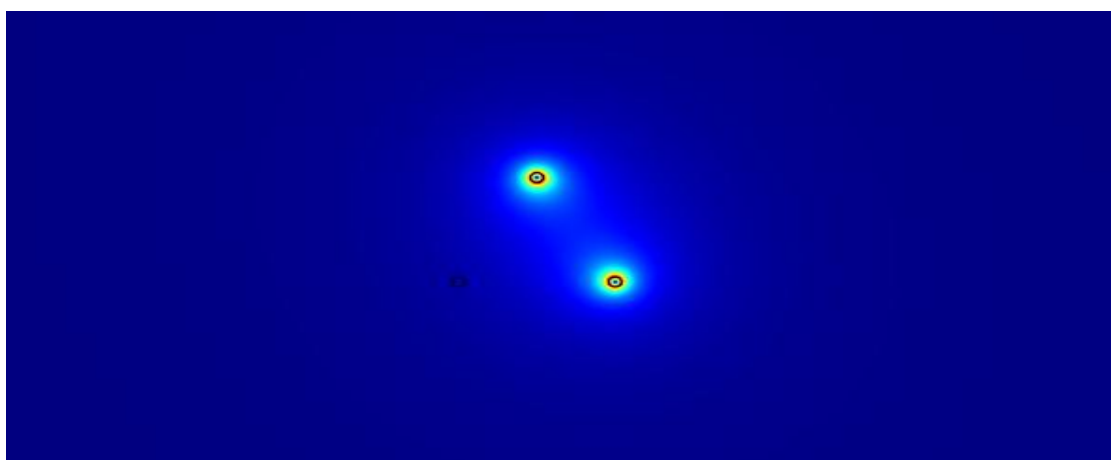
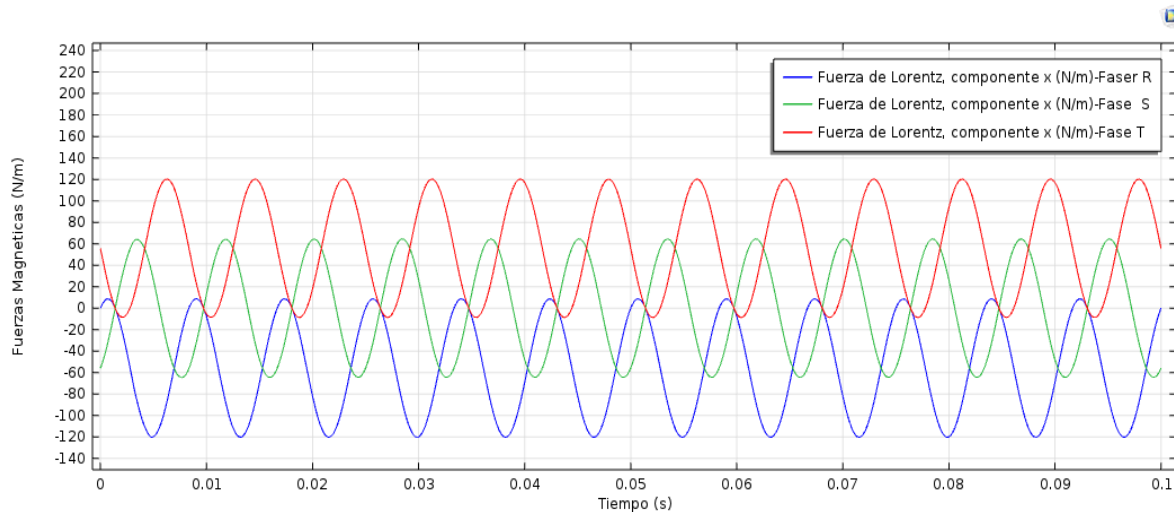
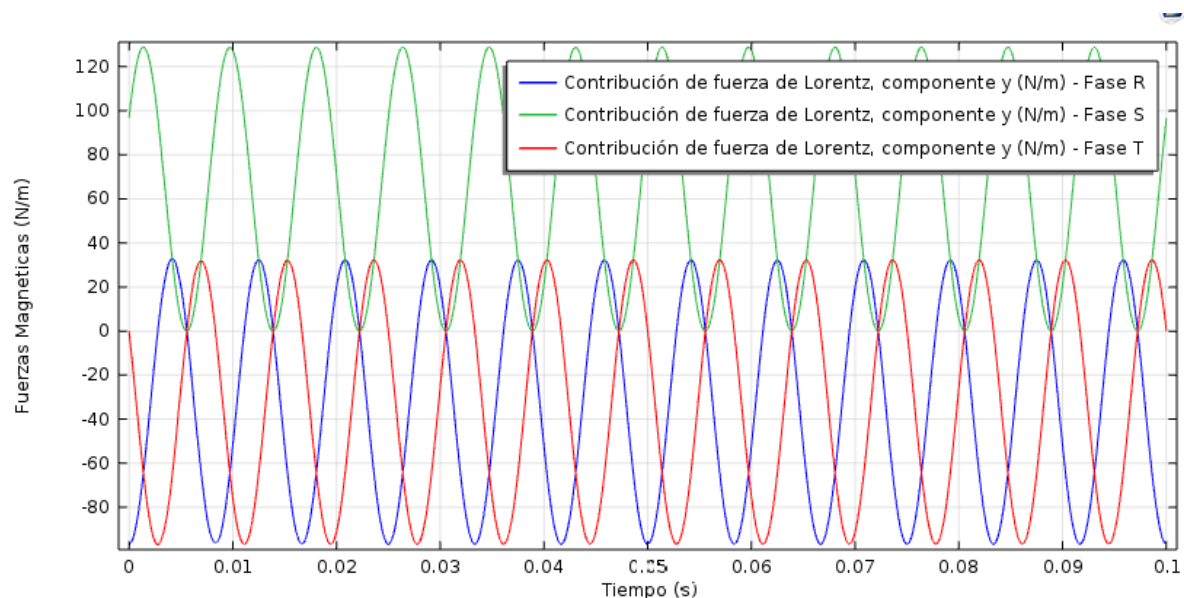


Figura 33. Fuerzas Magnética en el eje X para simulación de conductores circulares en triángulo equilátero.



Debido al posicionamiento de las barras se muestra en la figura 33 que el componente de fuerza en “Y” no es despreciables, como en el caso de arreglos de conductores en un solo plano.

Figura 34. Fuerzas Magnética en el eje Y para simulación de conductores circulares en triángulo equilátero



La contribución de fuerzas en el eje y en la fase central son mayores a la contribución de fuerzas en el eje x, mientras que en las fases laterales son menores; la contribución de fuerzas en el eje x son iguales para las tres fases mientras que en el eje y en la fase central es mayor con respecto a las fases laterales.

3.1.9 Simulación para tres conductores rectangulares por fase.

Para este caso se utiliza una corriente de cortocircuito de 10000A Por cada fase, es decir que por cada barra pasa una tercera parte de esa corriente. En el mallado son necesarios 3586 elementos triangulares (Fina), se utiliza la geometría del apartado 3.1.5 y adicionalmente son agregadas las barras de cada fase a una distancia de 0.007 m (ver Figura 35); los resultados son aproximadamente iguales a los obtenidos en la simulación del apartado 3.1.3. (Ver Figura 36).

Figura 35. Geometría para simulación de tres conductores rectangulares por fase

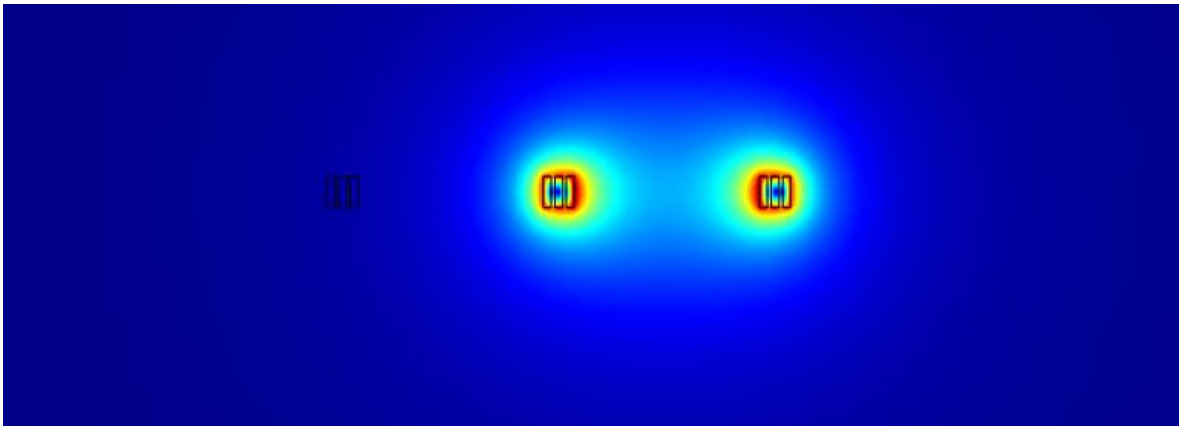
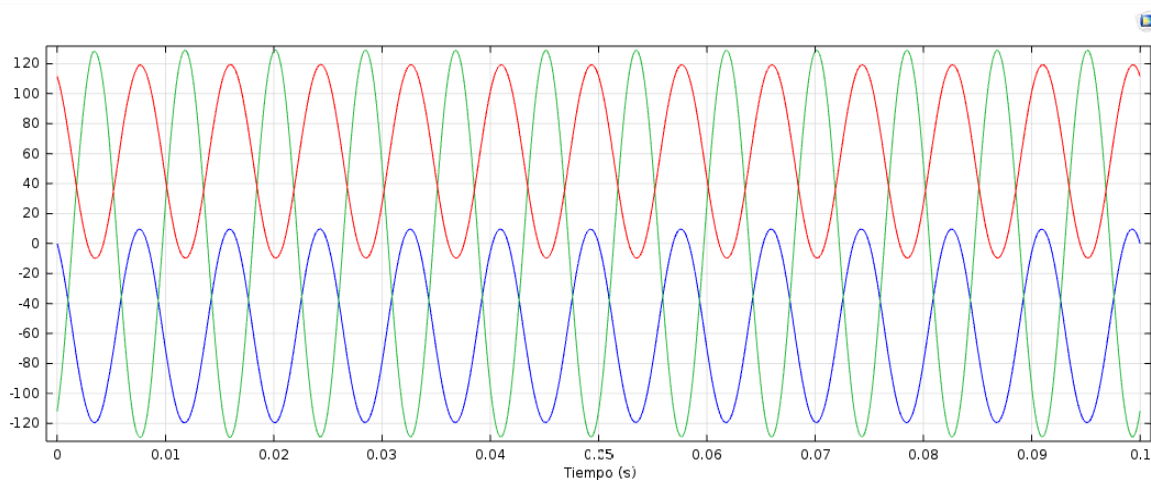


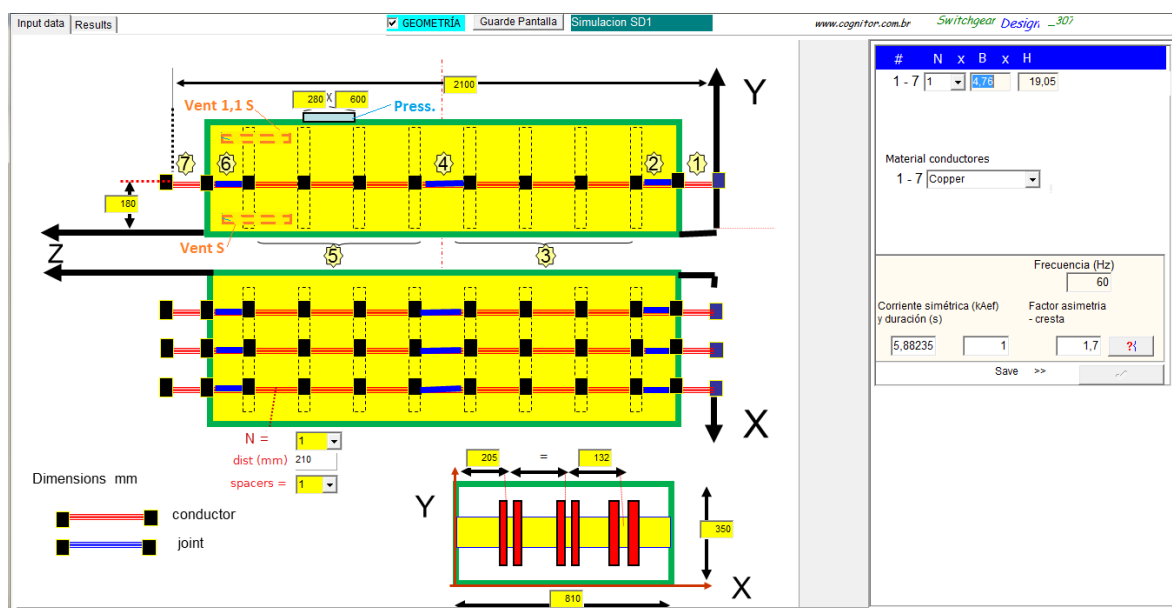
Figura 36. Fuerza total para tres conductores por fase



3.2 SIMULACIONES DE ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SWITCHGEAR DESIGN

El caso base presentado en el apartado 3.1.3 se simula utilizando el software Switchgear Design, para este propósito se seleccionó la librería Duct_1, que corresponde a un arreglo de barras dispuestas horizontalmente, las dimensiones de las barras, la cantidad de barras por fase, la frecuencia a la cual se realiza la prueba, la corriente asimétrica y simétrica de cortocircuito y el material de las barras, se ajustó para este caso, se observa el modelo del caso base en el programa Switchgear Design (ver Figura 37).

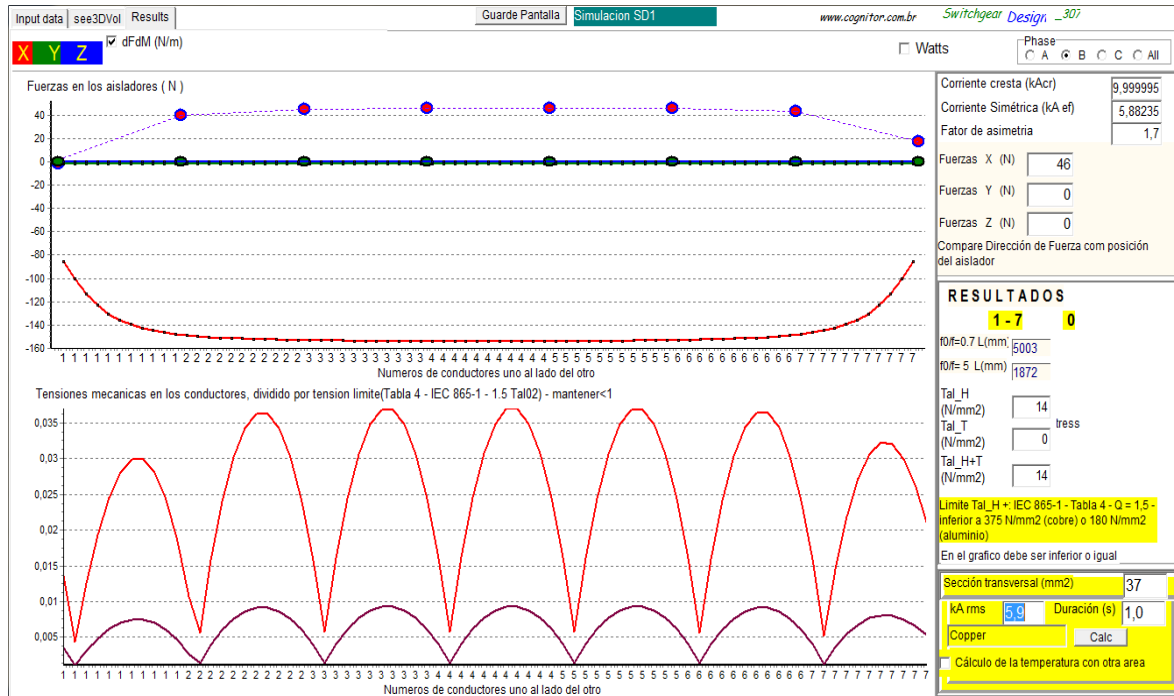
Figura 37. Parámetros simulación en Switchgear Design



Es importante resaltar que este programa calcula la fuerza de origen magnético sobre la barra central, la fuerza de flexión en la barra y los esfuerzos de flexión en los soportes.

En la Figura 38 se puede observar el resultado para esta simulación, el valor de fuerza máxima sobre los soportes de la fase central es de 46N, el diferencial de fuerza sobre la distancia es de 148 N/m, y esfuerzos en barras de 14 N/m.m.^2

Figura 38. Resultados de simulación Switchgear Design para el caso base.



3.3 CALCULO DE ESFUERZOS SOBRE BARRAS Y SOPORTE DE LOS TABLERO A PARTIR DE LA NORMA IEC 60865-1

Los resultados de fuerzas magnéticas en conductores obtenidos a través del método de elementos finitos y las simulaciones en Switchgear Design para el cálculo de esfuerzos en barras y fuerzas en los soportes se comparan con las fuerzas calculadas a partir de los procedimientos descritos en la norma IEC 60865-1.

3.3.1 Calculo de fuerza magnética en barras

Para calcular la fuerza magnética en un barraje trifásico que se encuentra en cortocircuito la norma IEC propone el procedimiento descrito en el apartado 2.5, para el caso de estudio se hace uso de la ecuación (17), obteniendo el resultado de fuerza magnética.

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} i_{pk}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi * 10^{-7}}{2\pi} * \frac{\sqrt{3}}{2} * 10000^2 * \frac{0.3}{0.132} = 39.3648 \quad (29)$$

Para el caso base la distancia efectiva entre soportes adyacentes es de 210 mm pero al ser la sección de la barra de 300 mm ese será el valor utilizado para l en la fórmula de cálculo de la fuerza.

3.3.2 Esfuerzo de flexión en conductor σ_m y fuerza de flexión en soportes F_d (Método simplificado).

Se definen los valores de la ecuación (23) como se muestra a continuación:

$V_{\sigma m}$ = relación entre la fuerza dinámica y estática entre los soportes (Se obtiene a partir de la tabla 4).

V_{rm} = relación de esfuerzo dinámico (fuerzas sobre los soportes, la contribución del esfuerzo de flexión conductor principal) causada por las fuerzas entre los principales conductores de reenganche trifásico automático sin éxito y la tensión dinámica del re cierre automático con éxito. (Se obtiene a partir de la tabla 4).

β = factor de esfuerzo en conductores principales (Se obtiene a partir de la tabla 5)

F_m = Fuerza magnética obtenida a partir del método de elementos finitos (fase S).

l = Distancia entre soportes adyacentes

W_m = módulo de sección en conductores principales = $\frac{J}{d/2}$

J_m = Momento de inercia

En la ecuación (39) se presenta el cálculo del esfuerzo de flexión para el caso base.

$$\sigma_m * V_{rm} * \beta * \frac{F_m * l}{8 * W_m} = 1 * 1 * 0.5 * \frac{39.3648 * 0.3}{8 * 7.19 * 10^{-8}} = 10265507.6495 \frac{N}{m^2} \quad (30)$$

$$5507 \text{ N/m.m.}^2$$

Se considera que la barra conductora soporta los esfuerzos si:

$$\sigma_{total} \leq q * R_{p0.2} \quad (31)$$

Donde “q” es el factor de plasticidad (toma el valor de 1.5 para secciones rectangulares) y se obtiene a partir de la tabla 4 de la norma IEC 60865-1, $R_{p0.2}$ es la resistencia a la tracción la cual es propiedad del material (cobre).

La fuerza de flexión en los soportes se calcula a partir de la expresión 25 en donde $V_f * V_r = 2.7$ según la tabla 4, α se toma a partir de la tabla 5 y $F_m = 39.3648$ como se calcula en la expresión 29.

$$F_{r,d} = V_f * V_{rm} * \alpha * F_m = 2.7 * 0.5 * 39.3648 = 53.1425 \text{ N} \quad (32)$$

3.3.3 Esfuerzo de flexión en conductor σ_m y fuerza de flexión en soportes F_d (Método detallado).

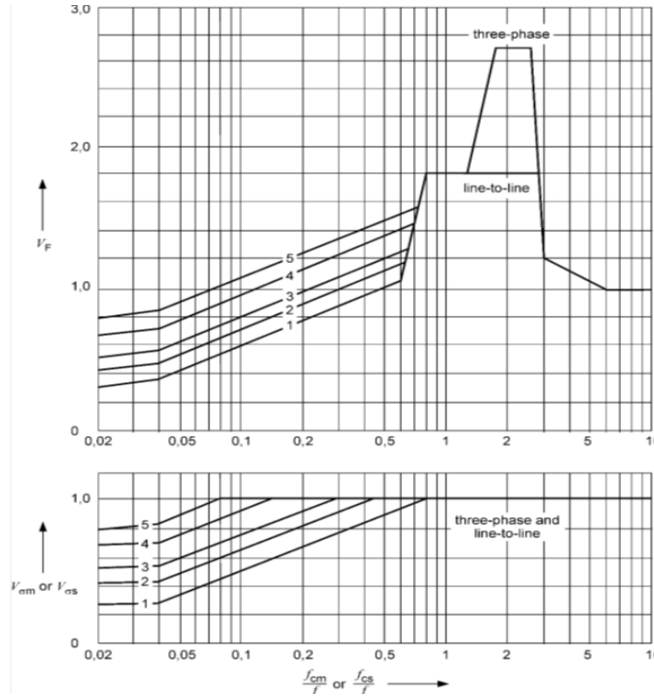
Las ecuaciones (23) y (24) contienen factores que tienen en cuenta la oscilación de las fuerzas, los límites superiores de estos factores se dan en la tabla 4, si se tiene en cuenta este apartado se encontrarán valores más pequeños para esos factores, para ello es necesario calcular la frecuencia natural (frecuencia característica) F_{cm} como se muestra en la ecuación 33.

$$F_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} * \sqrt{\frac{E * J_m}{m'_m}} = \frac{1.57}{0.21^2} * \sqrt{\frac{7 * 10^{10} * 2.72 * 10^{-9}}{0.808}} = 267.784 \text{ Hz} \quad (33)$$

Donde γ es constante que se toma de la Tabla 5, l es la distancia entre soportes adyacentes, E es el módulo de Young, J_m es el segundo momento de inercia y m'_m es el peso por unidad de longitud de las barras.

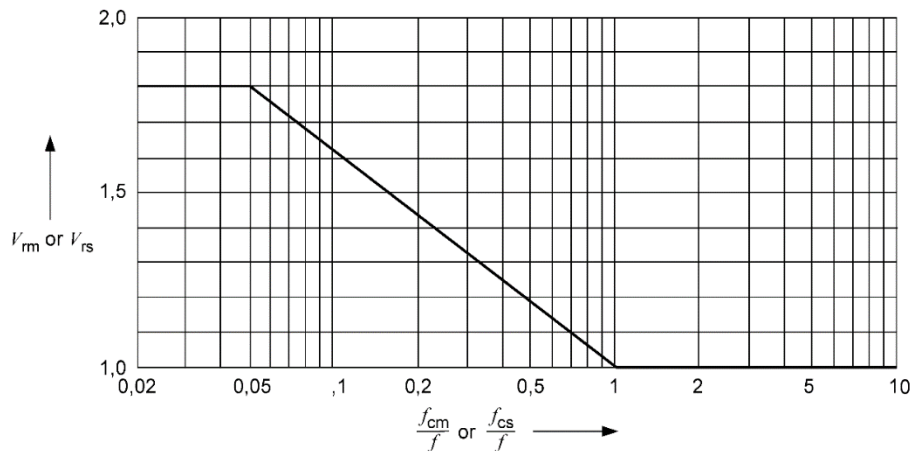
La relación entre la frecuencia natural y la frecuencia del sistema es de 11.41, teniendo en cuenta esa relación y las Figura 39 y Figura 40 es posible estimar los valores de V_F , $V_{\sigma m}$ y V_{rm} .

Figura 39. Valores de V_F , $V_{\sigma m}$ para la relación de frecuencias



Fuente: Tomado de la norma IEC 60865-1 2011

Figura 40. Valores de V_{rm} para la relación de frecuencias



Fuente: Tomado de la norma IEC 60865-1 2011

Para lo cual se tiene que $V_F = 1.1$, $V_{rm} = 1$, $V_{\sigma m} = 1$.

Reemplazando estos valores en las ecuaciones 30 y 32 obtendremos los siguientes resultados para el esfuerzo en barras y fuerzas en soportes.

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} * V_{rm} * \beta * \frac{F_m * l}{8 * W_m} = 1 * 1 * 0.5 * \frac{39.3648 * 0.3}{8 * 7.19 * 10^{-8}} = 10265507.6495 \frac{N}{m^2}$$

$$= 10.265507 \text{ N/m.m.}^2$$

$$F_{r,d} = V_f * V_{rm} * \alpha * F_m = 1.1 * 1 * 0.5 * 39.3648 = 21.65 \text{ N}$$

3.3.4 Comparación de resultados de los programas computacionales con la norma IEC 60865-1

En la Tabla 16 se muestra la comparación entre los resultados en Comsol y la norma.

Tabla 16. Comparación Resultados Comsol y la norma IEC 60865-1 en el cálculo de máximo de fuerza electromagnética de cortocircuito.

fase	Fuerzas magnéticas en barrajes Comsol (N/m)	IEC 60865-1 (N/m)	Diferencia %
R	122,6	122.426	0,14%
S	129,6	131.216	1,23%
T	121,35	122.426	0,88%

Comsol proporciona un valor aproximado de fuerza sobre unidad de longitud aproximadamente de 129.6 N/m para la fase S con una diferencia en comparación a la norma de 1.23%

En la Tabla 17 Se presenta los resultados de esfuerzo en conductor y la fuerza en los soportes para el programa Switchgear Design y la norma.

Tabla 17 Comparación de esfuerzo de flexión en conductor y fuerzas de flexión en soportes

	Switchgear Design	IEC 60865-1	Diferencia%
Esfuerzo en conductor en la fase central ($N/m, m.^2$)	14	10.27	36.32
Fuerza en soportes (N)	46	53.14	13.4362

Switchgear Design muestra diferencias bastantes significativas en el cálculo de esfuerzo de conductores y fuerzas en soportes para valores de corriente pico menores a 15kA en comparación con los resultados obtenidos con la norma IEC 60865-1, también se simuló el ejemplo 1 presentado en la norma IEC 60865-2 para el cual el software mostro resultados mucho más cercanos.

El resultado de fuerza magnética en la fase b proporcionado por Switchgear Design es de 148 N/m aproximadamente (ver Figura 38), el valor proporcionado a través del método de elementos finitos en Comsol es de 129.6 N/m, presentándose una diferencia de 14.1975%.

Para el siguiente capítulo se comparan los resultados obtenidos en la prueba piloto con el software Switchgear Design para validar sus resultados.

4. REALIZACIÓN PRUEBA PILOTO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

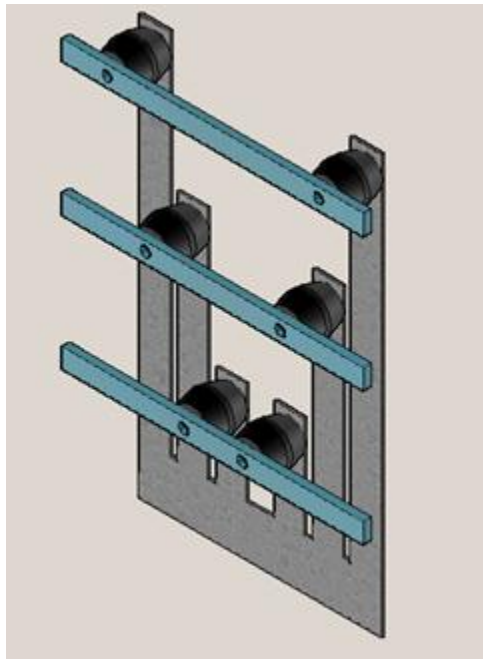
El objetivo principal de este capítulo es el de validar los resultados obtenidos en las simulaciones de COMSOL con los de pruebas piloto.

4.1 DISEÑO DEL TABLERO

Para las pruebas se utilizó un dispositivo para la medición de esfuerzos electrodinámicos [27], el dispositivo es lo más similar en geometría y funcionalidad a un tablero eléctrico comercial de tres fases. Las barras se ubicaron sobre un soporte base elaborado en una platina de 2.5 mm de grosor y 30 mm de ancho en el cual estaba ensamblado cada aislador eléctrico, la distancia entre fases es de 132 mm, el largo de barraje es de 300 mm para cumplir los requerimientos de la fuerza mecánica, ver Figura 41.

Fue necesario que los aisladores se ensamblaran en un soporte metálico diferente, debido a que el dispositivo está orientado a medir la fuerza mecánica que actúa sobre los aisladores eléctricos que se sujetan a las fases del barraje.

Figura 41. Dispositivo para medición de fuerzas electrodinámicas

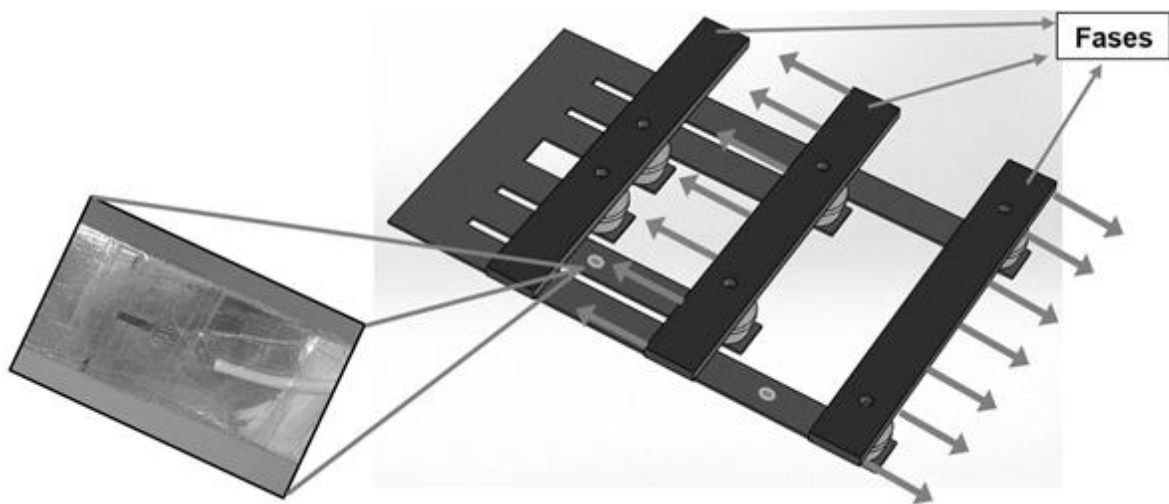


4.2 SISTEMA DE MEDIDA

El funcionamiento del dispositivo apoya en la medición de la deformación mecánica en los soportes, generada por los esfuerzos electrodinámicos que actúan durante el cortocircuito en las barras de cobre. Para la medición se emplearon galgas extensiométricas (strain gauges) blindadas para campo magnético, con el objeto de minimizar el efecto de inducción electromagnética dado el carácter transitorio del fenómeno de cortocircuito. Las galgas se ubicaron tal como se ve en la Figura 42.

Las galgas extensiométricas transforman el valor de la deformación en los soportes de los aisladores en una señal de tensión eléctrica la cual es leída por la tarjeta de adquisición de datos, los valores medidos se exportan a un archivo .csv y se procesaron en una hoja de cálculo para obtener el valor de las fuerzas en los soportes.

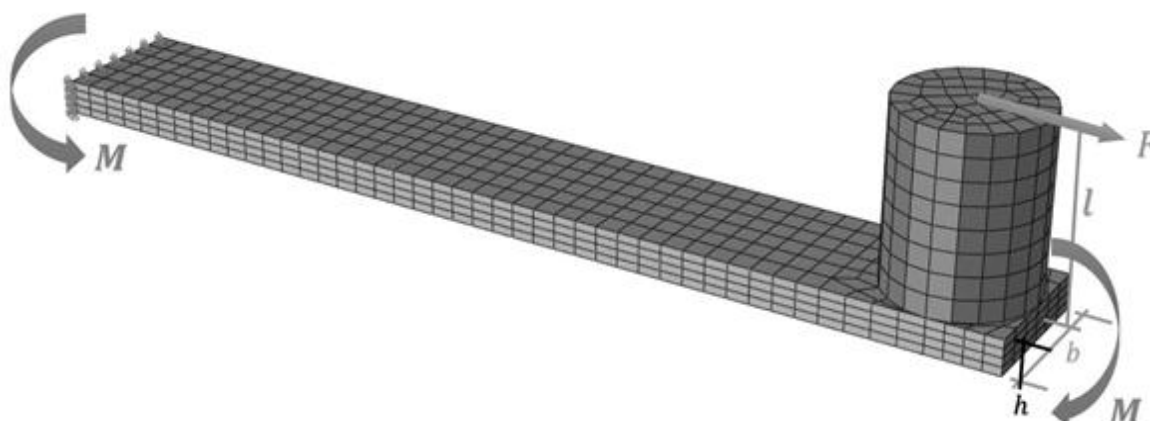
Figura 42. Galgas extensiométricas en el dispositivo y esfuerzos electrodinámicos sobre fases de cobre



Fuente: Imagen tomada de [27]

En la Figura 42 Se puede observar que la fase lateral está soportada por dos aisladores, por lo que cada aislador soporta la mitad de la fuerza mecánica, representada por los vectores de la Figura 43. La fuerza mecánica (F) que actúa sobre cada aislador en un instante de tiempo, genera flexión en la platina que lo soporta.

Figura 43. Diagrama de cuerpo libre del soporte de un aislador eléctrico en el dispositivo



Fuente: Imagen tomada de [27]

4.3 PRUEBAS

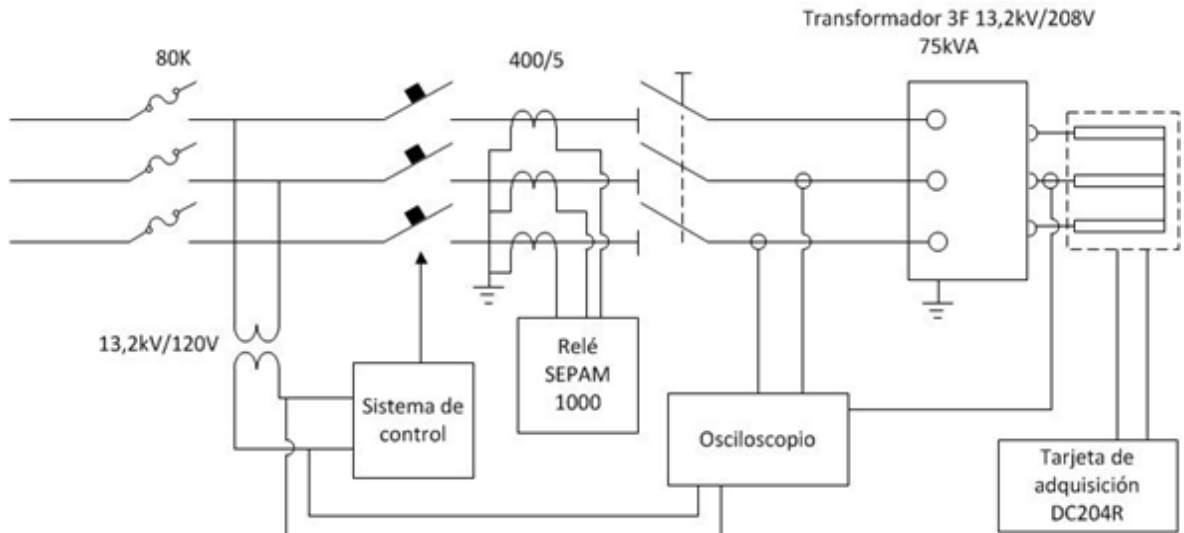
4.3.1 Pruebas estáticas.

Antes de realizar cualquier prueba de cortocircuito con el dispositivo, se verificó su funcionamiento con pruebas estáticas con masas calibradas de 2.76 kg y la medición de los esfuerzos mecánicos en los soportes. Las masas se colocaron en los aisladores tal como actuarían los esfuerzos electrodinámicos y se obtuvieron las magnitudes del esfuerzo mecánico. Los errores fueron menores al 3%.

4.3.2 Ensayos de cortocircuito.

En el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del valle, el dispositivo se conectó cortocircuitando el secundario de un transformador de distribución de 75 kVA energizado a tensión nominal, lo cual permitió la circulación de una corriente de 8.6 kA simétricos, en la Figura 44 se observa el esquemático para las pruebas de cortocircuito

Figura 44. Esquema del montaje para el cortocircuito

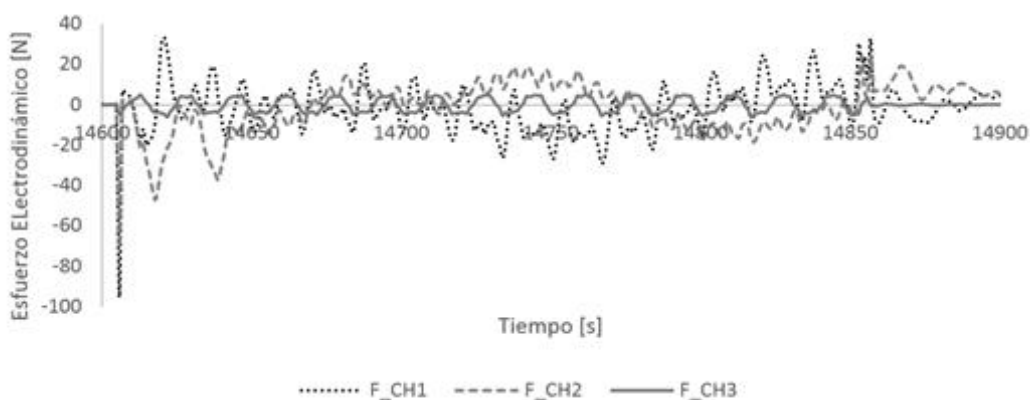


Fuente: Imagen tomada de [27]

Se utilizaron galgas blindadas para campo magnético TML MFLA-5-350-1LS y la tarjeta de adquisición de datos TML DC-204R, respectivamente. Para cerrar el puente de Wheatstone se utilizaron conectores de medio puente de referencia TML SB-120DD-1R. La entrada de la señal a la tarjeta de adquisición por parte de las galgas extensiométricas fue de la siguiente manera: Las galgas de la fase central en el canal 1, los de la fase lateral en el canal 2 y por el canal 3 entra una señal de una galga que se colocó superpuesta, mas no pegada, a la fase central con el fin tener una referencia de la inducción magnética en ese lugar. La tasa de muestreo de la tarjeta de adquisición se fijó a 1000 Hz. Las galgas y la tarjeta de adquisición de datos se conectaron a una tierra común.

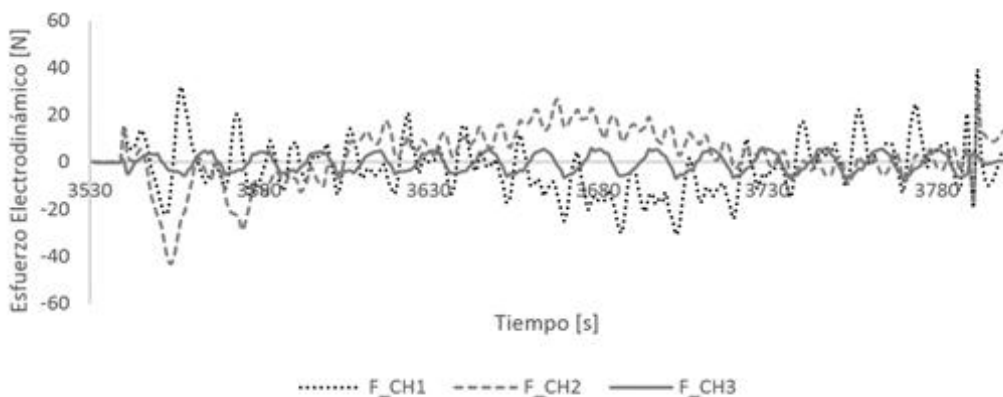
Se realizaron 4 pruebas de cortocircuito con una duración de 250 ms cada una, obteniéndose las corrientes indicadas en la Tabla 11. Las señales que se obtuvieron de la fuerza en cada fase para cada prueba, se presentan en las Figuras 45 a 48.

Figura 45. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 1.



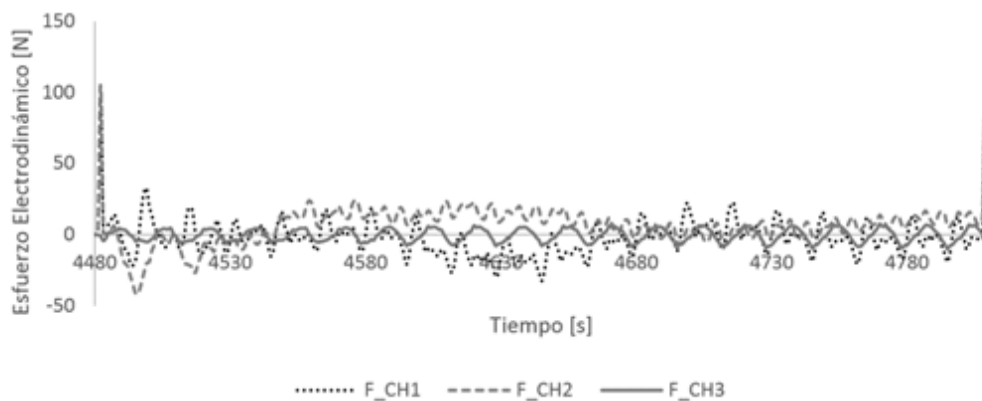
Fuente: Imagen tomada de [27]

Figura 46. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 2.



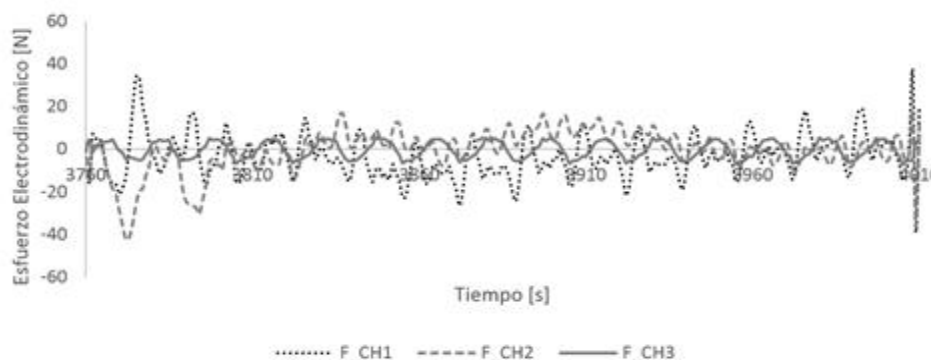
Fuente: Imagen tomada de [27]

Figura 47. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 3.



Fuente: Imagen tomada de [27]

Figura 48. Registro de la fuerza mecánica durante el periodo de cortocircuito para los 3 canales durante la prueba 4.



Fuente: Imagen tomada de [27]

En la Tabla 18 se muestra una comparación entre los resultados de la prueba, los obtenidos a partir del software Comsol Multiphysics y la norma IEC 60865-1.. La fuerza registrada con el canal 3 permitió conocer la acción de la inducción magnética en el valor del voltaje que es entregado a la tarjeta de adquisición en forma de ruido, el cual fue menor del 9% del valor máximo en todas las pruebas.

Tabla 18. Comparación resultados prueba piloto con IEC 60865-1 y COMSOL

Prueba	Corriente pico fase B (kA)	Corriente simétrica fase B (kA)	Fuerza en Fase S simulada COMSOL (N)	Fuerza en Conductores IEC 865-1	Fuerza Test (N)	Diferencia Test Vs. COMSOL	Diferencia test Vs. IEC	Diferencia IEC Vs. COMSOL
1	10,4	8,6	42	41	91,17	117%	55,08%	2.43%
2	9,8	8,6	37.83	38	37,67	0.4%	0,36%	0.44%
3	9,8	8,6	37.83	38	97,79	158%	61,34%	0.44%
4	10,4	8,6	42	41	39,09	6.9%	4,77%	2.43%

Los valores de fuerzas proporcionados en la tabla 18 se basan en los corrientes picos en la fase central en cada prueba.

Se evidenciaron grandes diferencias entre las fuerzas mecánicas de dos pruebas experimentales, lo cual posiblemente es debido a que no hay control sobre el punto de inicio de la onda de voltaje al momento de realizar el corto, lo que a su vez afecta la asimetría de la onda en el transitorio de la corriente de cortocircuito e influye en los valores de esfuerzos máximos registrados. Esto también fue una limitante en el experimento dado que solo se midió la corriente en las fases B del transformador, es posible que por alguna de las otras fases apareció una mayor corriente del transitorio a la registrada en la fase B.

Otra posible causa de las diferencias de las fuerzas mecánicas medidas en las pruebas podría ser un ruido inducido, ya que a pesar de que las galgas son blindadas contra campos magnéticos, hay una variación abrupta de la magnitud de campo magnético en el cual están inmersas las mismas, en cuyo caso sería ideal tener un control sobre la tasa de incremento de la corriente en las fases durante las pruebas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a través del método de elementos finitos en el cálculo de las fuerzas electromagnéticas en juegos de barras son bastante exactos, debido a que en comparación con el procedimiento descrito en la norma internacional IEC-60865-1 se encontró que los errores eran menores al 1.3%. Los resultados obtenidos en Switchgear Design para el cálculo de esfuerzos en barras y fuerzas en soportes solo son comparables con la norma IEC 60865-1, para ser posible su comparación con un programa de elementos finitos se deben hacer modelos más complejos donde incluyan fenómenos mecánicos.

El resultado de fuerza magnética en la fase b proporcionado por Switchgear Design es de 148 N/m aproximadamente (ver figura 38) frente al valor correspondiente a través del método de elementos finitos en Comsol de 129.6 N/m (ver figura 26), con una diferencia de 12.7975%, los valores en las simulaciones están dentro del rango permitido (menor al 15% en esfuerzos electrodinámicos[28]), además por ser mayor el valor de la fuerza obtenida en Switchgear Design sus resultados son conservativos.

Fue posible validar los resultados que se obtuvieron en algunos trabajos sobre esfuerzos en barras, donde mostraban la influencia de la geometría y la disposición del arreglo de las mismas; Se verificó que el valor de las fuerzas electromagnéticas en el conductor de la fase central es mayor en comparación con las fases laterales en un arreglo de tres barras rectangulares dispuestas en un mismo plano, esto debido a que la distancia entre centros es menor. En arreglos triangulares de conductores las fuerzas tanto en el eje X como en el eje Y resultan significativas, esto implica que los soportes estarán sometidos a esfuerzos de tracción-compresión y flexión simultáneamente durante una condición de cortocircuito.

Switchgear Design muestra errores significativos para valores de corriente pico menores a 15kA, se simularon los ejemplos que se describen en la norma IEC 60865-2 para el cual el software mostró resultados mucho más precisos. Se evidenció que la fase central es la que soporta la mayor fuerza magnética durante el cortocircuito lo cual se compara muy bien con la teoría y estudios anteriores de Canova (2009) y Yusop (2011). Sin embargo, en las pruebas experimentales el valor del pico máximo de fuerza magnética apareció indistintamente en la fase central o en la lateral, esto pudo deberse a la inducción de voltaje sobre las strain gauges generado por el campo magnético durante el cortocircuito. La metodología de la norma IEC 60865-1 resulta ser de vital aplicación para análisis de fuerzas y esfuerzos de barrajes trifásicos dispuestos en un mismo plano, en el caso de tener

otras disposiciones se debe optar por otro método como es el caso de Switchgear design o MEF.

TRABAJOS FUTUROS

La utilización del método de elementos finitos abre la posibilidad de realizar simulaciones más completas con acoples mecánicos, térmicos, eléctricos y magnéticos, además de un modelado en tres dimensiones que hace que los resultados se acerquen más a los reales. Switchgear Design viene con diseños de barras complejos que requieren un análisis más detallado.

Para trabajos futuros es posible verificar los otros módulos con los que viene el programa Switchgear Design como la prueba de calentamiento y la prueba de arco interno.

Se requieren realizar más pruebas experimentales para estudiar la variación de los resultados de las fuerzas medidas sobre el prototipo, se sugiere ubicar las galgas en inmediaciones a un equipo que genere altas corrientes para evaluar el efecto de las mismas en los resultados registrados por los sensores.

Bibliografía

- [1] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, *Anexo general del RETIE*. 2013, p. 211.
- [2] International Electrotechnical Commission, “IEC 61439-1 2011 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies,” 2011.
- [3] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, *Reglamento tecnico de instalaciones electricas*. 2013.
- [4] ABB, “Cuaderno de aplicaciones técnicas n.º 9 Guía para la construcción de un cuadro eléctrico de baja tensión conforme a las normas IEC 61439, Parte 1 y Parte 2,” *ABB Corporation*, pp. 1–81.
- [5] ABB, *ABB Switchgear Manual*. 2000.
- [6] I. E. Commission, “IEC -61641-2008 Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault,” vol. 3, 2014.
- [7] N.T.C., “Paneles de maniobra y de control de baja tension. Paneles tipo ensayado y tipo ensayado parcialmente,” *ICONTEC*.
- [8] International Electrotechnical Commission, *IEC 60865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods*, vol. 2005. 2011.
- [9] E. Electrocin, “Efectos eléctricos : Principio de Ampère Esfuerzos electrodinámicos,” 2009.
- [10] J. Sarrate and R. Clarisó, “El Método de Elementos Finitos en problemas electromagnéticos : planteamiento y aplicaciones,” *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 17, pp. 219–248, 2001.
- [11] R. M. Christy, J. R. Reitz, and R. W. Christy, *Fundamentos de la teoria electromagnetica*, Cuarta. 1996.
- [12] Z. Ren, “Different Force Calculation Methods in 3D Finite Element Modelling,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 5, pp. 3471–3474, 1994.
- [13] T. Kabashima and A. Kawahara, “Force calculation using magnetizing currents,” *IEEE*, vol. 24, no. 1, pp. 451–454, 1988.
- [14] G. Henneberger, P. K. Sattler, and D. Shen, “Nature of the

- equivalent magnetizing current for the force calculation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 2, pp. 1068–1071, 1992.
- [15] N. Sadowski, Y. Lefevre, M. Lajoie-Mazenc, and J. Bastos, “Sur le calcul des forces magnétiques,” *J. Phys. III*, pp. 859–870, 1992.
 - [16] Zeferino A. da Fonseca Lopes, *El Método de los Elementos Finitos: Una Introducción*. 2011.
 - [17] C. Inc., “<https://www.comsol.com/>.” .
 - [18] ADRIANA MENDOZA GUTIÉRREZ, “Introducción al uso del software COMSOL MULTIPHYSICS,” UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2013.
 - [19] International Electrotechnical Commission, “IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents,” vol. 0, 2001.
 - [20] F. M. Yusop, M. Kamarol, D. Ishak, and S. Masri, “Study on the Electromagnetic Force Affected by Short-Circuit Current in Vertical and Horizontal Arrangement of Busbar System,” *IEEE*, no. January 2016, 2011.
 - [21] D. P. Labridis and A. Assumpfions, “Electromagnetic Forces in Three-phase Rigid Busbars with Rectangular Cross-sections,” *IEEE*, vol. 11, no. 2, pp. 793–800, 1996.
 - [22] G. Bedrosian and J. Joseph, “Steady-State Loss and Short-circuit Force Analysis of a Three-phase Bus Using a Coupled Finite Element + Circuit Approach,” *IEEE*, vol. 14, no. 4, pp. 1485–1489, 1999.
 - [23] G. T. Dimitris, Petros S. Dokopoulos, and Dimitris P. Labridis, “Parametric Short-Circuit Force Analysis of Three-Phase Busbars—A Fully Automated Finite Element Approach,” *IEEE*, vol. 18, no. 2, pp. 531–537, 2003.
 - [24] A. Canova and L. Giaccone, “Systems Numerical and Analytical Modeling of Busbar Systems,” *IEEE*, no. April, p. 11, 2016.
 - [25] IEC Std, *60947-1 IEC low-voltage switchgear and controlgear – general rules*. .
 - [26] A. Engler, “Applicability of droops in low voltage grids,” *Int. J. Distrib. Energy Resour. Smart Grids*, no. 1, pp. 1–5, 2005.
 - [27] C. A. Díaz, G. Aponte, F. Casanova, A. F. Zúñiga, E. Marlés, E.

D. I. Mecánica, and V. Cali, "DISEÑO DE UN INNOVADOR DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS ELECTRODINÁMICOS QUE OCURREN DURANTE EL ENSAYO DE CORTOCIRCUITO EN TABLEROS ELÉCTRICOS," 2016.

[28] sergio feitoza Costa, "SFC Guide," 2012.

[29] Comsol Multiphysics, "User's Guide," *Comsol*, pp. 1–1292.

ANEXO 1

FORMATO PARA SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE SWITCHGEAR: PRUEBA DE CORTOCIRCUITO EN TABLEROS ELÉCTRICOS

1. Datos generales

Protocolo	
Fecha de la prueba	
Fecha de recepción del equipo	
Marca del tablero	
Número de serie	
Especificaciones	
Representante	
Prueba realizada por	

2. Características nominales asignadas por el fabricante

Marca del tablero	
Número de serie	
Año de fabricación	
Tipo de tablero	
Planos bidimensionales del tablero eléctrico. Separación y dimensiones (ancho, alto, largo) de las fases. Acotadas para cada sección incluyendo conductores por fase.	
Voltaje nominal	[V]

Corriente nominal	[A]
Frecuencia nominal	[Hz]
Número de fases	Trifásico, bifásico, monofásico.
Corriente de cortocircuito simétrica	[A] Esta corriente debe ser trifásica.
Material de los conductores	
Envolvente	Material, espesor.

3. Simulación de Cortocircuito

Tabla de Resultados

SECCIÓN (agregar más secciones de ser necesario)	Conductores por fase	Distancia entre apoyos [mm]	Distancia entre fases [mm]	FUERZA MÁXIMA FASE B [N]
1				
2				
3				

ANEXO 2

INFORME DE SIMULACIONES

Leonardo Caicedo 1032209
Estudiante de Ingeniería eléctrica
Proyecto de grado

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad del Valle

I. Resumen

En este documento se presentan los procesos de simulación realizados por medio de programa de elementos finitos (COMSOL) y el programa Switchgear Design, posteriormente se comparan los resultados de fuerzas magnéticas de cortocircuito con el método propuesto por la IEC 61865/2001 [1].

II. INTRODUCCION

Los cortocircuitos son disturbios que ocurren en los sistemas eléctricos, estos eventos producen aumento de la corriente e interrumpe el flujo normal de la potencia, las fallas de cortocircuito en los sistemas eléctricos se pueden clasificar de acuerdo a los conductores que estén involucrados en el evento (fallas monofásicas, fallas bifásicas y fallas trifásicas). La severidad de un tipo de falla depende de: Las características del sistema, el nivel de cortocircuito del punto de conexión, la relación de impedancia de secuencia positiva y secuencia cero, el voltaje de pre-falla entre otros factores.

La circulación de corrientes de cortocircuito a través de los barrajes de los tableros produce esfuerzos mecánicos en los soportes y conductores debido a la fuerza producida por la interacción de la corriente y el campo magnético. El fenómeno de esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito se puede explicar suponiendo la siguiente condición:

Si a través de dos conductores en paralelo circulan las corrientes I_1 e I_2 respectivamente, como se muestra en la Figura 1, la circulación de estas corrientes produce un campo magnético en cada alrededor de los conductores, las líneas de campo magnético se establecen radialmente a la posición del conductor, la dirección va a depender del sentido de la corriente en cada uno de ellos.

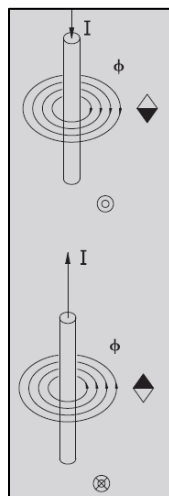


Figura 1. Circulación de la corriente y líneas de campo magnético a través de dos conductores. [1]

Si las corrientes en los conductores circulan en el mismo sentido se generan fuerzas de atracción que intentarán unir los conductores, las fuerzas serán de repulsión e intentarán separar los conductores si las corrientes circulan en sentidos opuestos, tal como se muestra en la Figura 2.

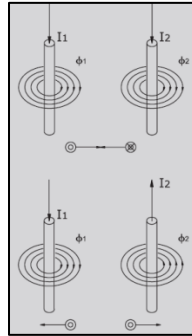


Figura 2. Fuerzas de atracción y repulsión en conductores eléctricos [1]

El fenómeno de atracción y repulsión producido por la interacción de la corriente y el campo magnético es conocido como fuerza electromagnética.

Cuando en un tablero eléctrico de baja tensión se presenta una condición de cortocircuito, los barrajes estarán sometidos a fuerzas de atracción y repulsión de gran magnitud que dependerán de la magnitud de la corriente y el ángulo de desfase, como se muestran en la Figura 3.

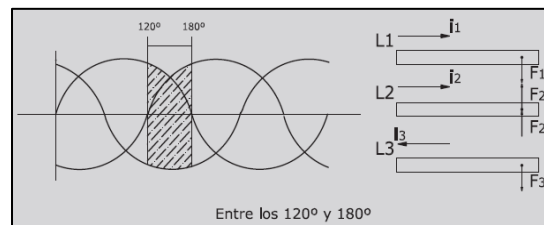


Figura 3. Desfase angular de la corriente y sentido de las fuerzas. [1]

Los barrajes de los tableros son sometidos a fuerzas mecánicas, debido a que las corrientes son oscilatorias, las fuerzas mecánicas tienen un componente estacionario y un componente de vibraciones que pulsa al doble de la frecuencia. Bajo condiciones normales de operación las fuerzas son pequeñas. Pero bajo condición de cortocircuito estas pueden crecer en una proporción que depende del cuadrado del valor de la corriente, a modo de ejemplo, si la corriente nominal de un barraje es de 2000A y la corriente de cortocircuito es de 20000A, las fuerzas de cortocircuito van a ser 100 veces mayores a las que se presentan bajo condición de trabajo normal [2].

Cálculo de la fuerza

Durante el proceso de diseño de tableros se usan programas que calculan las fuerzas que aparecen en las barras en caso de cortocircuito, según su forma, tamaño y disposición. Esos programas calculan también los efectos de resonancia que se pueden producir, cuando la frecuencia mecánica natural de oscilación de las barras montadas en Aisladores coincide con la frecuencia de la fuerza electromagnética eléctrica, En ámbitos de instaladores o constructores pequeños de tableros, no se justifica un estudio detallado de las fuerzas y esfuerzos de cortocircuito debido a la optimización de los costos, para este propósito se pueden emplear tratamientos más sencillos, como el indicado en la ecuación 1

$$F = 2LK \frac{I^2}{d} \quad (1)$$

F es la fuerza en newton, L es la longitud de una de las barras en metros, K la permeabilidad magnética del aire, igual a $0,0000001 \text{Kg}\cdot\text{m}/(\text{A}^2\cdot\text{s}^2)$, I es la corriente instantánea de pico o cresta de cortocircuito, en amperes, y d la distancia entre centros de barras, en metros.

La capacidad para soportar los esfuerzos producidos bajo una condición de cortocircuito se puede verificar realizando la prueba de resistencia al cortocircuito, para el caso de tableros de baja tensión la prueba está definida en la norma IEC 61439-1 del año 2011 [3], o utilizando cálculos analíticos, a través de programas computacionales.

III. Procedimientos, simulaciones y resultados.

Elementos Finitos: COMSOL Multiphysics

La simulación se realizará a través del software COMSOL[29], el cual es un programa multifísica que permite simular varios tipos de fenómenos; para mostrar las fuerzas de Lorenz se utiliza el modulo AC/DC, la geometría del tablero se trabajará en dos dimensiones.

La interfaz AC/DC [29] se utiliza para calcular los campos eléctricos y magnéticos en sistemas estáticos y de baja frecuencia; es decir, en sistemas donde la longitud de onda es sustancialmente mayor que el dispositivo estudiado. Esta interfaz también puede utilizarse para el modelado de circuitos eléctricos, de conducción de corriente eléctrica, campos magnéticos y eléctricos con formulaciones vector completo, órbitas de partículas cargadas, y maquinaria de rotación tales como motores y generadores [4]

Para esta simulación se elige la opción de campos magnéticos, para la cual ya vienen pre-definidas las variables dependientes, ver figura 4.

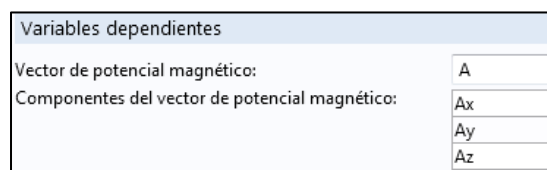


Figura 4. Variables dependientes

Para tener una idea más concreta de lo que se simulara En la figura 5. Se muestra la disposición del juego de barras.

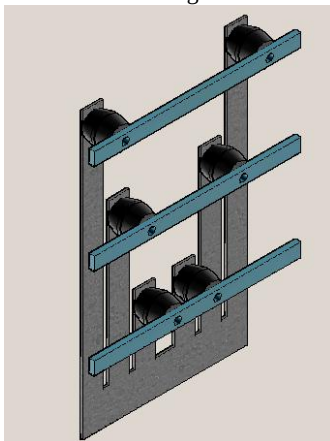


Figura 5. Disposición barras conductoras

El tipo de estudio que se empleara en la simulación es en el dominio del tiempo ya que las variables dependientes cambian a través de Este. La construcción de la geometría se hace a través de tres barras vistas desde la parte superior, ver figura 6.

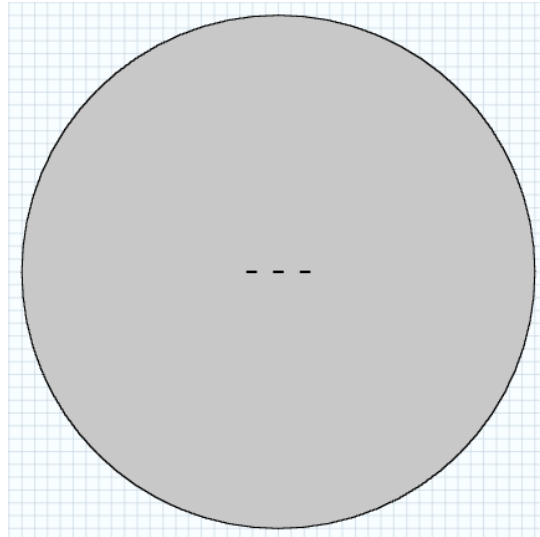


Figura 6. Geometría de las barras, vista superior.

La disposición del barraje trifásico tiene las siguientes características:

Largo: 19.05mm.

Ancho: 4.76mm.

Distancia entre centros: 132 mm

Longitud de las barras: 300m.m.

Construida la geometría se definen los materiales y condiciones de frontera. Para este caso para efectos de simplicidad se utilizara aire en toda la geometría debido a que las propiedades de los materiales que podrían cambiar los resultados de la simulación como la permisividad relativa del aire y la permeabilidad relativa del cobre son equivalentes a 1.

En el módulo de campo magnético de COMSOL se pueden hacer circular corrientes para cada una de las barras, haciendo circular una fase por cada barra con un desfase de 120 grados; en el programa el comando utilizado es el de densidad de corriente.

La densidad de corriente, designada por el símbolo J , es la corriente media por unidad de área (sección transversal) del conductor, suponiendo una distribución uniforme de la corriente. Su unidad es A/m².

La corriente que se utilizará es de 10kA, un promedio de una serie de resultados de corrientes pico de cortocircuito obtenidos en una de las fases de un prototipo de tablero eléctrico en el laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle.

$$J = \frac{I}{S}$$

$$J = \frac{10kA}{0.0007239m^2} \quad (2)$$

$$J = 13814062.72 \frac{A}{m^2}$$

Los valores de densidad de corriente se definen para cada uno de los conductores, tal como se muestra en las figuras 7, 8 y 9.

Densidad de corriente externa:		
0	x	A/m ²
0	y	
$110280332.6 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t)$	z	

Figura 7. Densidad de corriente barra 1-fase R.

Densidad de corriente externa:		
0	x	A/m ²
0	y	
$110280332.6 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t - 2 \cdot \pi / 3)$	z	

Figura 8. Densidad de corriente barra 2-fase S.

Densidad de corriente externa:		
0	x	A/m ²
0	y	
$110280332.6 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t + 2 \cdot \pi / 3)$	z	

Figura 9. Densidad de corriente barra 3-fases T.

Definiendo las densidades de corriente se define el mallado de la geometría y se observan las densidades de campo magnético, ver figura 10.

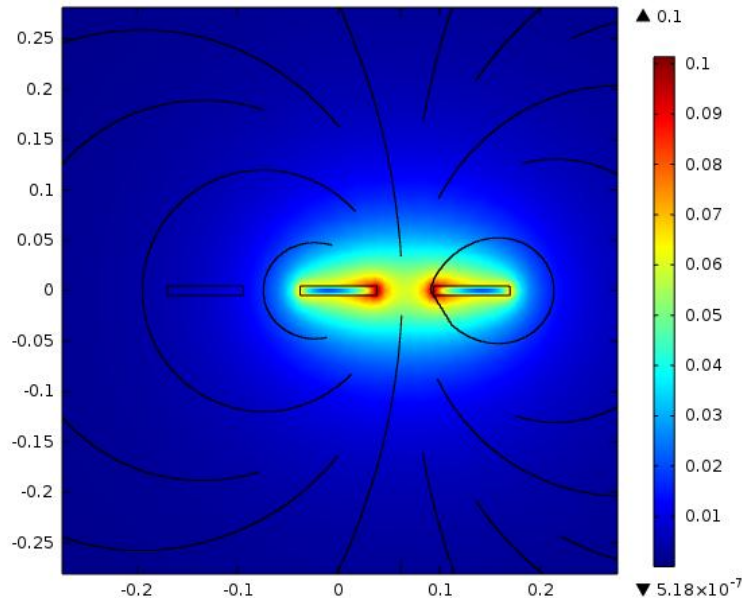


Figura 10. Superficie densidad y líneas de flujo magnético en las barras (resultados simulación COMSOL) para $t=0.05s$.

La densidad de flujo magnético [B], es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo, y es igual a la intensidad del campo magnético; La unidad de la densidad es el Tesla. En la figura 8, se observa como la densidad de campo magnético superficial se concentra en las esquinas del conductor dependiendo del instante de tiempo.

En la figura 11 se observa la superficie de fuerzas que se aplican a las barras producidas por el campo para $t=0.05s$

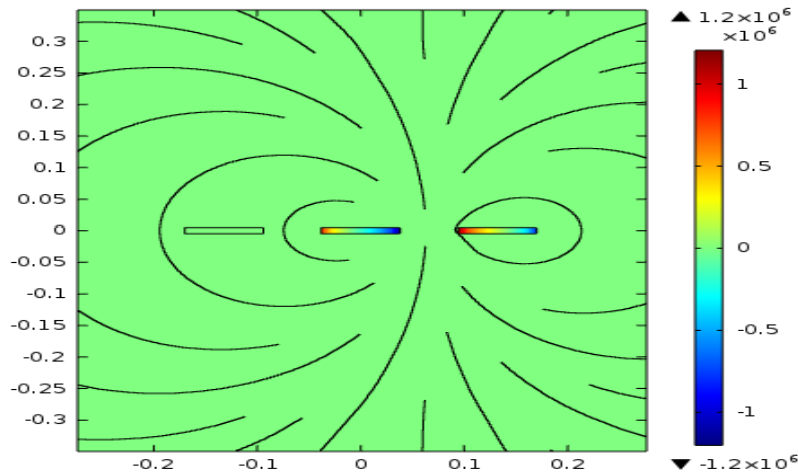


Figura 11. Contribución fuerzas de Lorentz (Resultados simulación COMSOL) para $t=0.05s$

La contribución de fuerzas de Lorentz, se indica N/m^3 ya que está dada como densidad de fuerzas

La fuerza total sobre las barras conductoras están determinadas por la integral de superficie de la barra conductora, el software calcula el total de la fuerza por unidad de longitud (F) del conductor como la contribución de fuerza de lorentz en el eje x, ya que la contribución de la fuerza de lorentz en el eje y es despreciable.

$$F = \int J \times B \, ds \quad (3)$$

Donde J es la densidad de corriente y B es el flujo magnético de la barra conductora.

La condición de frontera predeterminada para campo magnético establece el componente tangencial del potencial magnético en cero.

En la gráfica 12. Se muestra el resultado de la simulación donde se aprecia la fuerza por unidad de longitud entre el instante de tiempo 0.05 y 0.07

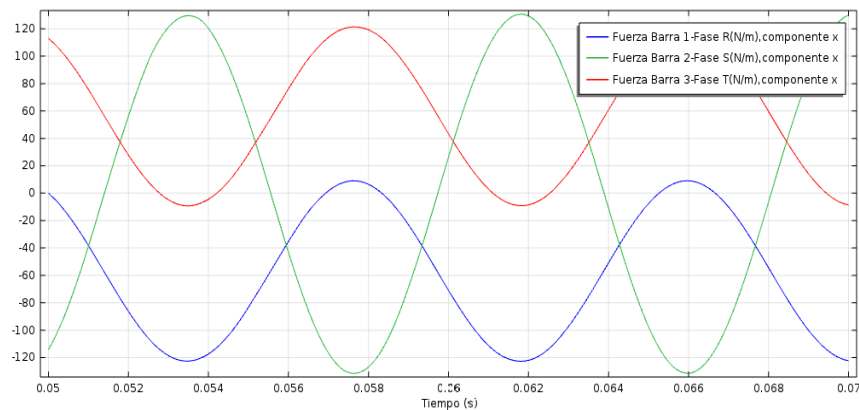


Figura 12. Fuerzas Magnéticas en barras conductoras

Se puede observar que en la barra central asume siempre una fuerza ligeramente mayor que las laterales y que la magnitud de las fuerzas laterales es la misma.

Método IEC 60865-1

En la IEC 61865/2001 proponen el cálculo de fuerza magnéticas en conductores a través de las ecuaciones (4) (5).

$$F_{mb} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot a_m} \frac{\sqrt{3}}{2} * i_p^2 \quad (4)$$

$$F_{ma} = F_{mc} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot a_m} \frac{3+2\sqrt{3}}{8} * i_p^2 \quad (5)$$

Donde la ecuación 4 calcula la fuerza magnética en la barra 2 y la ecuación 5 calcula la fuerza magnética en la barra 1 y 3

En la tabla 1. Se muestra una comparación de los dos métodos utilizados para el cálculo de las fuerzas magnéticas en los conductores.

Barra	Resultado MEF (N/m)	Resultado IEC (N/m)	Error
1-Fase R	121.4	122.426	0.83%
2-Fase S	129.6	131.216	1.23%
3-Fase T	122.73	122.426	0.25%

Tabla 1. Comparación resultados entre método IEC y método de elementos finitos para corriente 10 kA

El valor de corriente de la tabla 1. Se obtenidos a partir de la corriente asimétrica de cortocircuito de 10 kilo-Amperes, adicionalmente se realiza una simulación con valor de corriente de cortocircuito simétrico (8.6 kilo-Ampere) y otra simulación utilizando un factor de asimetría de 1.7 (14.62 kilo-ampere propuesto en el programa Switchgear Design.

Los resultados para las simulaciones mencionadas anteriormente se muestran en la tabla 2 y en la tabla 3 respectivamente.

Barra	Resultado MEF (N/m)	Resultado IEC (N/m)	Error
1-Fase R	89.04	90.5464	1.66%
2-Fase S	96.34	97.0473	0.72%
3-Fase T	91.55	90.5474	1.10%

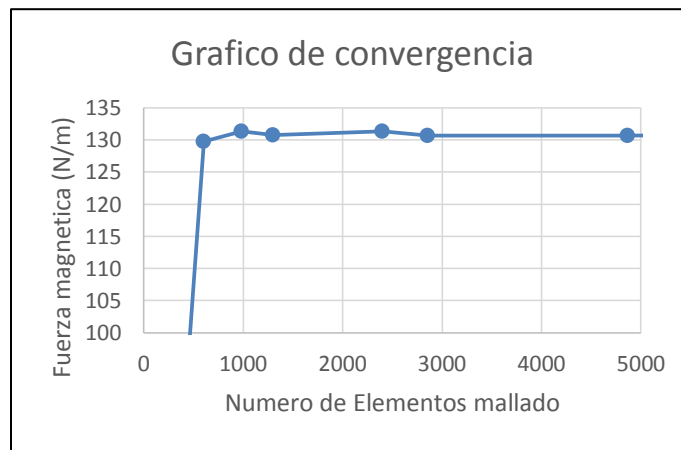
Tabla 2. Resultados de simulación fuerzas magnéticas para 8.6 kA

Barra	Resultado MEF (N/m)	Resultado IEC (N/m)	Error
1-Fase R	257.18	261.679	1.71%
2-Fase S	278.4	280.467	0.73%
3-Fase T	254.6	261.679	2.7%

Tabla 3. Resultados de simulación fuerzas magnéticas para 14.62 kA

Para las simulaciones se utilizó un mallado de tipo triangular, con 2856 elementos (malla fina).

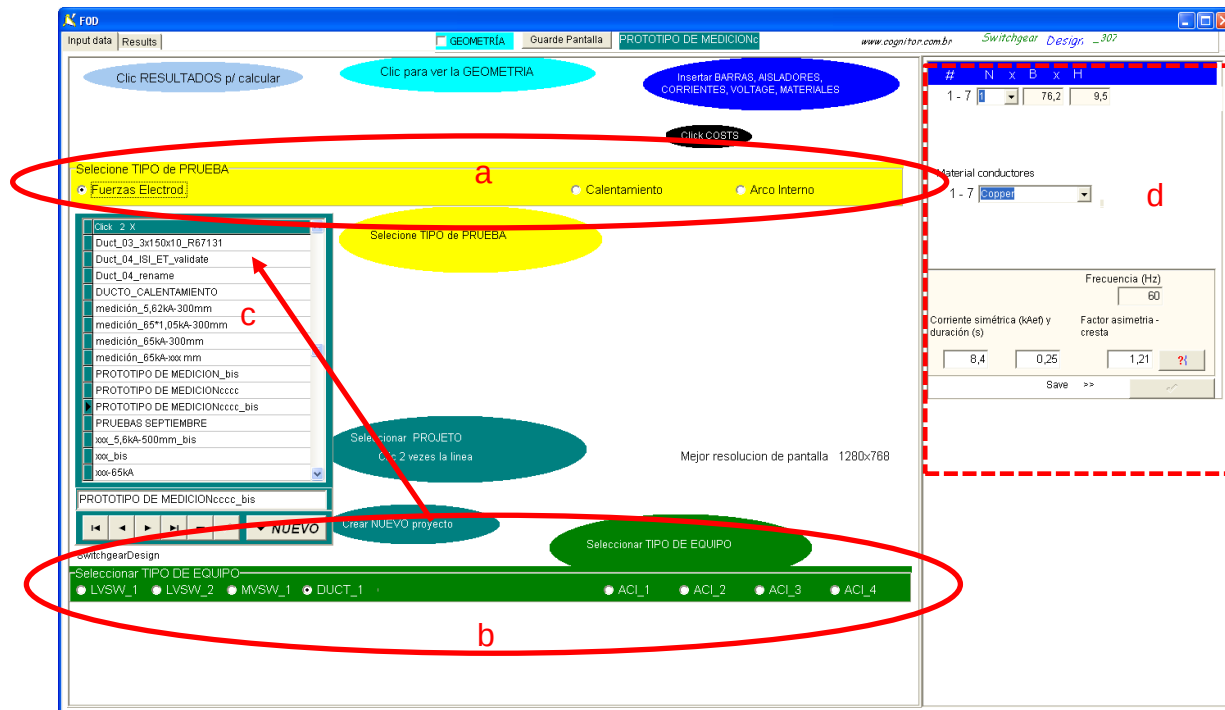
En la gráfica de convergencia (Grafica 13), se utiliza la barra 2- fase S para 10 kilo-Amperes con diferentes tipos de tamaño de malla (gruesa-normal-fina-más fina, extra fina, extremadamente fina).



Grafica 13. Convergencia resultados

Switchgear Design: Modulo esfuerzos electrodinámicos.

En la figura 14 se observa la interfaz del programa Switchgear Design



Grafica 14 Interface Switchgear Design.

Pasos para la simulación:

- Seleccionar tipo de prueba a simular (fuerzas electrodinámicas)
- Seleccionar el modelo de equipo a simular de acuerdo a la geometría (DUCT_1,)
- Seleccionar el equipo más ajustado de acuerdo a la librería disponible por el modelo.
- Introducir los datos para simulación de acuerdo a la prueba a considerar. Revisar la geometría de los apoyos y el barraje.

La geometría del modelo se observa en la figura 15

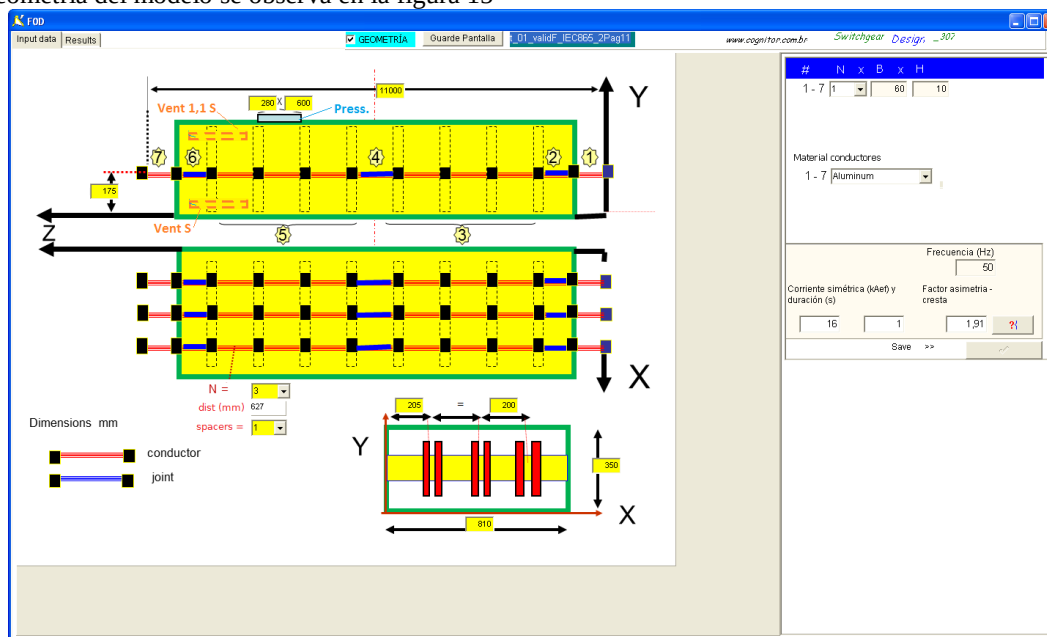


Figura 15 Geometría modelo DUCT_1.

Una vez escogida la geometría tipo ducto deben introducirse los detalles geométricos del lado izquierdo, Para comenzar:

1. Se inserta 7 veces la longitud total de la sección a simular del tablero,
 2. Se mantiene el valor N igual a 1.
 3. Comparación: El valor de distancia (mm) debe coincidir con a la longitud de la sección a simular extraída de los planos del tablero.
 4. Se introduce la distancia entre fases.
- (Cada vez que se cambie un valor se debe hacer clic en save)

Después de indicar la geometría sigue los detalles eléctricos, al lado derecho

5. Se debe introducir el número de conductores por fase y sus dimensiones
6. El material de los conductores.
7. La frecuencia de la corriente, la corriente simétrica, duración de la prueba y factor de asimetría. El factor de asimetría se introduce a partir de la norma de cortocircuito incluida en el software, solo es hacer clic en el símbolo de pregunta.

Utilizando los mismos valores de la simulación de elementos finitos activamos la casilla de dF/dM Para ver en la gráfica el valor de fuerza magnética en los conductores del tablero y compararlos con el valor de fuerza magnética obtenida en el programa de elementos finitos, ver figura 16.

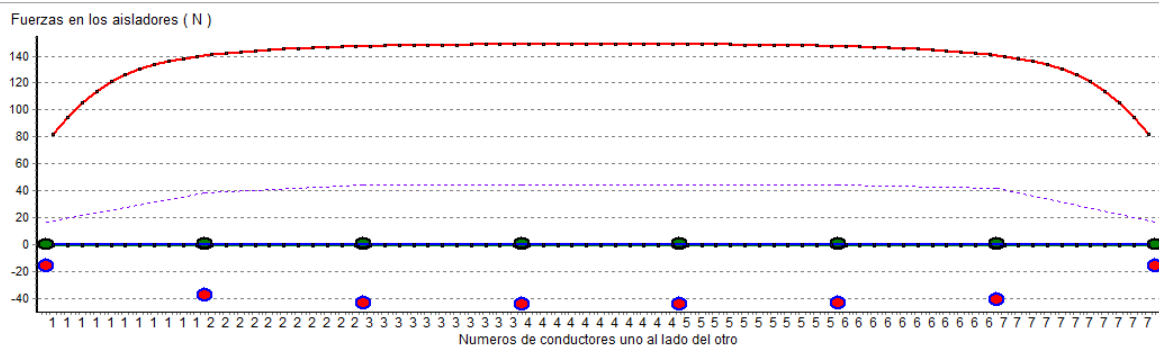


Figura 16 Fuerza Magnética Conductor central Switchgear Design.

El valor de fuerza magnética en el conductor S (barra central) es de 148 N/m para corriente asimétrica igual a 10kA.

Comparación de resultados

	Fuerzas N/m			ERROR %	
	IEC 60865-1	COMSOL	Switchgear Design	IEC VS COMSOL	IEC VS SWITCHGEAR DESIGN
conductor central	131,216	129,6	148	1,23	12,79

Tabla 4 Comparación de resultados.

Se observa en la tabla 4, que la simulación en Comsol tiene menor error en comparación con la norma IEC 60865-1, sin embargo el software Switchgear Design mantiene un resultado conservativo de la fuerza magnética en la fase central

IV. CONCLUSIONES

En las esquinas de las barras hay mayor densidad de campo magnético y por ende hay mayor contribución de fuerzas magnéticas

La relación de la corriente con respecto a la fuerza magnética está dada en relación exponencial y esto se evidencio en las simulaciones efectuadas en COMSOL

Los resultados de fuerzas obtenidos están en el rango de lo permitido ya que tiene un error menor al 15%.

La simulación revela que la barra central se presenta una fuerza mayor en comparación con las barras laterales.

V. REFERENCIAS

- [1] L. Empresa, “Esfuerzos de cortocircuito actúan en barras y cables de un tablero eléctrico .,” pp. 34–36.
- [2] D. Chapman and T. Norris, “Copper for Busbars Guidance for Design and Installation Copper for Busbars.”
- [3] “IEC-60439-1 Tableros.pdf.” .