



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta del sistema eléctrico para
el laboratorio de máquinas
eléctricas del departamento de
energía eléctrica y sostenibilidad de
la FI UNAM**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Sergio Alberto Jiménez Jiménez

DIRECTOR DE TESINA

Ing. Alberto Cortez Mondragón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado PROPUESTA DEL SISTEMA ELECTRICO PARA EL LABORATORIO DE MAQUINAS ELECTRICAS DEL DEPARTAMENTO DE ENERGIA ELECTRICA Y SOSTENIBILIDAD DE LA FI UNAM que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

SERGIO ALBERTO JIMENEZ JIMENEZ
Número de cuenta: 316230289

DEDICATORIA

A mis padres.

Miguel Jiménez Hernández y Aidee Tonantzi Jiménez Andrade. Por su amor, fuerza y comprensión. Su apoyo ha sido fundamental para que pueda culminar esta etapa de mi vida. Gracias por escucharme cuando lo necesité, por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por impulsarme a seguir adelante en cada momento difícil. Las palabras no son suficientes para expresar mi cariño y gratitud hacia ustedes.

A mis hermanos.

Miguel Fabian Jiménez Jiménez y Jaime Antonio Jiménez Jiménez. Por además de ser grandes hermanos ser mis amigos. La vida me ha dado el privilegio de convivir con ustedes y caminar juntos en cada etapa. Gracias por estar a mi lado en cada momento que los he necesitado, por su respaldo incondicional, su comprensión y su cariño.

A toda mi familia.

Por estar presentes, gracias por su amor, motivación y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Con especial gratitud a mi asesor, el Ing. Alberto Cortez Mondragón, por su tiempo, sabiduría, paciencia y apoyo compartido a lo largo de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por abrirme sus puertas y por la sabiduría adquirida para forjarme como profesionalista.

A los profesores y profesoras que contribuyeron en mi formación académica.

A los laboratoristas que trabajan en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas por su apoyo.

A todos mis amigos que dejaron huella durante mi etapa universitaria, por ayudarme cuando lo necesite e hicieron que la vida en la universidad fuera menos complicada. Un agradecimiento especial a mi mejor amiga Hilda por todo su apoyo y que a pesar de la distancia no ha sido un impedimento para sentir su acompañamiento y cariño sincero durante este camino.



ÍNDICE

HIPOTESIS	1
OBJETIVO	1
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
MÉTODO	2
RESULTADOS ESPERADOS	3
REFERENTES TEÓRICOS	3
ANTECEDENTES	6
CAPÍTULO 1. LEVANTAMIENTO ELÉCTRICO	9
CAPÍTULO 2. CONDUCTORES ELÉCTRICOS	13
2.1 Aislamiento del conductor	13
2.1.1 Selección del aislamiento del conductor	13
2.2 Calibre del conductor eléctrico	16
2.2.1 Dimensionamiento del conductor eléctrico para la alimentación de motores	16
2.2.2 Aplicación del factor de corrección por temperatura	20
2.2.2.1 Motor de corriente directa del módulo MGI	21
2.2.2.2 Máquina síncrona del módulo MGI	21
2.2.2.3 Motor de inducción del módulo DIN I	22
2.2.2.4 Motor de inducción del módulo DIN II	23
2.2.2.5 Máquina síncrona del módulo Marino	23
2.2.2.6 Máquina de corriente directa de 75 KW del módulo Marino	25
2.2.2.7 Dinamómetro del módulo DIN I	26
2.2.2.8 Sistema de excitación de CD	26
2.2.2.9 Rectificadores de CA a CD	27
2.2.3 Dimensionamiento del conductor eléctrico para circuitos alimentadores	28
2.2.3.1 Alimentador del módulo Marino	29
2.2.3.2 Alimentador del laboratorio de máquinas eléctricas	30
2.2.3.3 Alimentador devanado primario y devanado secundario transformador del laboratorio de máquinas eléctricas	31
2.3 Resultados	34
CAPÍTULO 3. CAÍDA DE TENSIÓN	35
3.1 Caída de tensión	35
3.1.1 Caída de tensión para el motor de corriente directa del módulo MGI	37
3.1.2 Caída de tensión para el motor de inducción del módulo DIN II	38
3.2 Flujos de potencia mediante ETAP	39
3.3 Resultados	42



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO	43
4.1 Método de cálculo	44
4.1.1 Procedimiento	44
4.1.2 Aplicación	46
4.2 ETAP	64
4.3 Resultados	66
4.4 Conductores eléctricos	67
4.5 Resultados	68
CAPÍTULO 5. PROTECCIÓN ELÉCTRICA	69
5.1 Protección de motores eléctricos	69
5.2 Protección contra sobrecarga	69
5.2.1 Dimensionamiento del sistema protección contra sobrecarga para motores	70
5.3 Protección contra cortocircuito y fallas a tierra	71
5.3.1 Dimensionamiento del sistema protección contra cortocircuito y fallas a tierra para motores	72
5.4 Corriente de arranque de motores	74
5.5 Protección eléctrica de circuitos de alimentación	76
5.5.1 Protección eléctrica para el alimentador módulo Marino	76
5.5.2 Protección eléctrica para el alimentador del laboratorio de máquinas eléctricas	77
5.6 Protección eléctrica de tableros de distribución	78
5.6.1 Protección eléctrica para el tablero de distribución para motores	78
5.6.2 Protección eléctrica para el tablero de distribución para espacios interiores	79
5.6.3 Protección eléctrica para el tablero de distribución para iluminación	80
5.7 Protección eléctrica para el transformador de 112.5 kVA del laboratorio de máquinas eléctricas	80
5.8 Protección eléctrica para los rectificadores de CA a CD	81
5.9 Protección eléctrica para el sistema de excitación de las máquinas síncronas y máquinas de corriente directa	81
5.10 Resultados	81
CAPÍTULO 6. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES	83
6.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico en ETAP	84
6.2 Coordinación de protecciones interruptor principal FI	86
6.3 Coordinación de protecciones tableros de distribución e interruptor principal del laboratorio	88
6.4 Coordinación de protecciones tablero de distribución para motores	90
6.5 Coordinación de protecciones sistema de 440 V	92
CAPÍTULO 7. CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA	94



7.1 Resultados	95
CAPÍTULO 8. DUCTOS ELÉCTRICOS	96
8.1 Ducto eléctrico de servicio para el motor de corriente directa del módulo MGI	98
8.2 Ducto eléctrico de servicio para el motor de inducción del módulo DIN I	98
8.3 Resultados	99
CAPÍTULO 9. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	100
9.1 Metodología	100
9.2 Diseño y cálculo del sistema de puesta a tierra	103
9.3 Análisis de resultados	128
CAPÍTULO 10. PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DEL TABLERO PRINCIPAL DEL LABORATORIO	130
10.1 Propuesta para el sistema de 440 V	132
10.2 Propuesta para el sistema de 220 V	133
10.3 Incorporación de variadores de frecuencia	138
10.4 Incorporación de rectificadores electrónicos variables	139
CONCLUSIONES	141
REFERENCIAS	143



HIPOTESIS

El sistema eléctrico del laboratorio de Máquinas Eléctricas ha permanecido sin modificaciones en su estructura principal desde su implementación en la década de los años 50. Actualmente, con el paso de los años la infraestructura del sistema presenta un notable deterioro, aunque el sistema continúa en operación su estado conlleva a riesgos para la seguridad y problemas operativos.

La propuesta de un sistema eléctrico diseñado acorde con la normativa vigente permitirá optimizar las condiciones de seguridad incorporando materiales y dispositivos adecuados a las características del laboratorio.

A través del desarrollo de estudios teóricos y su implementación en un entorno de simulación se evaluará el desempeño de la propuesta con el fin de comparar los resultados y concluir que el sistema cumpla con los criterios de seguridad y eficiencia.

OBJETIVO

Desarrollar la Propuesta del Sistema Eléctrico para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas del Departamento de Energía Eléctrica y Sostenibilidad de la FI UNAM que contemple el diseño, dimensionamiento y selección de componentes eléctricos necesarios para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los equipos del laboratorio.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El laboratorio ha pasado por cambios a lo largo del tiempo:

- El sistema eléctrico fue construido en la década de los años 50 bajo estándares desactualizados que no cumplen con los criterios de diseño de las normas modernas. Con el tiempo el sistema eléctrico se ha degradado debido a factores ambientales, esta condición genera un riesgo de fallas eléctricas.
- Con el paso del tiempo se ha perdido información para operar el tablero principal del laboratorio y alimentar las distintas áreas y equipos. La falta de esta información implica un riesgo al alimentar circuitos de manera incorrecta, esto puede ocasionar accidentes que ponen en riesgo al personal. En consecuencia, se han mantenido fuera de operación varios equipos del laboratorio.
- La subestación eléctrica del laboratorio quedó fuera de operación tras la modificación del suministro de 6.6 kV a 23 kV en la Subestación General No. 1.



La operación de la subestación eléctrica del laboratorio depende de un transformador eléctrico trifásico diseñado para operar con una tensión nominal de 6.3 kV en el devanado primario y 440 V en el devanado secundario, este transformador era alimentado mediante el suministro de 6.6 kV proveniente de la Subestación General No. 1. En consecuencia, el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM” no ha sido puesto en marcha desde entonces ya que el sistema es alimentado directamente de la subestación del laboratorio.

Bajo este contexto el laboratorio limita su funcionamiento y sumado a que el sistema presenta un notable deterioro derivado del envejecimiento de los materiales es indispensable la actualización del sistema eléctrico adecuado a las normas vigentes que permita utilizar nuevamente todos los equipos y áreas de forma segura ayudando en el aprendizaje práctico de los estudiantes.

MÉTODO

- a) Realizar la propuesta del sistema eléctrico basada en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEDE-2012, NOM-029-STPS-2011 y NOM-022-STPS-2015, con el propósito de establecer las especificaciones y lineamientos que deben satisfacer las instalaciones eléctricas a fin de ofrecer condiciones adecuadas de seguridad para la prevención de riesgos.
- b) Se considera la aplicación de otras normas y estándares nacionales e internacionales que complementen criterios específicos. Su integración sumada a la experiencia personal permitirá sustentar las decisiones de diseño con un enfoque seguro.
- c) Se realizarán estudios teóricos y serán implementados en un entorno de simulación para observar el comportamiento esperado por la teoría a fin de verificar que el sistema eléctrico cumple con los criterios de seguridad y eficiencia.



RESULTADOS ESPERADOS

Disponer de una instalación eléctrica confiable, segura y eficiente para obtener los siguientes beneficios:

1. Aprendizaje práctico:

Los estudiantes podrán interactuar con los sistemas físicos, lo que permitirá que tengan un mejor desarrollo y comprensión de las bases del funcionamiento de las máquinas eléctricas.

2. Complemento de la formación teórica:

El funcionamiento de los equipos de categoría industrial servirá como herramienta didáctica complementaria para las asignaturas que imparten en el laboratorio como Máquinas Eléctricas I, Máquinas Eléctricas II y Máquinas Eléctricas III, fortaleciendo la relación entre los contenidos teóricos y su aplicación.

3. Proyectos estudiantiles:

Constituirá la base para el desarrollo de proyectos académicos, incluyendo trabajos de investigación de tesis, tesina y proyectos en apoyo a la docencia.

REFERENTES TEÓRICOS

1. Concepto de Instalaciones Eléctricas

Se entiende por instalación eléctrica, al conjunto de tuberías conduit o tuberías y canalizaciones de otro tipo y forma, cajas de conexión, registros, elementos de unión entre tuberías, y entre las tuberías y las cajas de conexión o los registros, conductores eléctricos, accesorios de control y protección, etc., necesarios para conectar o interconectar una o varias fuentes o tomas de energía eléctrica con los receptores. (Becerril, 2005)

Se diseñan conforme a criterios normativos y consideraciones de seguridad para reducir riesgos a los equipos y las personas, así como suministrar energía de manera continua y eficiente.

2. Componentes Fundamentales

2.1 Conductores y Canalizaciones

Conductores: Los conductores eléctricos son aquellos materiales que ofrecen poca oposición o resistencia al paso de la corriente eléctrica por o a través de ellos. (Becerril, 2005)



Canalización: Canal cerrado de materiales metálicos o no metálicos, expresamente diseñado para contener alambres, cables o barras conductoras, con funciones adicionales. (Secretaría de Energía, 2012).

2.2 Protección eléctrica

Las instalaciones eléctricas incorporan dispositivos de protección destinados a detectar y actuar automáticamente para limitar daños y propagación de fallas ante condiciones anormales de operación las cuales comprenden:

Sobrecarga: Operación de un equipo por encima de su capacidad normal, a plena carga, o de un conductor por encima de su ampacidad que, cuando persiste durante un tiempo suficientemente largo, podría causar daños o un calentamiento peligroso. (Secretaría de Energía, 2012)

Sobrecorriente: Cualquier corriente que supere la corriente nominal de los equipos o la ampacidad de un conductor. La sobrecorriente puede provocarse por una sobrecarga, un cortocircuito o una falla a tierra. (Secretaría de Energía, 2012)

2.3 Diseño y Coordinación de Protecciones

Coordinación: Localización de una condición de sobrecorriente para restringir interrupciones del circuito o del equipo afectado, lo cual se logra con la selección de los dispositivos de protección contra sobrecorriente y sus ajustes o valores nominales. (Secretaría de Energía, 2012)

La coordinación de protecciones asegura que, ante una falla, la selectividad entre protecciones primarias y secundarias, el dispositivo más cercano al punto de falla opere primero limitando interrupciones innecesarias y manteniendo la continuidad del servicio eléctrico en el resto del sistema. Esto se logra mediante el análisis de curvas tiempo–corriente, ajuste de tiempos de retardo y cálculos de cortocircuito.

2.4 Cargas Eléctricas

Carga (eléctrica): Es la potencia instalada o demandada en un circuito eléctrico. (Secretaría de Energía, 2012).

Comprenden los aparatos, equipos y sistemas que consumen energía eléctrica como motores, luminarias, equipos electrónicos, entre otros, a fin de realizar una función específica.

2.5 Sistema de Puesta a Tierra



Un sistema que consta de todas las conexiones de puesta a tierra interconectadas en un sistema de potencia específico y se define por su aislamiento de los sistemas de puesta a tierra adyacentes. El aislamiento lo proporcionan los devanados primario y secundario del transformador que están acoplados únicamente por medios magnéticos. Por lo tanto, el límite del sistema está definido por la falta de una conexión física que sea metálica o a través de una impedancia significativamente alta. (IEEE, 2007)

El sistema de puesta a tierra tiene el objetivo de proporcionar un flujo de corriente que permita la detección de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra. Tal detección puede entonces iniciar la operación de dispositivos automáticos para eliminar la fuente de voltaje de estos conductores. (IEEE, 2007)

3. Normatividad

Las instalaciones eléctricas se diseñan siguiendo normas que garantizan la seguridad y confiabilidad del sistema, entre las empleadas destacan:

NOM-029-STPS-2011

La Norma Oficial Mexicana llamada Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo-condiciones de seguridad, tiene como objetivo establecer las condiciones de seguridad para la realización de actividades de mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo, a fin de evitar accidentes al personal responsable de llevarlas a cabo y a personas ajenas a dichas actividades que pudieran estar expuestas. (Secretaría de Energía 2011).

NOM-022-STPS-2015

La Norma Oficial Mexicana llamada Electricidad estática en los centros de trabajo-condiciones de seguridad establece las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para prevenir los riesgos por electricidad estática, así como por descargas eléctricas atmosféricas. (Secretaría de Energía 2015).

NOM-001-SEDE-2012

La Norma Oficial Mexicana llamada Instalaciones eléctricas (utilización), su objetivo es establecer las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra descargas eléctricas, efectos térmicos, sobrecorrientes, corrientes de falla y sobretensiones. (Secretaría de Energía 2012).



ANTECEDENTES

Red de distribución en Ciudad Universitaria UNAM

La red eléctrica de distribución de Ciudad Universitaria se construyó en los años 50's, estaba constituida por una Subestación Principal (actualmente denominada Subestación General No. 1), ubicada en la zona norte de Ciudad Universitaria a un costado de la Facultad de Psicología, con una tensión nominal de 23 kV a 6.6 kV y una capacidad de 5 MVA distribuida en dos transformadores de 2.5 MVA. La energía era suministrada por la Compañía de Luz y Fuerza Motriz S.A. mediante dos alimentadores aéreos de 23kV provenientes de las Subestaciones Taxqueña y Olivar del Conde.

Con el paso de los años la Ciudad Universitaria se expandió en función de la demanda de estudiantes que aumentaba generación tras generación para ingresar al campus, se construyeron nuevos edificios a tal punto que la Subestación General No.1 fue incapaz de cubrir la demanda eléctrica. Por esa razón se sustituyeron los transformadores de 2.5 MVA por otros de 7.5 MVA.

Con el constante crecimiento de Ciudad Universitaria surgió un nuevo problema de demanda para la Subestación General No. 1, debido a esa situación se construyó una nueva subestación eléctrica para cubrir la demanda existente, así fue como surgió la Subestación General No. 2 ubicada en el circuito exterior frente a la Escuela Nacional de Trabajo Social. La subestación se construyó reutilizando los dos transformadores de 2.5 MVA que en un principio constituían la Subestación General No. 1., un transformador se instaló con el fin de operar de forma continua, mientras que el segundo transformador estaría como reserva ante alguna falla o mantenimiento del primer transformador y viceversa.

Red de distribución actual en Ciudad Universitaria UNAM

En el 2005 inició la fase de planeación para la creación de una nueva red eléctrica de distribución subterránea en Ciudad Universitaria encabezada por los ingenieros Roberto Espinosa y Lara, Guillermo López Monroy, Alberto Cortez Mondragón y Oscar Octavio Gómez Neri con el objetivo de normalizar el nivel de tensión a 23 kV. Posteriormente en el año 2010 comenzó la etapa de ejecución del proyecto la cual se desarrolló de manera progresiva hasta su conclusión en 2016. La construcción se realizó en convenio con la Dirección General de Obras a través del *Programa para la instalación de la red subterránea en media tensión en 23 kV y de fibra óptica*.

La red eléctrica de distribución de Ciudad Universitaria está conformada por varias Subestaciones Generales:



- Subestación General No. 1. Ubicada en la zona norte de Ciudad Universitaria a un costado de la Facultad de Psicología.
- Subestación General No. 2. Ubicada en el circuito exterior frente a la Escuela Nacional de Trabajo Social.
- Subestación General No. 3. Ubicada en la avenida del Imán.
- Subestación General No. 4. Ubicada frente al edificio del Instituto de Investigaciones Biomédicas.
- Subestación General No. 5. Ubicada a un costado del edificio de Relaciones Laborales.
- Subestación General No. 6. Ubicada en el estadio Olímpico Universitario.
- Subestación General No.7. Ubicada en la zona cultural de Ciudad Universitaria

Cada Subestación General tiene una tensión de distribución de 23 kV y la energía es suministrada por la Comisión Federal de Electricidad.

Situación actual del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería

La creación de la nueva red de distribución propició el cambio de nivel de tensión de 6.6 kV a 23 kV en la Subestación General No.1, esta modificación afectó al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería, dentro del laboratorio existe una subestación eléctrica conformada por un transformador trifásico con una tensión nominal de 6.3 kV en el devanado primario y 480 V en el devanado secundario con una capacidad de 75 KVA, cuyo propósito es alimentar el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”. La subestación eléctrica del laboratorio era alimentada por la Subestación General No.1 con el nivel de tensión de 6.6 kV, al modificarlo a 23 kV provocó dejar fuera de operación la subestación del laboratorio y por consiguiente el sistema mencionado.

Las modificaciones realizadas en la red eléctrica de distribución provocaron que se limite la disponibilidad operativa de áreas y equipos del laboratorio. A esto se suman situaciones internas ocurridas.

Con el paso del tiempo se ha perdido información para operar el tablero principal del laboratorio y alimentar las distintas áreas y equipos. Esta información constituía la referencia para identificar cada circuito del tablero principal y permitía al personal responsable alimentar las cargas asignadas.

La pérdida de esta información genera un riesgo de alimentar circuitos incorrectamente provocando condiciones inseguras para el personal y los equipos,



debido a esto se ha optado por mantener fuera de servicio diversas áreas del laboratorio o solo limitar su funcionamiento.

La suspensión de la operación ha derivado en una falta de mantenimiento en los equipos pues al no estar en uso no reciben las revisiones periódicas que normalmente se realizan durante la operación regular.

A esta problemática se suma un factor importante, el tiempo de vida del sistema eléctrico prácticamente ha terminado, esto implica que varios elementos se encuentren deteriorados y hayan concluido su vida útil. Estas condiciones presentan una alta probabilidad de falla eléctrica.

En respuesta a esta situación, se ha desarrollado una propuesta para el sistema eléctrico del laboratorio, el enfoque principal se centra en restablecer la operatividad de las máquinas eléctricas rotatorias, la subestación eléctrica dentro del laboratorio y por consiguiente el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM” a partir de la evaluación de los siguientes aspectos:

1. Levantamiento eléctrico de campo.
2. Selección del aislamiento de conductores.
3. Dimensionamiento de los conductores eléctricos.
4. Análisis de la caída de tensión en los circuitos.
5. Estudio de cortocircuito.
6. Dimensionamiento de protecciones y coordinación entre ellas.
7. Dimensionamiento del conductor de puesta a tierra.
8. Dimensionamiento de ductos eléctricos.
9. Sistema de puesta a tierra.
10. Actualización del tablero principal.

La propuesta se fundamenta en los lineamientos establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 junto con la aplicación de otras normas y estándares nacionales e internacionales a fin de ofrecer condiciones adecuadas de seguridad.



CAPÍTULO 1. LEVANTAMIENTO ELÉCTRICO

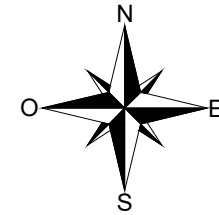
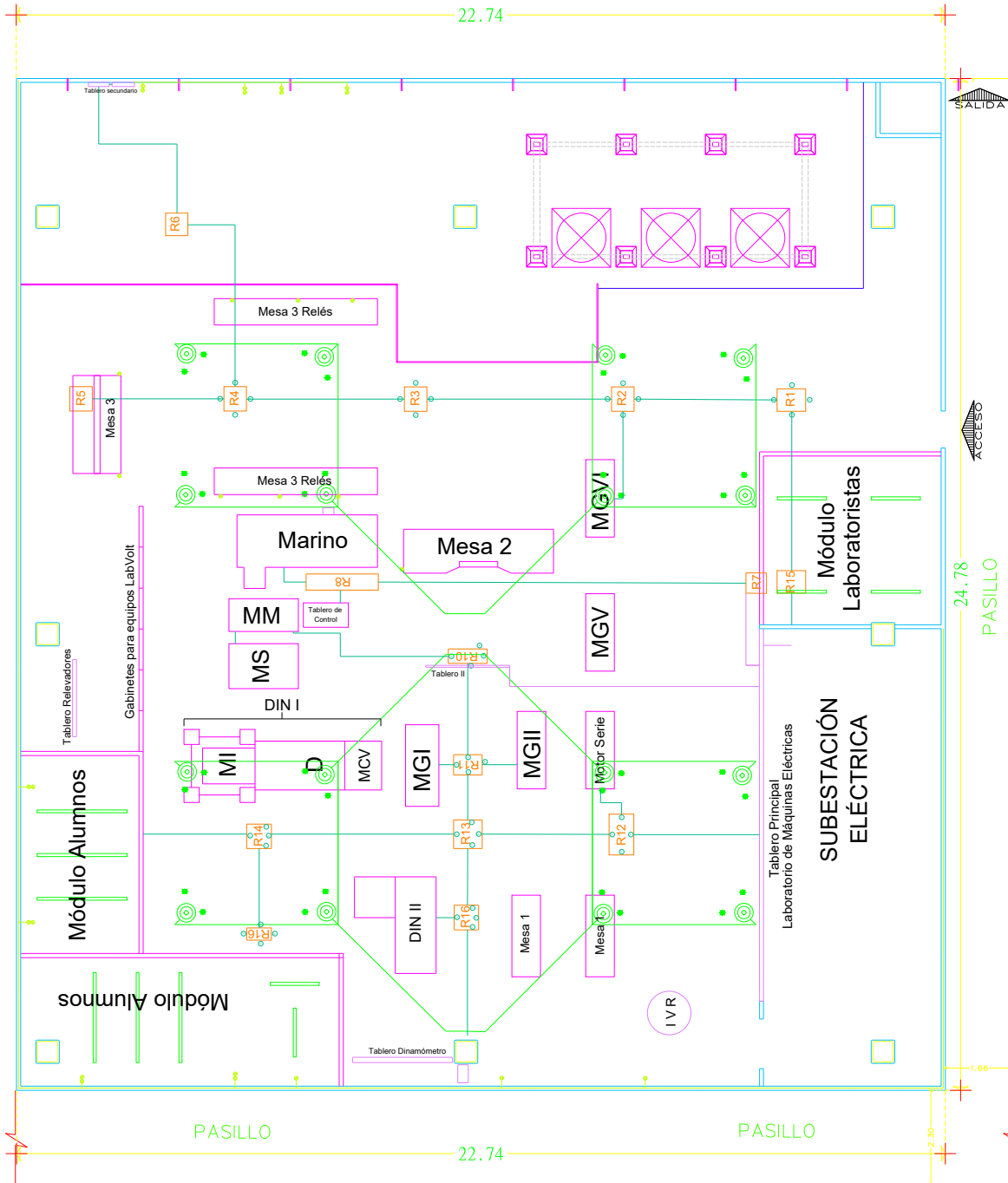
Un levantamiento eléctrico es un proceso mediante el cual se identifica y documenta las condiciones de un sistema eléctrico, su propósito es obtener información para efectos de análisis, mantenimiento o modificaciones.

Se realizó el levantamiento eléctrico de campo del laboratorio con el propósito de identificar los puntos de alimentación del tablero principal así como los equipos y áreas que cada uno de los puntos se encarga de alimentar.

Debido a la ausencia de identificación de los circuitos en el tablero principal y la falta de antecedentes el levantamiento se efectuó mediante el seguimiento de ductos eléctricos y verificación de continuidad de cada circuito.

Para complementar la información y mejorar su comprensión se elaboró un plano del laboratorio donde se ubican las áreas y los equipos identificados durante el levantamiento.

La elaboración del plano del laboratorio permite identificar las áreas, los módulos y los equipos que se mencionan en los capítulos posteriores para facilitar la relación entre la información presentada y su ubicación física. Este recurso contribuye a una mejor comprensión del contenido y al seguimiento adecuado del análisis desarrollado en el documento.



Simbología	Descripción
	Registros eléctricos
	Contacto trifásico
	Contacto monofásico
	Transformador monofásico
	Regulador de voltaje
	Castillo
	Luminarias
	Ductos luminarias
	Ductos subterráneos
	Motor de Inducción
	Dinamómetro
	Módulo Dinamómetro I
	Módulo Dinamómetro II
	Módulo Motor-Generador I
	Módulo Motor-Generador II
	Módulo Motor-Generador Serie
	Módulo Motor-Generador V
	Módulo Motor-Generador VI
	Módulo Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM
	Módulo Mareomotriz
	Módulo Solar
	Módulo Control Viento



UNAM

DEPENDENCIA: LAB. DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS FI UNAM		
PROYECTO: PROPUESTA DEL SISTEMA ELÉCTRICO		
UBICACIÓN: CIUDAD UNIVERSITARIA		
DESCRIPCIÓN: PLANO LAB ME FI UNAM		
DIBUJO: SERGIO ALBERTO JIMÉNEZ JIMÉNEZ		
AUTORIZO: ING. ALBERTO CORTEZ MONDRAGÓN		
AÑO: 2025	ESCALA: S/E	ACOTACIONES: Metros

Se elaboró un diagrama unifilar del sistema eléctrico del laboratorio a partir de la información recopilada durante el levantamiento. Este diagrama representa la estructura de distribución actual y permite visualizar la jerarquía de los circuitos.

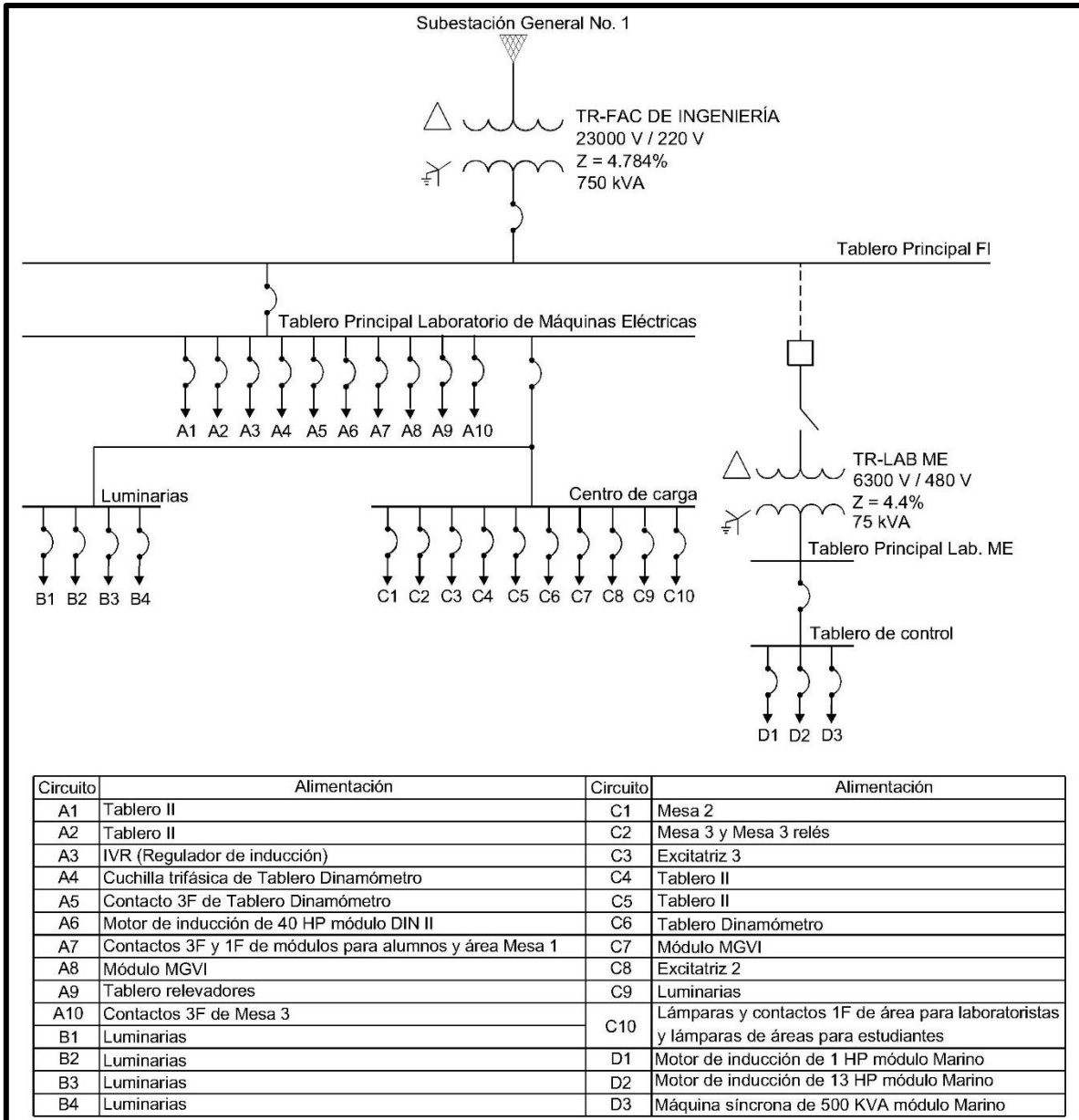


Figura 1.1 Diagrama unifilar sistema eléctrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas

En la Figura 1.2 se muestra el diagrama unifilar de la propuesta para el sistema eléctrico del laboratorio.

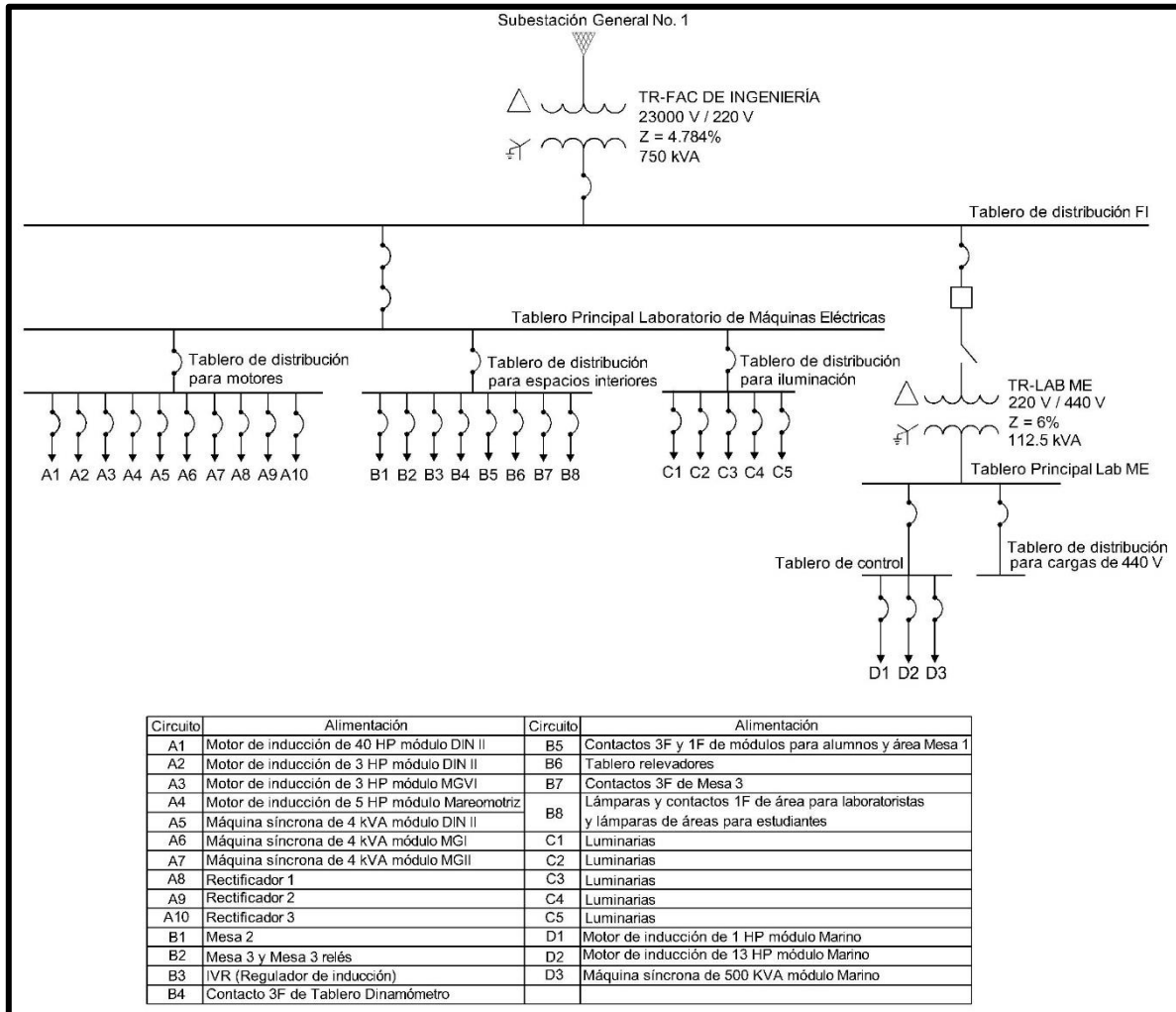


Figura 1.2 Diagrama unifilar propuesta del sistema eléctrico para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas

El dimensionamiento y selección de estos elementos se desarrolla en los capítulos posteriores.



CAPÍTULO 2. CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Los conductores eléctricos empleados en instalaciones eléctricas y sistemas de potencia son principalmente de cobre y aluminio debido a su conductividad eléctrica y a la adecuada relación entre costo y desempeño que ofrecen frente a otros materiales. Su función consiste en transportar corriente eléctrica.

La capacidad de conducción de corriente de un conductor está determinada por su sección transversal, la cual debe ser dimensionada de acuerdo con las condiciones de operación y con los criterios normativos aplicables. Un dimensionamiento correcto es indispensable para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema. En este sentido, un conductor subdimensionado puede sobrecalentarse al conducir corrientes superiores a su ampacidad provocando el deterioro del aislamiento y generar riesgo de incendios. Por otra parte, el sobredimensionamiento, aunque no representa un riesgo de seguridad conlleva un uso ineficiente y un aumento en costos.

2.1 Aislamiento del conductor

El aislamiento del conductor desempeña un papel esencial en la seguridad del sistema, su función consiste en proteger al conductor contra contactos accidentales, condiciones ambientales y esfuerzos mecánicos, no solo cubre al conductor, sino que constituye una barrera de protección frente a riesgos eléctricos. La selección del material aislante es tan importante como el dimensionamiento del propio conductor, pues de él depende la eficiencia a largo plazo de la instalación.

El Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería cuenta con un sistema eléctrico subterráneo en tubería con canalización desde registros, donde los conductores eléctricos son sometidos a factores como la humedad, el calor y el polvo. Con el tiempo, la acción combinada de estos factores provocó la degradación del material de aislamiento, lo que incrementa la probabilidad de fallas eléctricas.

En este contexto, resulta imprescindible la sustitución de los conductores eléctricos actuales por cables de nueva fabricación cuyo aislamiento cumpla con las especificaciones de las normas vigentes y ofrezca resistencia óptima frente a las condiciones ambientales presentes en la instalación.

2.1.1 Selección del aislamiento del conductor

Los aislamientos se dividen en dos grupos principales:

- a) De papel impregnado



Es un papel obtenido de pulpa de madera con celulosa de fibra larga, se impregna con aceite dieléctrico para mejorar las características de aislamiento. Los aceites más usuales son:

- Aceite viscoso.
- Aceite viscoso con resinas refinadas.
- Aceite viscoso con polímeros de hidrocarburos.
- Aceite de baja viscosidad.
- Parafinas microcristalinas del petróleo.

Los conductores eléctricos con aislamientos de papel impregnado se han utilizado para instalaciones en alta y extra alta tensión.

b) Aislamientos de tipo seco

Son compuestos cuya resina base se obtiene de la polimerización de determinados hidrocarburos. Se clasifican en dos tipos:

Termoplásticos (PVC): Son materiales poliméricos que cuando son sometidos al calor adquieren plasticidad y pueden moldearse con facilidad. Al enfriarse recuperan sus propiedades originales conservando la forma que se les haya conferido durante el proceso.

Termofijos (EP o XLP): Tras un proceso inicial de moldeo mediante calor estos materiales no vuelven a ablandarse en posteriores exposiciones térmicas, manteniendo de manera permanente su estructura.

Cada tipo de aislamiento tiene límites de temperatura en tres condiciones de operación.

Conductores con aislamiento termoplástico:

- Normal 90 °C
- Sobrecarga 105 °C
- Cortocircuito 150 °C

Conductores con aislamiento termofijo:

- Normal 90 °C
- Sobrecarga 130 °C
- Cortocircuito 250 °C

El aislamiento termofijo ofrece mayor seguridad en situaciones de sobrecarga y cortocircuito al tolerar temperaturas más altas antes de degradarse, esto significa que



tendrá mayor margen de seguridad frente a condiciones anormales de operación reduciendo el riesgo de falla eléctrica.

Por lo anterior se justifica la selección de conductores con aislamiento termofijo.

La Tabla 310-104(a).- Aplicaciones y aislamientos de conductores de 600 volts, de la NOM-001-SEDE-2012, proporciona la clasificación de los aislamientos por medio de tipo de materiales, los cuales dependiendo de sus aplicaciones previstas se seleccionará el adecuado de acuerdo con las condiciones del laboratorio.

Tabla 310-104(a).- Aplicaciones y aislamientos de conductores de 600 volts

Nombre genérico	Tipo	Temperatura máxima del conductor	Aplicaciones previstas	Aislamiento	Recubrimiento externo ¹
Termofijo resistente a la humedad	RHW	75 °C	Lugares secos y mojados	Termofijo resistente a la humedad y retardante a la flama	Recubrimiento no metálico, resistente a la humedad y retardante a la flama.
	RHW-2	90 °C			

Figura 2.1 Aplicaciones y aislamientos de conductores de 600 volts. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012 (<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

Consultando la Tabla 310-104(a) se selecciona el tipo de aislamiento RHW-2.

Características del aislamiento:

- Protege el conductor frente a la humedad y evita la filtración de agua, estas condiciones son comunes en instalaciones subterráneas y están presentes en los ductos y registros eléctricos del laboratorio.
- Tiene propiedades retardantes a la flama, lo cual es prioritario en el laboratorio ya que ante una falla eléctrica reduce la posibilidad que el fuego se inicie o se propague a lo largo del cableado resguardando la seguridad del personal y de la instalación.
- El aislamiento del conductor RHW-2 puede operar de manera continua con una temperatura de 90 °C, este tipo de conductores pueden transportar más corriente que los de 60 °C o de 75 °C sin sobrecalentarse.

Adicionalmente a los criterios de selección del tipo de aislamiento antes mencionados se propone el uso de conductores con aislamiento LS (Low Smoke), ya que proporciona una protección adicional ante condiciones críticas donde una sobrecarga o



cortocircuito ha provocado un incendio, este tipo de aislamiento posee una emisión reducida de humos y mínima emisión de gas ácido halogenado disminuyendo el riesgo para la salud del personal presente en el laboratorio producto de la descomposición del material. Asimismo, el aislamiento LS presenta resistencia a la propagación de fuego, lo que contribuye a limitar su expansión en la instalación eléctrica facilitando el combate del incendio.

2.2 Calibre del conductor eléctrico

La selección del calibre del conductor eléctrico es un aspecto fundamental en el diseño de la instalación, un calibre correctamente dimensionado permite que el conductor transporte la corriente eléctrica de manera eficiente sin sobrecalentarse, evitando la degradación prematura del aislamiento y posibles riesgos eléctricos.

El dimensionamiento del conductor eléctrico se realiza conforme a los criterios establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, la cual especifica los requisitos para la selección de calibres en función de las condiciones del sistema.

2.2.1 Dimensionamiento del conductor eléctrico para la alimentación de motores

Al tratarse de un entorno didáctico la operación de los motores está sujeta a condiciones específicas en las que varían los periodos de su funcionamiento. Por esta razón, se establece que el dimensionamiento del calibre de los conductores se realizará considerando una operación de servicio no continuo.

El artículo 430-22 inciso e) establece las condiciones para el dimensionamiento de conductores usados en aplicaciones de servicio no continuo. Estipula lo siguiente:

- e) Servicio no continuo. Los conductores para un motor usado en aplicaciones de corta duración, intermitentes, periódicas o variables deben tener ampacidad no menor al porcentaje del valor nominal de corriente de la placa de características del motor, mostrada en la Tabla 430-22(e). (Secretaría de Energía, 2012, p. 304)



Tabla 430-22(e).- Servicio por régimen de tiempo

Clasificación del servicio	Porcentajes del valor nominal de corriente de las placas de características			
	Motor especificado para	Motor especificado para	Motor especificado para	Motor especificado para funcionamiento
	5 minutos	15 minutos	30 y 60 minutos	continuo
Servicio de corto tiempo: Accionamiento de válvulas, elevación o descenso de rodillos, etc.	110	120	150	-
Servicio intermitente: Elevadores y montacargas, máquinas de herramientas, bombas, puentes levadizos, plataformas giratorias, etc. (Para soldadoras de arco, ver 630-11).	85	85	90	140
Servicio periódico: Rodillos, máquinas de manipulación de minerales y carbón, etc.	85	90	95	140
Servicio variable	110	120	150	200
Cualquier motor debe ser considerado como de ciclo continuo, a menos que la naturaleza de los aparatos sea tal que el motor no operará continuamente con carga bajo cualquier condición de operación.				

Figura 2.2 Servicio por régimen de tiempo. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012

(<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

La Tabla 430-22(e) define distintas clasificaciones de servicio que implican una demanda distinta sobre el motor:

Servicio intermitente: Operación por intervalos que alternan de:

- (1) con carga y sin carga; o
- (2) con carga y en reposo, o
- (3) con carga, sin carga y en reposo.

Servicio periódico: Operación intermitente en el que las condiciones de carga son regularmente recurrentes.

Servicio por tiempo corto: Operación a una carga prácticamente constante durante un tiempo especificado, corto y definido.

Servicio variable: Funcionamiento a cargas e intervalos de tiempo, donde ambos pueden variar dentro de una amplia gama. (Secretaría de Energía, 2012, p. 17)



De acuerdo con la Tabla 430-22(e), la ampacidad de los conductores que alimentan motores eléctricos debe dimensionarse considerando la clasificación del servicio y el tiempo específico de operación.

La operación de los motores utilizados en el laboratorio no es continua, durante una práctica de laboratorio con duración aproximada de dos horas los motores no operan continuamente, se ponen en marcha y se apagan dependiendo de la dinámica de la clase, pueden estar operando por periodos de tiempo cortos y luego estar inactivos mientras se realizan ajustes, mediciones, explicaciones teóricas, pruebas o cambios de configuración. A ello se considera el periodo de inactividad entre sesiones, el cual varía dependiendo de la programación de los horarios de clases.

Este patrón de funcionamiento corresponde a un servicio variable, ya que el tiempo de operación puede variar dentro de una amplia gama.

Aunque la duración total de una práctica es de aproximadamente dos horas, el tiempo real de operación de cada motor no excede los 30 o 60 minutos debido a las pausas necesarias. Por lo tanto, resulta técnicamente justificado utilizar el factor de ampacidad del 150 % indicado para tiempos de operación de 30 y 60 minutos de acuerdo con la Tabla 430-22(e).

En referencia a la nota al pie de la Tabla 430-22(e), “cualquier motor debe ser considerado como de ciclo continuo, a menos que la naturaleza de los aparatos sea tal que el motor no operará continuamente con carga bajo cualquier condición de operación”, se realiza el siguiente análisis para los motores instalados en el laboratorio.

Naturaleza del aparato:

Los motores forman parte de equipos didácticos destinado a fines académicos, como prácticas de medición y análisis de parámetros eléctricos y electromecánicos. No están destinados para accionar cargas mecánicas permanentes.

Condiciones de operación:

Se prevé que durante las prácticas los motores operen sin carga mecánica (en vacío). Las actividades previstas consideran pruebas de arranque, mediciones en vacío, determinación de parámetros y demostraciones conceptuales.

Bajo condiciones específicas y poco frecuentes los motores podrán operar con una carga reducida. Estas condiciones no representan la operación sostenida del equipo.

Duración y frecuencia de uso:



El uso de los motores está limitado a periodos cortos de funcionamiento, no se prevén ciclos prolongados de operación con cargas que generen esfuerzos considerables.

Evaluación conforme a la NOM:

Dado que en ninguna condición prevista el motor operará de forma continua con carga, y considerando que las únicas situaciones donde podría presentar carga son ocasionales y no representativas de la operación normal, la naturaleza del equipo cumple con la excepción establecida por la NOM.

El artículo 110-14 inciso c), inciso 1) establece los criterios para seleccionar el calibre adecuado. Estipula lo siguiente:

1) Disposiciones para el equipo. La determinación de las disposiciones para las terminales del equipo se debe basar en 110-14(c) (1)(a) o (c)(1)(b). A menos que el equipo esté aprobado y marcado de forma diferente, la ampacidad del conductor utilizada para determinar las disposiciones para los terminales del equipo se debe basar en la Tabla 310-15(b)(16) y según las modificaciones adecuadas de 310-15(b)(7).

a. Las terminales de equipos para circuitos de 100 amperes o menos o marcadas para conductores con tamaño 2.08 mm² a 42.4 mm² (14 AWG a 1 AWG), deben utilizarse solamente en uno de los siguientes:

(1) Conductores con temperatura de operación del aislamiento de 60 °C.

(2) Conductores con temperatura de operación del aislamiento mayor, siempre y cuando la ampacidad de estos conductores se determine tomando como base la ampacidad a 60 °C del tamaño del conductor usado.

(3) Conductores con temperatura de operación del aislamiento mayor, si el equipo está aprobado e identificado para tales conductores.

(4) Para motores marcados con las letras de diseño B, C, D o E, se permite el uso de conductores que tienen un aislamiento con temperatura de operación de 75 °C o mayor siempre y cuando la ampacidad de tales conductores no exceda de la ampacidad para 75 °C.

b. Las disposiciones para las terminales del equipo para circuitos con un valor nominal mayor que 100 amperes, o marcadas para conductores de tamaño mayor que 42.4 mm² (1 AWG) se deben usar solamente para uno de los siguientes:

(1) Conductores con temperatura de operación del aislamiento de 75 °C.



(2) Conductores con temperatura de operación del aislamiento mayor, siempre y cuando la ampacidad de tales conductores no exceda la ampacidad a 75 °C. Este tipo de conductores también pueden utilizarse si el equipo está aprobado e identificado para uso con tales conductores. (Secretaría de Energía, 2012, p. 21)

2.2.2 Aplicación del factor de corrección por temperatura

Dado que la Tabla 310-15(b)(16) toma como referencia ampacidades para 30 °C se debe considerar la temperatura ambiente máxima del lugar en el cual el conductor se va a instalar y consultar la Tabla 310-15(b)(2)(a) para aplicar el factor de temperatura.

Tabla 310-15(b)(2)(a).- Factores de Corrección basados en una temperatura ambiente de 30 °C.

Para temperaturas ambiente distintas de 30 °C, multiplique las anteriores ampacidades permisibles por el factor correspondiente de los que se indican a continuación:			
Temperatura ambiente (°C)	Rango de temperatura del conductor		
	60 °C	75 °C	90 °C
10 o menos	1.29	1.2	1.15
11-15	1.22	1.15	1.12
16-20	1.15	1.11	1.08
21-25	1.08	1.05	1.04
26-30	1.00	1.00	1.00
31-35	0.91	0.94	0.96
36-40	0.82	0.88	0.91
41-45	0.71	0.82	0.87
46-50	0.58	0.75	0.82
51-55	0.41	0.67	0.76
56-60	-	0.58	0.71
61-65	-	0.47	0.65
66-70	-	0.33	0.58
71-75	-	-	0.5
76-80	-	-	0.41
81-85	-	-	0.29

Figura 2.3 Factores de Corrección basados en una temperatura ambiente de 30 °C. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012 (<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

Debido a que no se dispone de mediciones específicas de temperatura, para efectos de dimensionamiento, se adoptó como temperatura ambiente de diseño el valor máximo promedio registrado en la Ciudad de México (28.3 °C). La selección de este valor constituye un criterio conservador, pues representa la condición de temperatura más alta, la cual se encuentra dentro del intervalo de 26–30 °C con un factor de corrección de 1.00 considerado por la Tabla 310-15(b)(2)(a).

Con base en el factor de ampacidad de 150 % definido por la Tabla 430-22(e) y en la aplicación de las disposiciones establecidas en el artículo 110-14(c), se realiza el cálculo del dimensionamiento del calibre de los conductores que alimentarán a los motores eléctricos del laboratorio.

El dimensionamiento de los conductores se realiza considerando una temperatura de 90 °C, este criterio se adopta con el fin de aprovechar la capacidad térmica del aislamiento pudiendo transportar más corriente sin sobrecalentarse obteniendo un mayor margen de seguridad.

2.2.2.1 Motor de corriente directa del módulo MGI.

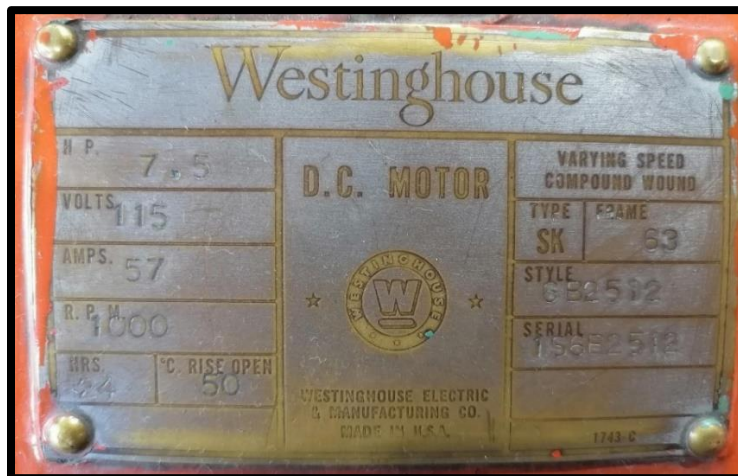


Figura 2.4 Placa de datos característica motor de corriente directa módulo MGI

La corriente nominal en la placa de datos del motor corresponde a 57 A. El factor de 150 % del valor nominal de corriente del motor es:

$$I = (57 A)(1.5) = 85.5 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(2) al tratarse de un circuito de menos de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 60 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 2 AWG.

Se realiza el mismo procedimiento para determinar el calibre del conductor de los motores de corriente directa de los módulos MGII, Motor Serie y MGIV.

2.2.2.2 Máquina síncrona del módulo MGI.

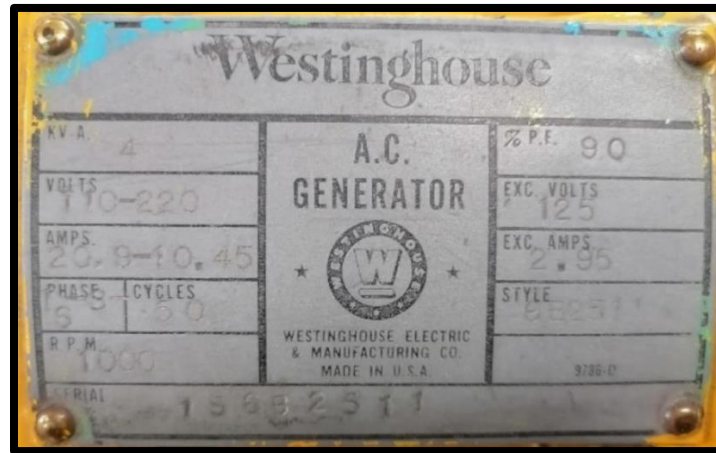


Figura 2.5 Placa de datos característica máquina síncrona módulo MGI

La máquina está diseñada para operar como generador de polos salientes o como motor síncrono. Para determinar el calibre de los conductores de la máquina se asumirá su operación como motor síncrono, el cual de acuerdo con el catálogo del fabricante posee una potencia de 6 HP.

La corriente nominal en la placa de datos del motor corresponde a 10.45 A. El factor de 150 % del valor nominal de corriente del motor es:

$$I = (10.45 A)(1.5) = 15.675 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(2) al tratarse de un circuito de menos de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 60 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 12 AWG.

Se realiza el mismo procedimiento para determinar el calibre del conductor de la máquina síncrona de los módulos MGII, MGVI y DIN II.

2.2.2.3 Motor de inducción del módulo DIN I.

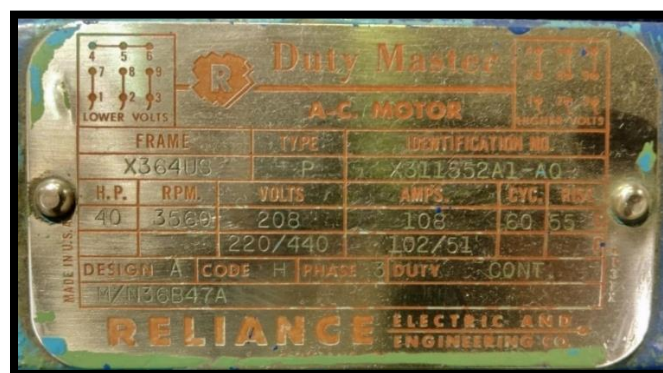


Figura 2.6 Placa de datos característica motor de inducción módulo DIN I

La corriente nominal en la placa de datos del motor corresponde a 102 A. El factor de 150 % del valor nominal de corriente del motor es:

$$I = (102 A)(1.5) = 153 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 75 °C. Consultando la *Tabla 310.15(b)(16)* el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 2/0 AWG.

2.2.2.4 Motor de inducción del módulo DIN II.

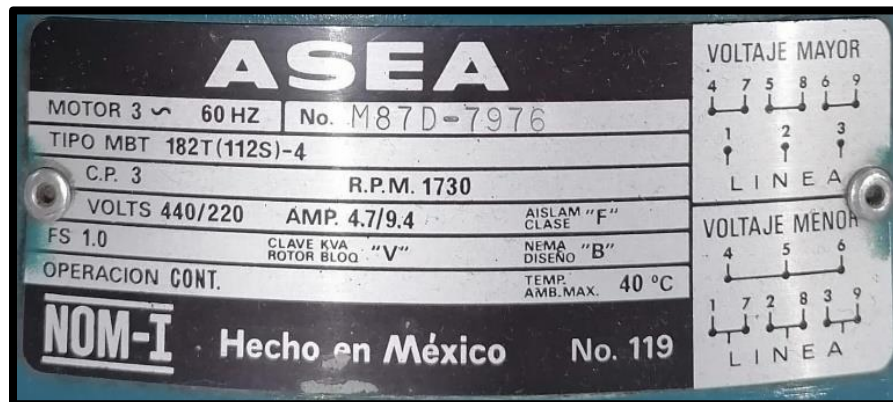


Figura 2.7 Placa de datos característica motor de inducción módulo DIN II

La corriente nominal en la placa de datos del motor corresponde a 9.4 A. El factor de 150 % del valor nominal de corriente del motor es:

$$I = (9.4 A)(1.5) = 14.1 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(4) al tratarse de un motor marcado con letra de diseño B el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 75 °C. Consultando la *Tabla 310.15(b)(16)* el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 14 AWG.

Se realiza el mismo procedimiento para determinar el calibre del conductor del motor de inducción del módulo MM y MGVI.

2.2.2.5 Máquina síncrona del módulo Marino.

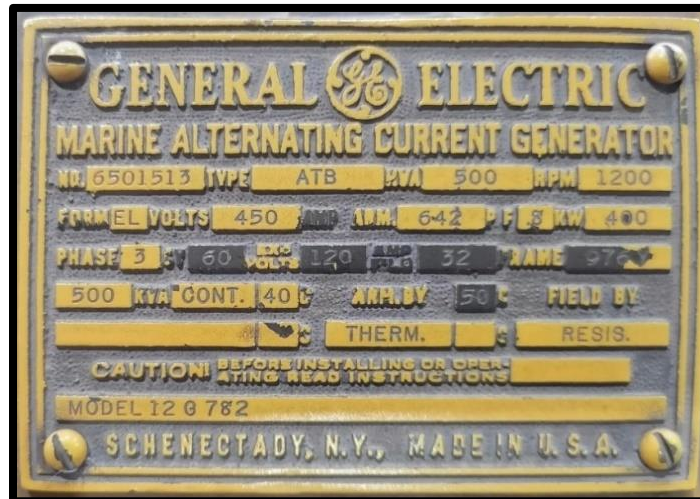


Figura 2.8 Placa de datos característica máquina síncrona módulo Marino

El módulo Marino constituye el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”.

Dicho sistema está conformado por un conjunto de máquinas eléctricas rotatorias, una máquina síncrona de 500 kVA acoplada mecánicamente a dos máquinas de corriente directa, una excitatriz de 55 kW y una máquina de 75 kW. El arranque del sistema se efectúa mediante un motor de inducción de rotor devanado de 13 HP el cual se encuentra acoplado a la máquina síncrona de 500 kVA mediante una banda.

El sistema cuenta con un instructivo de operación, en el cual se establecen las disposiciones técnicas y procedimientos necesarios para su puesta en marcha, operación y detención.

El punto 13 del instructivo establece que, para alcanzar la tensión nominal de salida de 110 V en el generador de 75 kW, la corriente consumida por el motor síncrono no deberá exceder de 100 A.

13.- Una vez conectado el motor síncrono a la línea, el motor de inducción de rotor devanado queda fuera y la corriente del motor síncrono oscilará entre 15-35 Amp. C.A. para lograr el voltaje nominal de salida 110 V.C.C. del generador de 75 KW hacia la carga externa, deberán operar simultáneamente los dos réostatos "A" y "B"; mientras se disminuye el voltaje generado por medio del réostato "A", se incrementa el voltaje por medio del réostato "B", vigilando que la corriente que tome el motor síncrono no debe sobrepasar los 100 Amp. C.A. y el voltaje generado no deberá ser mayor a 480 volts.

Figura 2.9 Instructivo de operación “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”.

La máquina síncrona posee una corriente nominal de 642 A, sin embargo, de acuerdo con el instructivo de operación no alcanza su magnitud nominal mientras opera como motor síncrono, por lo tanto, para efectos del dimensionamiento de los conductores se asume como corriente nominal el valor de 100 A, ya que constituye el límite práctico dentro del sistema.

El factor de 150 % del valor nominal de corriente del motor es:

$$I = (100 A)(1.5) = 150 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 75 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 1/0 AWG.

2.2.2.6 Máquina de corriente directa de 75 KW del módulo Marino.



Figura 2.10 Placa de datos característica máquina de corriente directa módulo Marino

La máquina de corriente directa posee una corriente nominal de 682 A, opera como generador dentro del sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”.

Para el dimensionamiento de los conductores se ha establecido una corriente máxima de salida de 100 A, equivalente al 14.66 % de la corriente nominal del generador considerando que operará principalmente sin carga, solo en situaciones específicas se realizaran pruebas con cargas reducidas. Dicha magnitud de corriente representa un margen de diseño, no implica que el generador opere frecuentemente a esa magnitud, en la práctica se espera que la corriente de operación sea considerablemente menor, empleándose este valor como referencia límite y suficiente

para observar el funcionamiento del generador sin comprometer la seguridad del personal.

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(2) al tratarse de un circuito de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 60 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 1 AWG.

2.2.2.7 Dinamómetro del módulo DIN I.

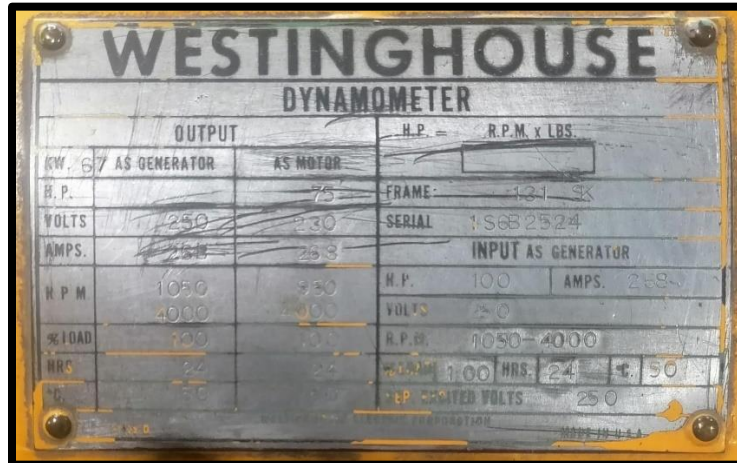


Figura 2.11 Placa de datos característica dinamómetro módulo DIN I

El dinamómetro posee una corriente nominal de 268 A y opera como generador.

De forma equivalente al criterio adoptado para el generador de corriente directa del sistema “Grupo Motor-Generador del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UNAM” se ha decidido establecer una corriente máxima de salida de 100 A para el dimensionamiento de los conductores, esta limitación se adopta considerando que el equipo será empleado principalmente para pruebas experimentales donde no es necesario alcanzar su corriente nominal. La corriente de 100 A se define como un margen de diseño seguro.

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(2) al tratarse de un circuito de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de 60 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor a utilizar para alimentar el motor es 1 AWG.

2.2.2.8 Sistema de excitación de CD.

El artículo 285-26 de la NOM-001-SEDE-2012 estipula lo siguiente. “285-26. Tamaño del conductor. Los conductores de puesta a tierra y de línea no deben ser menores al tamaño 2.08 mm² (14 AWG) de cobre.” (Secretaría de Energía, 2012, p.117)



Los conductores de línea se encargan de transportar la energía eléctrica a la máquina, manejan corrientes mayores que los conductores de excitación, sin embargo, se ha optado por establecer el mismo criterio para su dimensionamiento.

Puesto que los amperes de excitación de las máquinas no superan los 5 A corresponde utilizar conductores de calibre 14 AWG.

2.2.2.9 Rectificadores de CA a CD.

El artículo 430-22(a) establece que

Para motores de corriente continua que operan desde una fuente de alimentación rectificadora, la ampacidad del conductor en la entrada del rectificador no debe ser menor al 125 por ciento de la corriente nominal de entrada al rectificador. Para motores de corriente continua que operan desde una fuente de alimentación monofásica rectificadora, los conductores entre las terminales de alambrado del campo del rectificador y el motor, deben tener una ampacidad no menor al siguiente porcentaje del valor nominal de corriente de plena carga del motor:

- (1) El 190 por ciento, cuando se use un puente rectificador monofásico de media onda.
- (2) El 150 por ciento, cuando se use un puente rectificador monofásico de onda completa. (Secretaría de Energía, 2012, p.304)

De acuerdo con el artículo, la ampacidad del conductor en la entrada del rectificador no debe ser menor al 125 por ciento de la corriente nominal de entrada al rectificador.

Los rectificadores transforman la corriente alterna en corriente directa para alimentar cargas, la estimación de la corriente de entrada en el lado de corriente alterna del rectificador se realiza tomando como referencia la carga de mayor demanda en corriente directa, correspondiente a los motores de 7.5 HP de los módulos MGI y MGII.

Considerando una eficacia del rectificador de 90% para alimentar los motores de corriente directa de 7.5 HP:

$$P_{CA} = \frac{5.5927 \text{ KW}}{0.9} = 6214.11 \text{ W}$$
$$I_{Entrada} = \frac{6214.11 \text{ W}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})(0.79)} = 20.64 \text{ A}$$

Realizando el cálculo, la ampacidad de los conductores es la siguiente:

$$I = (20.64)(1.25) = 25.8 \text{ A}$$



La determinación del calibre de los conductores se realiza de acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(a)(2). Consultando la Tabla 310.15(b)(16) se identifica que el calibre correspondiente es 10 AWG.

2.2.3 Dimensionamiento del conductor eléctrico para circuitos alimentadores.

Los circuitos alimentadores son conductores eléctricos que transportan la energía eléctrica desde una fuente principal hasta un nodo o bus secundario, su función consiste en alimentar un conjunto de circuitos derivados.

Los circuitos derivados son conductores eléctricos que transportan la energía eléctrica hasta el punto de carga. Transportan corrientes de menor magnitud en comparación con los circuitos de alimentación.

El artículo 220 parte C proporciona los métodos de cálculo para dimensionar los conductores de los alimentadores y acometidas, donde la carga calculada no debe ser menor a la suma de las cargas en los circuitos derivados alimentados.

El dimensionamiento de los conductores de los circuitos alimentadores del laboratorio se realiza conforme al criterio establecido por el artículo 220-50, “220-50. Motores. Las cargas de motores se deben calcular de acuerdo con 430-24, 430-25 y 430-26. Y con 440-6 para motores de compresores herméticos de refrigeración.” (Secretaría de Energía, 2012, p.48)

En cumplimiento de lo anterior, el cálculo de los conductores se efectúa aplicando los criterios establecidos en el Artículo 430-24. El artículo estipula lo siguiente:

430-24. Varios motores o motores y otras cargas. Los conductores que alimentan varios motores o motores y otras cargas deben tener una ampacidad no menor a la suma de cada uno de los siguientes:

- (1) 125 por ciento de la corriente nominal de plena carga del motor con el valor nominal más alto.
- (2) La suma de las corrientes nominales de plena carga de todos los otros motores del grupo.
- (3) 100 por ciento de las cargas no continuas que no son motores.
- (4) 125 por ciento de las cargas continuas que no son motores. (Secretaría de Energía, 2012, p.305)



2.2.3.1 Alimentador del módulo Marino.

El módulo Marino correspondiente al sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM” es alimentado a través del Tablero de Control ubicado a un costado del módulo, la subestación eléctrica del laboratorio alimenta el Tablero de Control mediante un circuito alimentador. Los motores de corriente alterna que integran el sistema son una máquina síncrona de 500 kVA, un motor de inducción de 13 HP empleado para el arranque del sistema y un motor de inducción de 1 HP destinado a accionar la bomba encargada de la lubricación de las chumaceras.

En este contexto, los motores de corriente alterna del sistema constituyen los circuitos derivados, el Tablero de Control constituye el nodo o bus secundario y la subestación eléctrica del laboratorio constituye la fuente principal de alimentación.

De acuerdo con el artículo 430-24, el dimensionamiento de los conductores de alimentación está sujeto a diferentes factores. Tomando en consideración que las máquinas están contempladas para uso didáctico y solo para casos específicos funcionaran con carga, se asumirá el funcionamiento del sistema en vacío, de esta forma se descartan los puntos (3) y (4) del artículo. La ecuación para determinar la ampacidad de los conductores queda expresada de la siguiente forma:

$$I_{Alimentador} = (1.25)(I_{Motor\ mayor}) + I_{Demás\ motores} \quad (1)$$

La excepción 1 del artículo indica que:

Cuando uno o más de los motores del grupo se utilicen para servicio de corta duración, intermitente, periódico o variable, el valor nominal en amperes de dichos motores utilizada en la suma, se debe determinar de acuerdo con 430-22(e). En la suma se debe utilizar el motor de mayor capacidad y debe ser uno de los dos valores siguientes: valor nominal de corriente en amperes de 430-22(e) o la corriente más alta de plena carga en servicio continuo del motor multiplicada por 1.25. (Secretaría de Energía, 2012, p.305)

Considerando lo establecido por la excepción 1 del artículo, el motor de mayor capacidad de las máquinas de corriente alterna que integran el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM” es la máquina síncrona de 500 KVA. Se establece que en la suma se debe utilizar el motor de mayor capacidad y debe ser el valor nominal de corriente en amperes multiplicada por el factor considerado en el artículo 430-22(e) o la corriente más alta de plena carga en servicio continuo del motor multiplicada por 1.25.



Dimensionar los conductores con base en la corriente más alta de plena carga llevaría a un sobredimensionamiento sin aportar beneficios de operación. Por lo tanto, se toma como referencia la condición real y máxima de operación (100 A), ya que es el límite práctico de consumo de la máquina dentro del sistema.

Se estableció que el calibre de los conductores que alimentan a los motores se dimensiona usando el factor de 150 por ciento correspondiente a un servicio variable especificado para 30 y 60 minutos de la Tabla 430-22(e).

De acuerdo con el artículo 430-22(e) corresponde un valor de:

$$I = (1.5)(100) = 150 A$$

La máquina síncrona de 500 kVA y los motores de inducción de 1 HP Y 13 HP no operan simultáneamente, solo el motor de inducción de 1 HP y la máquina síncrona de 500 kVA se mantienen funcionando desde el inicio hasta el final de la operación del sistema, por lo cual para determinar la ampacidad del conductor para el alimentador del sistema se asumirá solo la operación de la máquina síncrona de 500 kVA y el motor de inducción de 1 HP.

Sustituyendo los valores en la ecuación (1) el resultado obteniendo es el siguiente:

$$I_{Alimentador} = (1.25)(150) + 2.1 = 189.6 A$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de operación de aislamiento de 75 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor de alimentación del sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM” es 3/0 AWG.

2.2.3.2 Alimentador del laboratorio de máquinas eléctricas.

De acuerdo con el artículo 430-24 y tomando en cuenta las condiciones de la instalación, la ecuación para determinar la ampacidad requerida de los conductores queda expresada de la siguiente forma:

$$I_{Alimentador} = (1.25)(I_{Motor\ mayor}) + I_{Demás\ motores} + I_{Cargas\ no\ continuas} \quad (2)$$

$I_{Cargas\ no\ continuas}$ de las cargas que no son motores corresponden a fuentes de alimentación LabVolt, televisores, rectificadores para la alimentación de cargas con corriente directa, luminarias, focos, computadoras y relevadores que se utilizan para las prácticas de laboratorio de la asignatura de Protección de Sistemas Eléctricos, teniendo un consumo de corriente aproximado de 162.66 A.



Demás motores corresponde una magnitud de 45.89 A correspondiente a la suma de la corriente de plena carga del motor de 3 HP del módulo MGVI, del motor de 5 HP del módulo MM, de la máquina síncrona de 4 kVA y del motor de 3 HP del módulo DIN II.

Motor mayor corresponde al motor de inducción de 40 HP del módulo DIN I, es el motor con la mayor demanda de corriente nominal.

Debido al funcionamiento de las distintas áreas del laboratorio donde las cargas presentan condiciones de operación variables y no simultáneas, dificulta establecer una demanda promedio o constante para el dimensionamiento de los conductores del alimentador del laboratorio de máquinas eléctricas, el cual corresponde a los conductores del tablero principal. Por esta razón se ha optado por dimensionar los conductores con base en la demanda máxima posible que puede presentarse, este criterio conservador asegura que los conductores no queden subdimensionados.

Sustituyendo los valores en la ecuación (2) el resultado obteniendo es el siguiente:

$$I_{Alimentador} = (1.25)(153) + 45.89 + 162.66 = 399.8 \text{ A}$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de operación de aislamiento de 75 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) se identifica que el calibre de los conductores para el alimentador del tablero principal es 600 kcmil.

2.2.3.3 Alimentador devanado primario y devanado secundario transformador del laboratorio de máquinas eléctricas.

El sistema "Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM" era alimentado a través de la subestación del laboratorio mediante un transformador trifásico de 75 kVA, con una tensión nominal de 6.3 kV en el devanado primario y 440 V en el devanado secundario. Su corriente nominal en el devanado secundario es la siguiente:

$$I_{Transformador} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} V_{LL}} = \frac{75 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 98.41 \text{ A}$$

De acuerdo con el punto 13 del instructivo de operación del sistema, para alcanzar la tensión nominal de salida de 110 V en el generador de 75 kW, la corriente consumida por el motor síncrono no debe exceder de 100 A.

La corriente de 100 A que toma el motor síncrono es mayor que la corriente de 98.41 A que puede suministrar el transformador de 75 kVA, esto puede generar problemas al



transformador ya que si es forzado a entregar más corriente de la nominal puede sobrecalentarse y dañarse.

Para su operación segura se propone la sustitución del transformador actual por una unidad de mayor potencia.

Se recomienda la instalación de un transformador tipo seco, este tipo de equipo es adecuado para ambientes interiores como el laboratorio. Su diseño aislado reduce los riesgos asociados al contacto accidental con partes energizadas y mejora las condiciones de seguridad.

La Tabla 16 – Valores nominales de tensión de impedancia para transformadores tipo seco de la NMX-J-351-1-ANCE-2016 establece los valores en kVA junto con la tensión de impedancia en % para transformadores monofásicos y trifásicos.

Tabla 16 – Valores nominales de tensión de impedancia para transformadores tipo seco

Monofásicos		Trifásicos	
kVA	Tensión de impedancia en %	kVA	Tensión de impedancia en %
15	1.5 – 6.0	15	1.5 – 6.0
25	1.5 – 6.0	30	1.5 – 6.0
37.5	1.5 – 6.0	45	1.5 – 6.0
50	1.5 – 6.0	75	1.5 – 6.0
75	3.0 – 7.0	112.5	1.5 – 6.0
100	3.0 – 7.0	150	1.5 – 6.0
167	3.0 – 7.0	225	3.0 – 7.0
250	5.0 – 8.0	300	3.0 – 7.0
333	5.0 – 8.0	500	4.5 – 8.0
500	5.0 – 8.0	750	5.0 – 8.0
667	5.0 – 8.0	1000	5.0 - 8.0
833	5.0 – 8.0	1500	5.0 – 8.0
		2000	5.0 - 8.0
		2500	5.0 - 8.0
		3000	5.0 – 9.0
		3750	5.0 – 9.0
		5000	5.0 – 9.0
		7500	5.0 – 9.0
		10000	5.75 – 12.0
		12000	5.75 – 12.0
		16000	7.5 – 12.0
		20000	7.5 – 12.0
		30000	7.5 – 12.0

Figura 2.12 Valores nominales de tensión de impedancia para transformadores tipo seco. De “NMX-J-351-1-ANCE-2016: Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia tipo secos-Especificaciones”, por la Asociación de Normalización y Certificación, 2016.



De acuerdo con la Tabla 16 el valor mayor inmediato a 75 kVA es 112.5 kVA, con esa magnitud de potencia la corriente de salida en el devanado secundario es la siguiente:

$$I_{Transformador} = \frac{112.5 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 147.61 \text{ A}$$

La magnitud de corriente es mayor al consumo del motor síncrono, de esta forma no se producirán problemas en el transformador ya que no será forzado a entregar más corriente de la nominal. Puesto que la condición actual del nivel de tensión en el laboratorio es de 220 V se deberá utilizar un transformador trifásico elevador de 220 V a 440 V.

Características eléctricas del transformador:

- Tipo: Trifásico
- Capacidad: 112.5 kVA
- Tensiones de operación: 220 V devanado primario, 440 V devanado secundario.
- Conexión de los devanados: Delta- Estrella.

Una vez definidas las características del transformador propuesto se dimensionan los conductores para el alimentarlo.

El artículo 620-13 inciso c) de la NOM-001-SEDE-2012 estipula lo siguiente:

“c) Conductores que alimentan un solo transformador. Los conductores que alimenten un solo transformador deberán tener una ampacidad no menor que la corriente de placa del transformador, más otras cargas conectadas.” (Secretaría de Energía, 2012, p.530)

La corriente nominal en el devanado primario del transformador es la siguiente:

$$I_{Transformador} = \frac{112.5 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 295.23 \text{ A}$$

Para el dimensionamiento de los conductores que alimentan al transformador se considera que dichos conductores se destinan exclusivamente a su alimentación sin otras cargas conectadas al circuito. Por lo tanto, la ampacidad de los conductores no deberá ser menor a la corriente nominal en el devanado primario:

$$I_{Alimentador} = 295.23 \text{ A}$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de operación de aislamiento de 75 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16)



el calibre del conductor eléctrico para el alimentador de la subestación del laboratorio es 350 kcmil.

La corriente nominal en el devanado secundario del transformador es la siguiente:

$$I_{Transformador} = \frac{112.5 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 147.61 \text{ A}$$

De acuerdo con las disposiciones establecidas por el artículo 110-14(c)(1)(b)(2) al tratarse de un circuito de más de 100 A el calibre se dimensiona con base en una temperatura de operación de aislamiento de 75 °C. Consultando la Tabla 310.15(b)(16) el calibre del conductor eléctrico para el alimentador de la subestación del laboratorio es 1/0 AWG.

2.3 Resultados.

Los resultados obtenidos se organizan en una tabla de resumen presentando la información de manera ordenada, concisa y de fácil interpretación. En esta tabla se relaciona cada elemento con el calibre de conductor seleccionado.

Elemento	Calibre
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	2/0 AWG
Dinamómetro módulo DIN I	1 AWG
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	14 AWG
Máquinas síncronas 4 kVA módulo DIN II	12 AWG
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	2 AWG
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	12 AWG
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	2 AWG
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	12 AWG
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	3 AWG
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGVI	8 AWG
Máquina síncrona 5 KVA módulo MGVI	12 AWG
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	14 AWG
Motor de inducción 5 HP módulo MM	12 AWG
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	10 AWG
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	14 AWG
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	1/0 AWG
Máquina de CD de 75 KW módulo Marino	1 AWG
Rectificadores CA-CD	10 AWG
Alimentador módulo Marino	3/0 AWG
Alimentador Laboratorio Máquinas Eléctricas	600 kcmil
Alimentador primario TR-Laboratorio ME	350 kcmil
Alimentador secundario TR-Laboratorio ME	1/0 AWG
Alimentador sistema de excitación de CD	14 AWG

Tabla 2.1 Dimensionamiento de conductores



CAPÍTULO 3. CAÍDA DE TENSION.

La caída de tensión es la diferencia de voltaje que se produce entre el inicio y el final de un conductor cuando circula corriente a través de él. Esto ocurre porque los conductores no son un medio ideal para transportar la energía eléctrica, tienen resistencia al paso de la corriente, lo que provoca que parte de la energía se disipe en forma de calor generando una reducción del voltaje en el punto de consumo. Una reducción significativa del voltaje puede afectar el funcionamiento de los equipos y el consumo energético, por lo cual la caída de tensión se debe mantener bajo un límite que garantice la eficiencia de la instalación, concretamente por los siguientes aspectos:

- **Correcto funcionamiento de los equipos:** Una caída de tensión excesiva provoca que los equipos trabajen con menor voltaje del nominal, lo que puede reducir su rendimiento.
- **Eficiencia energética:** Cuando el voltaje disminuye de manera significativa aumenta la corriente demandada para mantener la misma potencia, esto incrementa las pérdidas por efecto Joule en los conductores y reduce la eficiencia de la instalación.
- **Optimización:** Permite dimensionar los conductores de forma adecuada evitando sobredimensionamientos innecesarios que encarecen la instalación sin aportar beneficios de operación o subdimensionamientos que comprometen el desempeño.

3.1 Caída de tensión.

Los límites máximos de caída de tensión están establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, el cálculo de la caída de tensión se realiza conforme a los criterios establecidos en la norma.

El artículo 210-19(a)(1)Nota 4 estipula lo siguiente:

Los conductores de circuitos derivados como están definidos en el Artículo 100, dimensionados para evitar una caída de tensión mayor que 3 por ciento en la salida más lejana que alimente a cargas de calefacción, de fuerza, de alumbrado o cualquier combinación de ellas y en los que la caída máxima de tensión combinada de los circuitos alimentadores y de los circuitos derivados hasta el contacto más lejano no supere 5 por ciento, proporcionarán una razonable eficiencia de funcionamiento. Para la caída de tensión de los conductores de los circuitos alimentadores, véase la NOTA 2 de 215-2(a)(3). (Secretaría de Energía, 2012, p.36)



Este límite ayuda a garantizar que los equipos funcionen con buena eficiencia.

La caída de tensión en circuitos monofásicos de corriente alterna o circuitos de corriente directa se determina mediante la siguiente ecuación:

$$e\% = \frac{200 \cdot I \cdot L \cdot (R \cos(\theta) + X \operatorname{sen}(\theta))}{EFFn} \quad (3)$$

La caída de tensión en circuitos trifásicos de corriente alterna se determina mediante la siguiente ecuación:

$$e\% = \frac{173 \cdot I \cdot L \cdot (R \cos(\theta) + X \operatorname{sen}(\theta))}{EFF} \quad (4)$$

Donde:

$e\%$: Caída de tensión en porcentaje.

I : Corriente que circula por los conductores [A].

L : Longitud desde el inicio del circuito a la carga [km].

R : Resistencia del conductor [Ω /km].

X : Reactancia del conductor [Ω /km].

$\cos(\theta)$: Factor de potencia

θ : Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente.

EFF : Tensión del sistema entre fases [V].

$EFFn$: Tensión del sistema fase – neutro [V].

El capítulo 10 de la NOM-001-SEDE-2012 Tabla 8.- Propiedades de los conductores (Secretaría de Energía, 2012, p.750) proporciona los valores de resistencia en corriente continua para los conductores eléctricos, la Tabla 9.- Resistencia y reactancia en corriente alterna para los cables para 600 volts, 3 fases a 60 Hz y 75 °C. Tres conductores individuales en un tubo conduit (Secretaría de Energía, 2012, p.751) proporciona los valores de resistencia y reactancia en corriente alterna, debido a que los valores están establecidos a una temperatura de 75 °C es necesario corregir la resistencia a una temperatura de 90 °C, puesto que es la temperatura de aislamiento a la que se seleccionaron los conductores.

La resistencia corregida se determina mediante la siguiente ecuación:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] \quad (5)$$

Donde:

R_2 : Resistencia corregida en [Ω/km].

R_1 : Resistencia de referencia a 75 °C en [Ω/km].

α : Coeficiente de temperatura de cobre a 75 °C ($\alpha = 0.00323$).

T_2 : Temperatura del conductor.

Con el propósito de obtener un cálculo más preciso de la caída de tensión en los circuitos de corriente alterna se empleó un analizador de redes para medir y registrar los valores reales de tensión entre fases y el factor de potencia del sistema. Esto permite reemplazar los valores nominales por datos reales de operación mejorando la exactitud del cálculo. Las mediciones realizadas obtuvieron una tensión de 225 V y un factor de potencia de 0.79.

Se desarrollan cálculos teóricos que posteriormente se implementarán en un entorno de simulación con el propósito de evaluar el comportamiento previsto según los resultados teóricos.

3.1.1 Caída de tensión para el motor de corriente directa del módulo MGI.

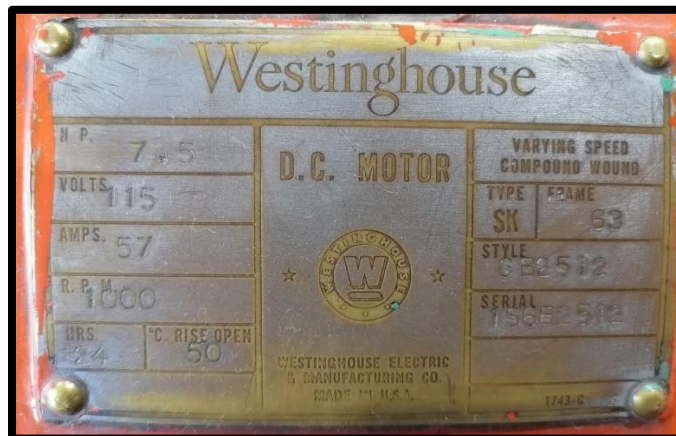


Figura 3.1 Placa de datos característica motor de corriente directa módulo MGI

La placa de datos del motor indica el voltaje y corriente nominales de la máquina, 115 V y 57 A.

Los parámetros para realizar el cálculo de caída de tensión son los siguientes:

$$I = 57 \text{ A}$$

$$L = 0.021175 \text{ [km]}$$

Conductor 2 AWG

$$R = 0.634 [\Omega/\text{km}]$$

$$X = 0$$

$$\cos(\theta) = 1$$

$$EF_n = 115 \text{ V}$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (5) se realiza el cálculo para determinar el valor de la resistencia corregida:

$$R_2 = (0.634)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.664 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (3) se realiza el cálculo para determinar el valor de la caída de tensión, se obtiene el siguiente resultado:

$$e\% = \frac{200 \cdot (57) \cdot (0.021175) \cdot (0.664)}{115} = 1.39 \%$$

Se comprueba que la caída de tensión recomendada está dentro del 3%.

El mismo procedimiento se aplica para la determinación de la caída de tensión en los motores de corriente continua correspondientes a los módulos MGII, Motor Serie y MGIV. En cada motor se consideran los valores nominales de tensión y corriente, la longitud total del circuito desde la fuente de alimentación hasta el punto de carga, así como la resistencia del conductor de alimentación debidamente corregida.

3.1.2 Caída de tensión para el motor de inducción del módulo DIN II.

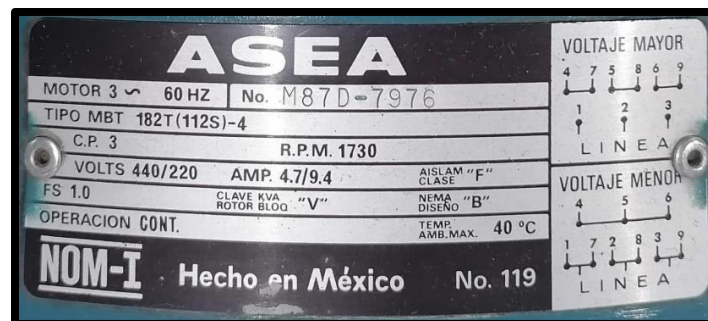


Figura 3.2 Placa de datos característica motor de inducción módulo DIN II

La placa de datos del motor indica el voltaje y corriente nominales de la máquina, 220 V y 9.4 A.

Los parámetros para realizar el cálculo de caída de tensión son los siguientes:



$$I = 9.4 \text{ A}$$

$$L = 0.0379[\text{km}]$$

Conductor 14 AWG

$$R = 10.2 [\Omega/\text{km}]$$

$$X = 0.24 [\Omega/\text{km}]$$

$$\cos(\theta) = 0.79$$

$$EFF = 225 \text{ V}$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (5) se realiza el cálculo para determinar el valor de la resistencia corregida:

$$R_2 = (10.2)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 10.6 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (4) se realiza el cálculo para determinar el valor de la caída de tensión, se obtiene el siguiente resultado:

$$e\% = \frac{173 \cdot (9.4) \cdot (0.0379) \cdot [(10.6)(0.79) + (0.24)(0.613)]}{225} = 2.33 \%$$

Se comprueba que la caída de tensión recomendada está dentro del 3%.

El mismo procedimiento se aplica para la determinación de la caída de tensión en los motores de inducción correspondientes a los módulos DIN I, DIN II, MGVI, MM y Marino, y las máquinas síncronas de los módulos DIN II, MGI, MGII y Marino. En cada motor se consideran los valores nominales de tensión y corriente, la longitud total del circuito desde la fuente de alimentación hasta el punto de carga, así como la resistencia del conductor de alimentación debidamente corregida.

Bajo el mismo criterio se calcula la caída de tensión en los conductores alimentadores módulo Marino, laboratorio de máquinas eléctricas, devanado primario y devanado secundario del transformador del laboratorio de máquinas eléctricas.

3.2 Flujos de potencia mediante ETAP.

Se presentan los flujos de potencia del sistema eléctrico del laboratorio con el objetivo de analizar el comportamiento de la red y evaluar la caída de tensión en los distintos circuitos. Este análisis permite verificar el desempeño de los conductores y asegurar que las condiciones de operación se mantengan dentro de los parámetros establecidos por la NOM-001-SEDE-2012.

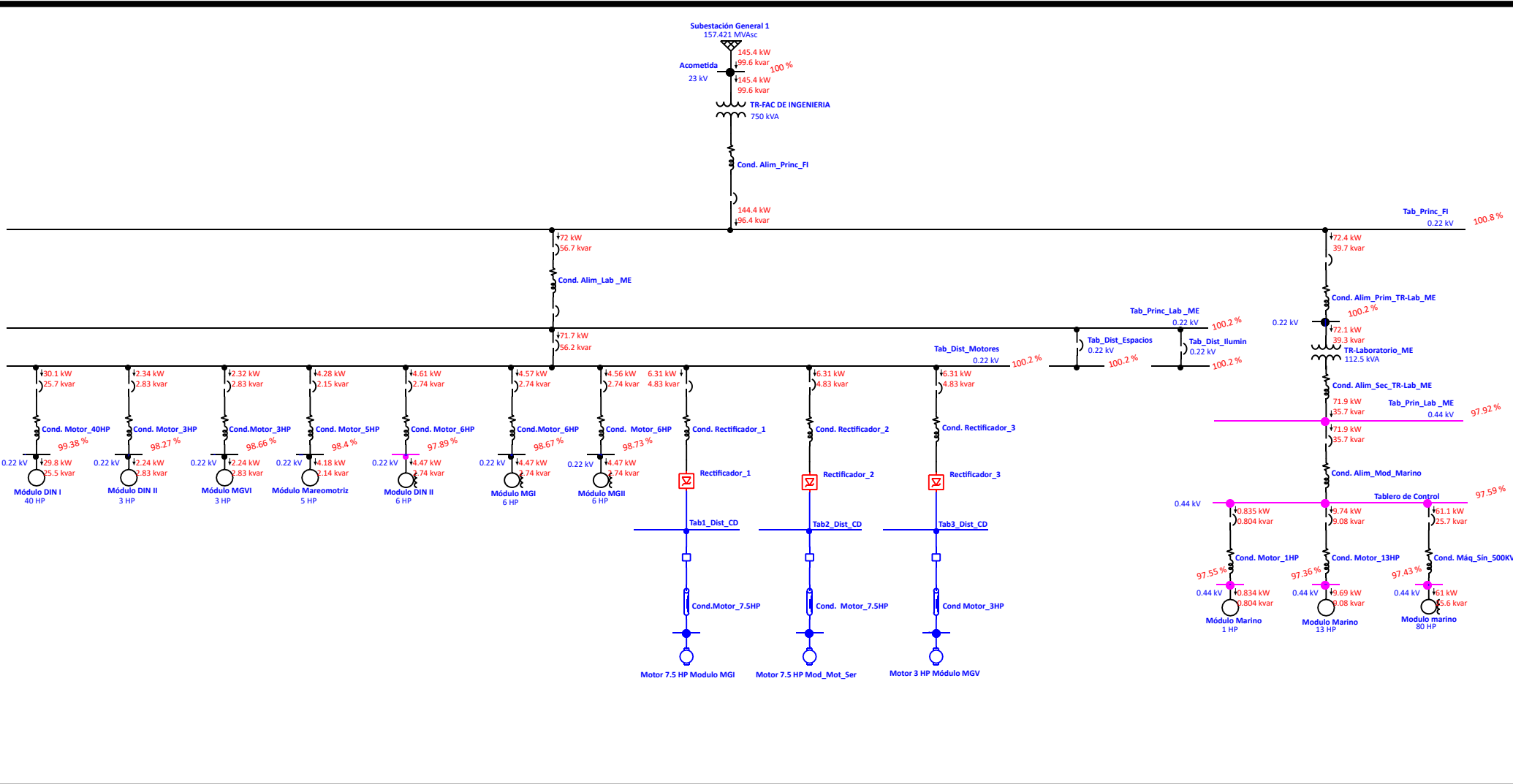


Figura 3.3 Flujos de potencia en CA

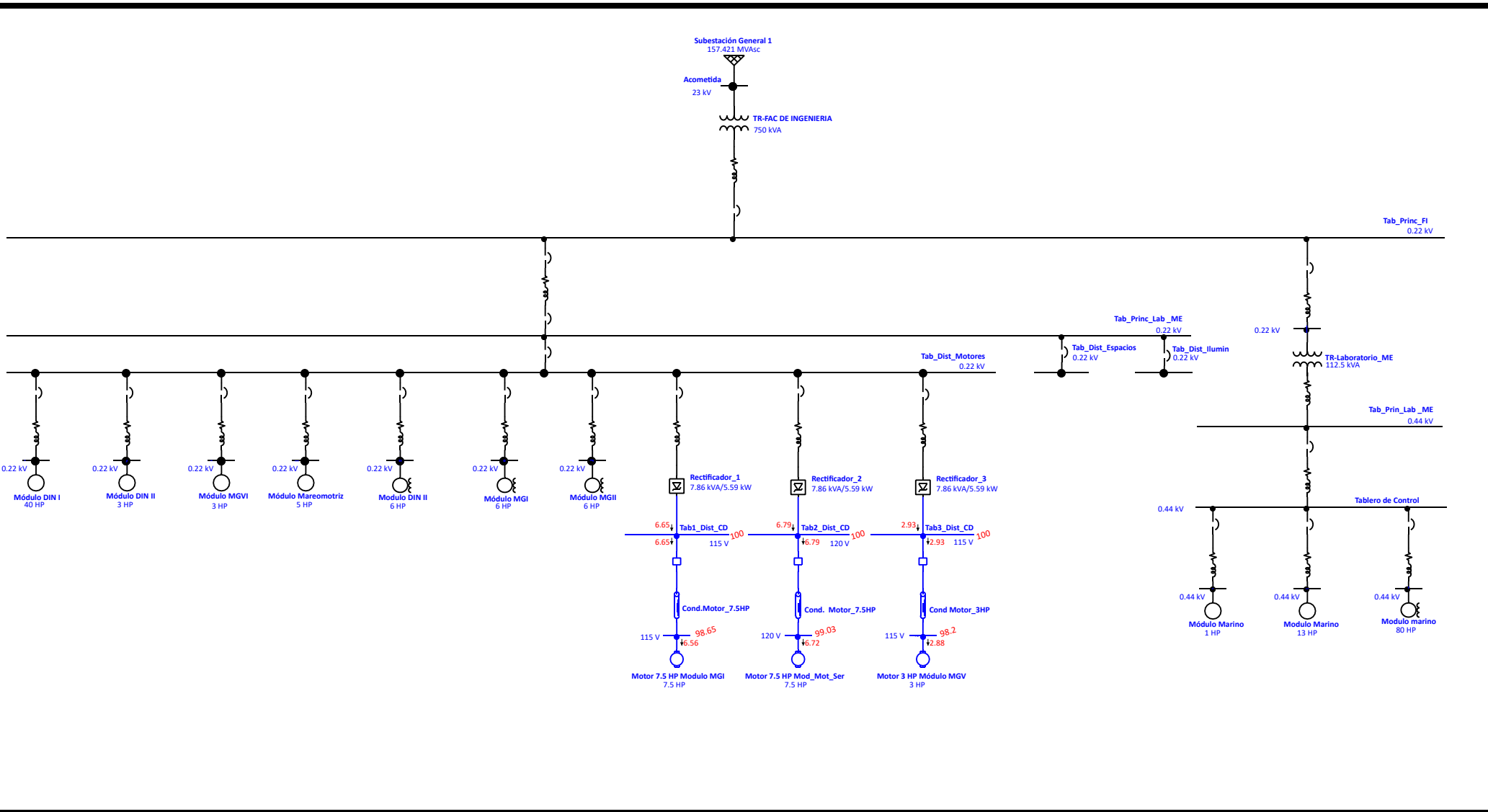


Figura 3.4 Flujos de potencia en CD

3.3 Resultados.

Elemento	e %
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	0.77
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	2.33
Máquina síncrona 4 kVA módulo DIN II	1.60
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	1.76
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	1.06
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	1.73
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	1.02
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	0.79
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGVI	1.84
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	1.86
Motor de inducción 5 HP módulo MM	1.52
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	0.27
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	0.04
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	0.16
Alimentador módulo Marino	0.31
Alimentador Laboratorio de Máquinas Eléctricas	0.77
Alimentador primario TR-Laboratorio ME	0.81
Alimentador secundario TR-Laboratorio ME	0.21

Tabla 3.1 Resultados teóricos cálculo de caída de tensión

Elemento	e %
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	99.38
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	98.27
Máquina síncrona 4 kVA módulo DIN II	97.89
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	98.65
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	98.67
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	98.65
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	98.73
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	99.03
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGVI	98.2
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	98.66
Motor de inducción 5 HP módulo MM	98.4
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	97.36
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	97.55
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	97.43
Alimentador módulo Marino	97.59
Alimentador Laboratorio de Máquinas Eléctricas	100.2
Alimentador primario TR-Laboratorio ME	100.2
Alimentador secundario TR-Laboratorio ME	97.92

Tabla 3.2 Resultados caída de tensión mediante simulación en ETAP

Al comparar los resultados de caída de tensión de forma teórica con los simulados en ETAP se comprueba que ambos se mantienen dentro de los límites establecidos por la NOM-001-SEDE-2012. Esto confirma la adecuada selección de los conductores.



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO.

El objetivo del estudio de cortocircuito es proporcionar información sobre las corrientes del sistema eléctrico del laboratorio durante condiciones de falla. La aplicación del análisis de cortocircuito permite:

- Conocer corrientes esperadas durante una falla eléctrica en diferentes puntos del sistema eléctrico identificando dónde se presentan las corrientes más críticas.
- Determinar la capacidad interruptiva de los dispositivos de protección para que puedan soportar e interrumpir las corrientes de cortocircuito sin sufrir daños ni comprometer su funcionamiento.
- Diseñar una red de tierras determinando la magnitud de las corrientes que la red deberá soportar y disipar de forma segura.
- Seleccionar conductores de alimentación para garantizar que resistan las corrientes de cortocircuito hasta que actúe la protección.
- Diseñar una coordinación de protecciones eficaz estableciendo el ajuste adecuado de los dispositivos de protección, de modo que actúen con rapidez, precisión y selectividad ante la presencia de un cortocircuito asegurando la continuidad en el suministro eléctrico.

Naturaleza de las corrientes de cortocircuito

Una corriente de cortocircuito es aquella que circula en un circuito eléctrico cuando existe el contacto entre dos o más conductores sin aislamiento o entre ellos y tierra. La magnitud de la corriente que se produce es mucho mayor que la corriente nominal o de carga que circula por el circuito.

En condiciones normales de operación la carga consume una corriente proporcional al voltaje aplicado y a la impedancia de la propia carga, si se presenta un cortocircuito la impedancia en el punto de origen de la falla disminuye generando una corriente de magnitud muy alta.

Fuentes de corriente de cortocircuito

Cuando se determinan las magnitudes de las corrientes de cortocircuito es importante considerar la contribución de todas las fuentes disponibles y contar con el valor de sus



reactancias características para poder calcular con precisión las corrientes de falla en distintos puntos del sistema.

Existen cuatro fuentes básicas de corriente de cortocircuito.

- a) Generadores
- b) Motores síncronos
- c) Motores de inducción
- d) Sistema de la compañía suministradora

4.1 Método de cálculo.

Se realizan estudios teóricos que posteriormente serán implementados en un entorno de simulación con el fin de observar el comportamiento esperado de acuerdo con la teoría y verificar que el sistema eléctrico cumple con los resultados obtenidos.

El presente análisis de cortocircuito del sistema eléctrico del laboratorio se realiza mediante el método de valores en por unidad.

Principio básico:

El método constituye la aplicación del teorema de Thevenin al sistema eléctrico en estudio. Se establece una base de potencia expresada en kVA o MVA y una base de tensión expresada en kV, sobre las bases las impedancias del sistema se convierten a valores en por unidad (p.u.), una vez establecidas las impedancias a una base común el sistema eléctrico se reduce a una impedancia equivalente en el punto de falla mediante combinaciones en serie o en paralelo.

La corriente de cortocircuito se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} \quad (6)$$

La corriente en Amperes se determina multiplicando la corriente en por unidad por la corriente base:

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} \quad (7)$$

Donde:

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}}{\sqrt{3} \times kV_{base}} \quad (8)$$

4.1.1 Procedimiento.



- a) Diagrama unifilar: Se muestra la representación gráfica y simplificada del sistema eléctrico donde se identifican todos los elementos que lo conforman mediante símbolos estandarizados.
- b) Selección de cantidades base: Se establece una base de potencia, expresada en kVA o MVA, y una base de tensión, expresada en kV.
- c) Conversión de impedancias a una base común: Todas las impedancias del sistema se convierten a valores en por unidad (p.u.), con el objetivo de construir el diagrama de impedancias del sistema.
- d) Diagrama de impedancias en por unidad: Se obtiene la representación del sistema donde se pueden identificar los puntos de falla para comparar los niveles en distintos puntos del sistema al ocurrir un cortocircuito.
- e) Reducción de la red en cada punto de falla y cálculo de corrientes de cortocircuito: El diagrama de impedancias se reduce a una impedancia equivalente en el punto de falla mediante combinaciones sucesivas en serie o en paralelo.

Consideraciones

- Se realiza el cálculo de cortocircuito trifásico a fin de conocer las condiciones más exigentes de falla que pueden presentarse en el sistema eléctrico.
- Se desprecian las cargas no lineales y las cargas de alumbrado.
- Reactancia subtransitoria para motores de inducción y máquinas síncronas según el IEEE Std 141-1993:
Motores de inducción: $X=0.28\%$
Máquinas síncronas: $X=0.15\%$
(IEEE, 1993, Tablas 4-2 y 4A-1)

4.1.2 Aplicación.

a) Diagrama unifilar

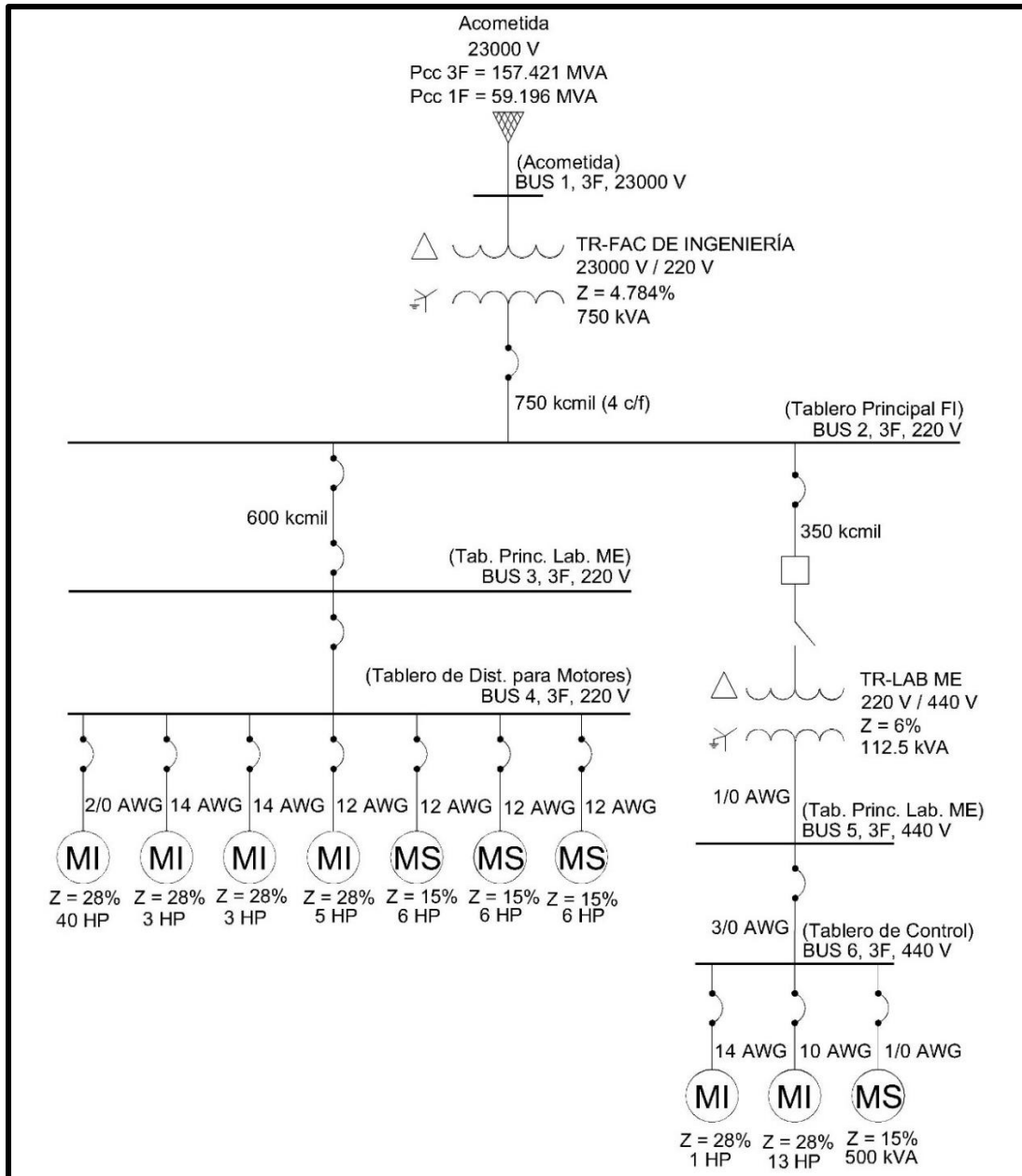


Figura 4.1 Diagrama unifilar

b) Selección de cantidades base

El laboratorio recibe su alimentación a través de la Subestación General No. 1. Para llevar a cabo el análisis de cortocircuito es necesario conocer la potencia de cortocircuito disponible en dicha subestación, la cual se determina a partir del nivel de corriente de cortocircuito en el punto de conexión.



El nivel de cortocircuito trifásico en el punto de conexión corresponde a una corriente de 3951.62 A. El nivel de cortocircuito monofásico corresponde a una corriente de 2573.74 A.

$$P_{CC\ 3F} = (\sqrt{3})(23\ kV)(3951.62\ A) = 157.421\ MVA$$

$$P_{CC\ 1F} = (23\ kV)(2573.74\ A) = 59.196\ MVA$$

El valor de potencia de cortocircuito trifásico será utilizado para el desarrollo del estudio de cortocircuito del sistema eléctrico del laboratorio.

Selección de cantidades base

En BUS 1: Potencia base = 0.75 MVA, Voltaje base = 23 kV

c) Conversión de impedancias a una base común

Reactancias de secuencia positiva y negativa

Acometida

$$X_{p.u.} = \frac{KVA_{base}}{KVA_{acometida}} \quad (9)$$

$$X_{p.u.} = \frac{0.75\ MVA}{157.421\ MVA} = 0.0047j$$

Transformadores

$$X_{p.u.} = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{KVA_{base}}{KVA_{Transformador}} \quad (10)$$

Transformador de 750 KVA

$$X_{p.u.} = \frac{4.784}{100} \cdot \frac{750}{750} = 0.0478j$$

Transformador de 112.5 KVA

$$X_{p.u.} = \frac{6}{100} \cdot \frac{750}{112.5} = 0.4j$$

Motores

$$X_{p.u.} = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{KVA_{base}}{KVA_{Motor}} \quad (11)$$

Motor de inducción de 40 HP

$$X_{p.u.} = \frac{28}{100} \cdot \frac{0.750}{0.040} = 5.25j$$

Motores de inducción de 3 HP

$$X_{p.u.} = \frac{28}{100} \cdot \frac{0.750}{0.003} = 70j$$

Motor de inducción de 5 HP

Máquinas síncronas de 4 kVA (6 HP)



$$X_{p.u.} = \frac{28}{100} \cdot \frac{0.750}{0.005} = 42j$$

$$X_{p.u.} = \frac{15}{100} \cdot \frac{0.750}{0.006} = 18.75j$$

Motor de inducción de 13 HP

$$X_{p.u.} = \frac{28}{100} \cdot \frac{0.750}{0.013} = 16.15j$$

Motor de inducción de 1 HP

$$X_{p.u.} = \frac{28}{100} \cdot \frac{0.750}{0.001} = 210j$$

Máquina síncrona de 500 KVA

$$X_{p.u.} = \frac{15}{100} \cdot \frac{0.750}{0.5364} = 0.2097j$$

Conductores eléctricos

$$Z_{base} = \frac{(KVA_{base})^2}{MVA_{base}} \quad (12)$$

$$Z_{base\ 220\ V} = \frac{(0.22)^2}{0.75} = 0.0645\ \Omega$$

$$Z_{base\ 440\ V} = \frac{(0.44)^2}{0.75} = 0.2581\ \Omega$$

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{total}}{Z_{base}} \quad (13)$$

Se consulta la Tabla 9 de la NOM-001-SEDE-2012 para obtener los valores de resistencia y reactancia de los conductores, debido a que la temperatura de aislamiento a la que se seleccionaron los conductores es de 90 °C es necesario corregir su resistencia mediante la ecuación (5).

Conductores: Cable de cobre, aislamiento RHW-2, 90 °C, 600 Volts.

1) Motor de inducción de 40 HP módulo DIN I, 220 V

Conductor: Calibre 2/0 AWG, Longitud = 26.362 metros

$$Z = 0.33 + 0.177j\ [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (0.33)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.34$$

$$Z_{total} = (0.34 + 0.177j\ [\Omega/\text{km}])(0.026362\ [\text{km}]) = 0.0089 + 0.0046j\ [\Omega]$$



$$Z_{p.u.} = 0.1379 + 0.0713j$$

2) Motor de inducción de 3 HP módulo DIN II, 220 V

Conductor: Calibre 14 AWG, Longitud = 37.9 metros

$$Z = 10.2 + 0.24j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (10.2)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 10.6$$

$$Z_{\text{total}} = (10.6 + 0.24j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.0379 \text{ } [\text{km}]) = 0.4017 + 0.0090j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 6.2279 + 0.1395j$$

3) Motor de inducción de 3 HP módulo MGVI, 220 V

Conductor: Calibre 14 AWG, Longitud = 30.28 metros

$$Z = 10.2 + 0.24j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (10.2)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 10.6$$

$$Z_{\text{total}} = (10.6 + 0.24j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.03028 \text{ } [\text{km}]) = 0.3209 + 0.0072j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 4.9751 + 0.1116j$$

4) Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo DIN II, 220 V

Conductor: Calibre 12 AWG, Longitud = 35.79 metros

$$Z = 6.6 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (6.6)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 6.9$$

$$Z_{\text{total}} = (6.9 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.03579 \text{ } [\text{km}]) = 0.2469 + 0.0079j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 3.8279 + 0.1224j$$

5) Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo MGI, 220 V



Conductor: Calibre 12 AWG, Longitud = 23.77 metros

$$Z = 6.6 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (6.6)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 6.9$$

$$Z_{\text{total}} = (6.9 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.02377 \text{ } [\text{km}]) = 0.1640 + 0.0053j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 2.5426 + 0.0821j$$

6) Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo MGII, 220 V

Conductor: Calibre 12 AWG, Longitud = 22.89 metros

$$Z = 6.6 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (6.6)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 6.9$$

$$Z_{\text{total}} = (6.9 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.02289 \text{ } [\text{km}]) = 0.1579 + 0.0051j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 2.4480 + 0.0790j$$

7) Motor de inducción de 5 HP módulo Mareomotriz, 220 V

Conductor: Calibre 12 AWG, Longitud = 30.04 metros

$$Z = 6.6 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (6.6)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 6.9$$

$$Z_{\text{total}} = (6.9 + 0.223j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.03004 \text{ } [\text{km}]) = 0.2072 + 0.0066j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 3.2124 + 0.1023j$$

8) Motor de inducción de 13 HP módulo Marino, 380 V

Conductor: Calibre 10 AWG, Longitud = 10.75 metros

$$Z = 3.9 + 0.207j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:



$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (3.9)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 4$$

$$Z_{total} = (4 + 0.207j [\Omega/km])(0.01075 [km]) = 0.043 + 0.0022j [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 0.1666 + 0.0085j$$

9) Motor de inducción de 1 HP módulo Marino, 440 V

Conductor: Calibre 14 AWG, Longitud = 9.8 metros

$$Z = 10.2 + 0.240j [\Omega/km]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (10.2)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 10.6$$

$$Z_{total} = (10.6 + 0.240j [\Omega/km])(0.0098[km]) = 0.1038 + 0.0023j [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 0.4021 + 0.0089j$$

10) Máquina síncrona de 500 kVA módulo Marino, 440 V

Conductor: Calibre 1/0 AWG, Longitud = 10.35 metros

$$Z = 0.39 + 0.18j [\Omega/km]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.39)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.4$$

$$Z_{total} = (0.4 + 0.18j [\Omega/km])(0.01035[km]) = 0.0041 + 0.0018j [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 0.0158 + 0.0069j$$

11) Alimentador módulo Marino, 440 V

Conductor: Calibre 3/0 AWG, Longitud = 24.82 metros

$$Z = 0.259 + 0.171j [\Omega/km]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.259)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.271$$

$$Z_{total} = (0.271 + 0.171j [\Omega/km])(0.02482 [km]) = 0.0067 + 0.0042j [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 0.0259 + 0.0162j$$



12) Alimentador Laboratorio de Máquinas Eléctricas, 220 V

Conductor: Calibre 600 kcmil, Longitud = 19.82 metros

$$Z = 0.082 + 0.157j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.082)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.085$$

$$Z_{\text{total}} = (0.085 + 0.157j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.01982 \text{ } [\text{km}]) = 0.0016 + 0.0031j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0248 + 0.0480j$$

13) Alimentador secundario transformador laboratorio de máquinas eléctricas, 440 V

Conductor: Calibre 1/0 AWG, Longitud = 9 metros

$$Z = 0.39 + 0.18j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.39)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.4$$

$$Z_{\text{total}} = (0.4 + 0.18j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.009 \text{ } [\text{km}]) = 0.0036 + 0.0016j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0139 + 0.0061j$$

14) Alimentador primario transformador laboratorio de máquinas eléctricas, 220 V

Conductor: Calibre 350 kcmil, Longitud = 17.82 metros

$$Z = 0.128 + 0.164j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.128)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.134$$

$$Z_{\text{total}} = (0.134 + 0.164j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.01782 \text{ } [\text{km}]) = 0.0023 + 0.0029j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0356 + 0.0449j$$

15) Alimentador principal FI, 220 V

Conductor: Calibre 750 kcmil, 4 conductores por fase, Longitud = 50 metros

$$Z = 0.069 + 0.157j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.069)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.072$$

$$Z = 0.072 + 0.157j / 4 = 0.018 + 0.03925j$$

$$Z_{\text{total}} = (0.018 + 0.03925j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.05 \text{ } [\text{km}]) = 0.0009 + 0.0019j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0139 + 0.0294j$$

d) Diagrama de impedancias en por unidad

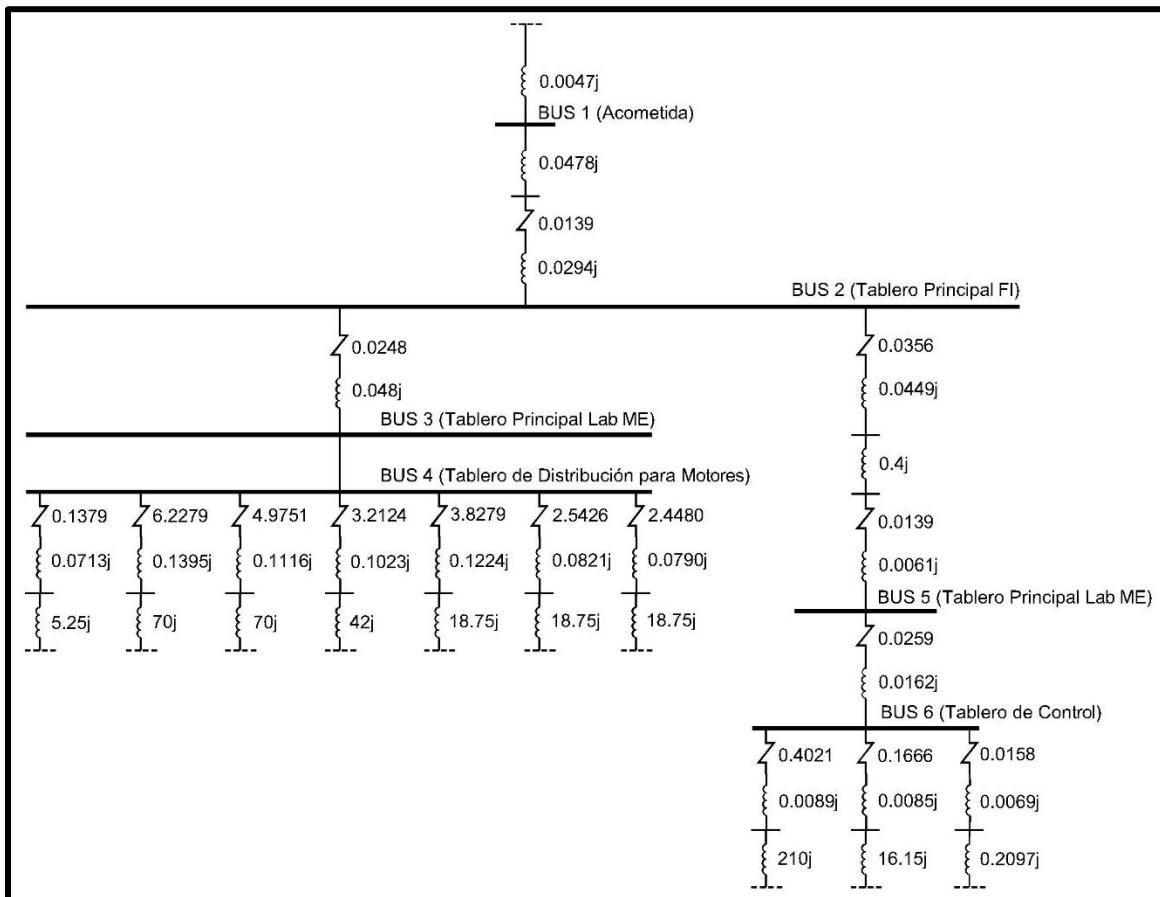


Figura 4.2 Diagrama de impedancias

e) Reducción de la red en cada punto de falla

El valor nominal de tensión del sistema en el BUS 3 es de 220 V, sin embargo, las mediciones realizadas con el analizador de redes registraron una magnitud de 225 V. Esta magnitud representa las condiciones reales de operación, por ello, en el cálculo de la corriente de cortocircuito en p.u. se consideró el valor real de la tensión en el punto de análisis, incluyendo las caídas de tensión previas a la falla en el BUS 3 y los

buses que representan las terminales de los motores que alimenta. Este criterio permite obtener resultados más precisos y representativos del comportamiento del sistema eléctrico, mejorando la exactitud de los niveles de cortocircuito.

BUS 1

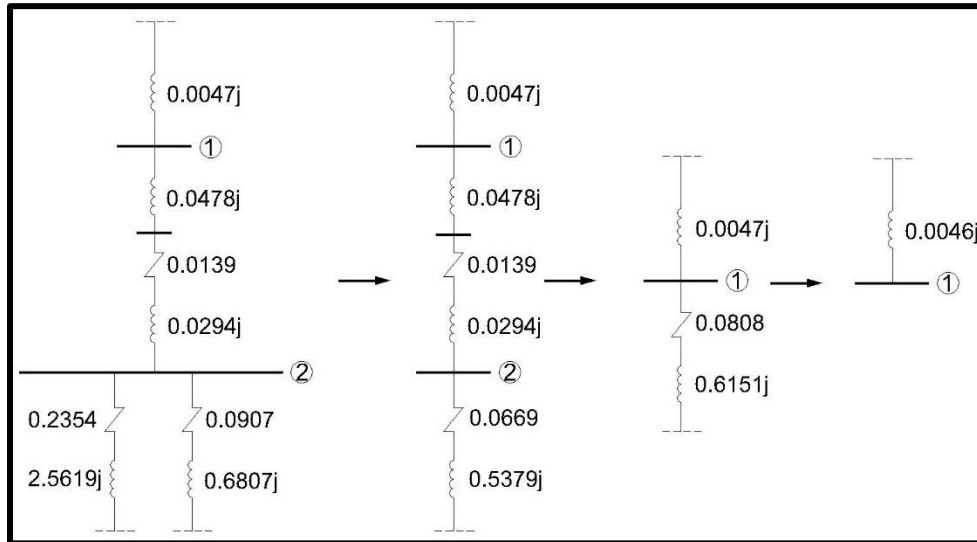


Figura 4.3 Impedancia equivalente en BUS 1

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0046j = 0.0046 \angle 90^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1}{0.0046} = 217.391 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(23 \text{ kV})} = 18.826 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (217.391)(18.826) = 4.092 \text{ kA}$$

BUS 2

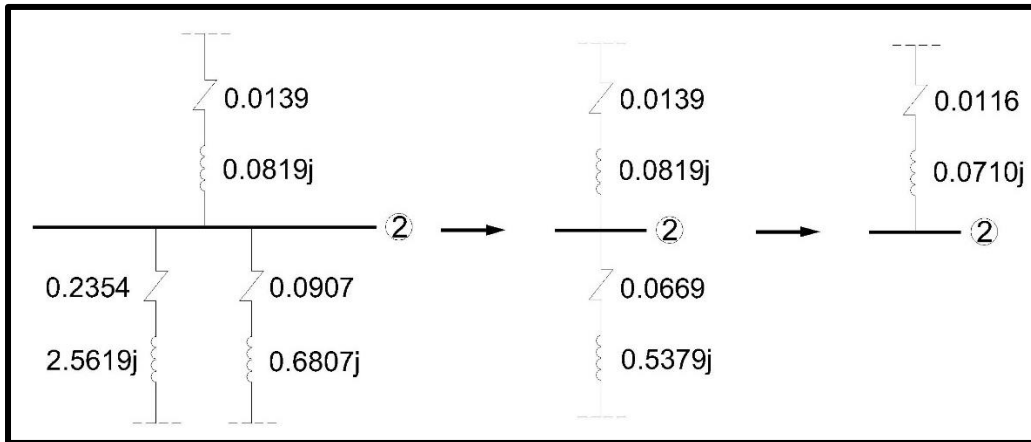


Figura 4.4 Impedancia equivalente en BUS 2

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0116 + 0.0710j = 0.0719 \angle 80.72^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1}{0.0719} = 13.908 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (13.908)(1968.239) = 27.374 \text{ kA}$$

BUS 3

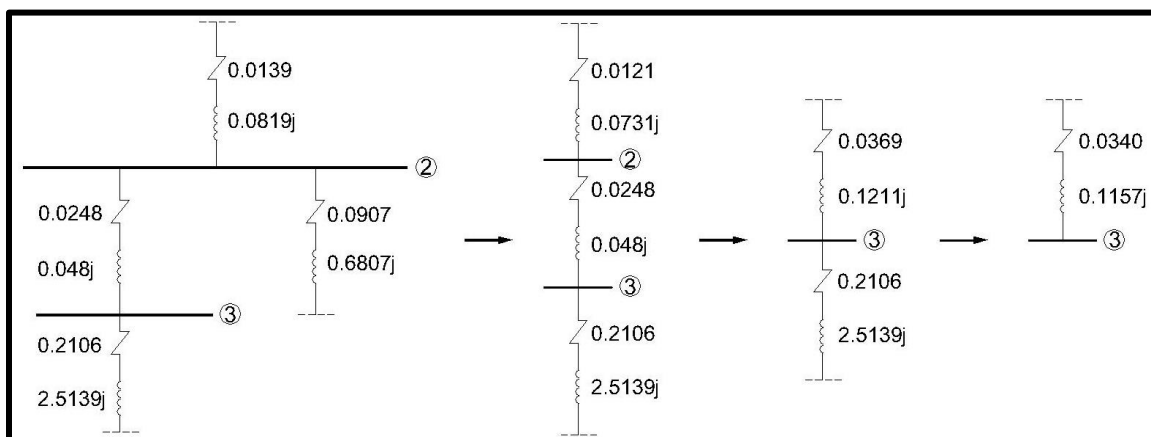


Figura 4.5 Impedancia equivalente en BUS 3

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0340 + 0.1157j = 0.1205 \angle 73.62^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.014}{0.1205} = 8.414 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (8.414)(1968.239) = 16.56 \text{ kA}$$

Corriente de cortocircuito BUS 3 = BUS 4

BUS 5

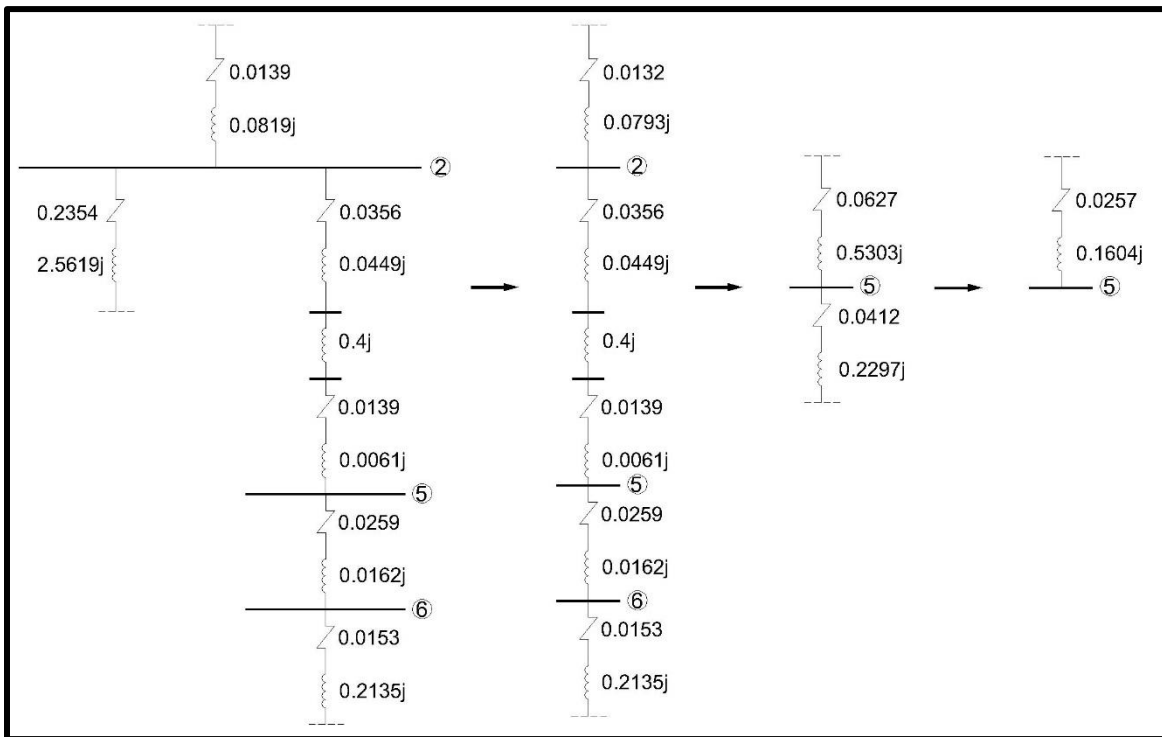


Figura 4.6 Impedancia equivalente en BUS 5

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0257 + 0.1604j = 0.1624 \angle 80.89^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1}{0.1624} = 6.157 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 984.119 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (6.157)(984.119) = 6.059 \text{ kA}$$

BUS 6

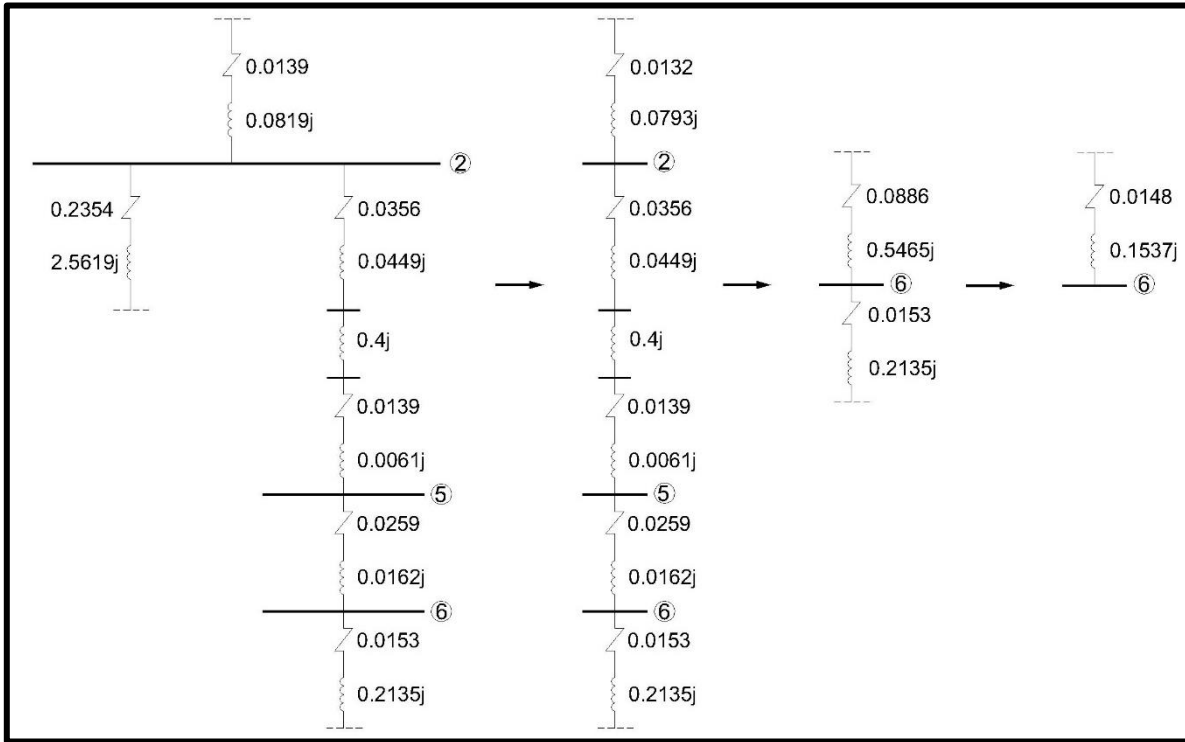


Figura 4.7 Impedancia equivalente en BUS 6

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0148 + 0.1537j = 0.1544 \angle 84.49^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{0.9968}{0.1544} = 6.455 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 984.119 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (6.455)(984.119) = 6.352 \text{ kA}$$

Cálculo de la falla en terminales de las máquinas.

Motor de inducción 40 HP módulo DIN I

$$Z_{equivalente} = 0.1612 + 0.1879j = 0.2475 \angle 49.37^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.0105}{0.2475} = 4.082 \text{ p.u.}$$



$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (4.082)(1968.239) = 8.034 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 5.25j = 5.25 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.0105}{5.25} \right) (1968.239) = 378.83 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (8.034 \text{ kA}) - (378.83 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 7.655 \text{ kA}$$

Motor de inducción 3 HP módulo DIN II

$$Z_{equivalente} = 6.1675 + 0.8041j = 6.2196 \angle 7.42^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{0.9992}{6.2196} = 0.160 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.160)(1968.239) = 0.314 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 70j = 70 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{0.9992}{70} \right) (1968.239) = 28.095 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.314 \text{ kA}) - (28.095 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 0.285 \text{ kA}$$

Motor de inducción 3 HP módulo MGVI

$$Z_{equivalente} = 4.9516 + 0.5799j = 4.9854 \angle 6.67^\circ$$



$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.003}{4.9854} = 0.201 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.201)(1968.239) = 0.395 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 70j = 70 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.003}{70} \right) (1968.239) = 28.202 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.395 \text{ kA}) - (28.202 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 0.366 \text{ kA}$$

Motor de inducción de 5 HP módulo MM

$$Z_{equivalente} = 3.1941 + 0.4627j = 3.2274 \angle 8.24^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.007}{3.2274} = 0.312 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.312)(1968.239) = 0.614 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 42j = 42 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.007}{42} \right) (1968.239) = 47.19 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.614 \text{ kA}) - (47.19 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 0.566 \text{ kA}$$



Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo DIN II

$$Z_{equivalente} = 3.6159 + 0.9712j = 3.744 \angle 15.03^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.006}{3.744} = 0.268 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.268)(1968.239) = 0.527 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 18.75j = 18.75 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.006}{18.75} \right) (1968.239) = 105.602 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.527 \text{ kA}) - (105.602 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 0.421 \text{ kA}$$

Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo MGI

$$Z_{equivalente} = 2.4773 + 0.5333j = 2.534 \angle 12.14^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.012}{2.534} = 0.399 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.399)(1968.239) = 0.785 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 18.75j = 18.75 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.012}{18.75} \right) (1968.239) = 106.23 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.785 \text{ kA}) - (106.23 \text{ A})$$



$$I_{conductor} = 0.678 \text{ kA}$$

Máquina síncrona de 4 kVA (6 HP) módulo MGII

$$Z_{equivalente} = 2.3903 + 0.5065j = 2.4433 \angle 11.96^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{1.012}{2.4433} = 0.414 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 1968.239 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (0.414)(1968.239) = 0.814 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 18.75j = 18.75 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{1.012}{18.75} \right) (1968.239) = 106.23 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (0.814 \text{ kA}) - (106.23 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 0.707 \text{ kA}$$

Motor de inducción de 13 HP módulo Marino

$$Z_{equivalente} = 0.1782 + 0.1641j = 0.2422 \angle 42.64^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{0.9973}{0.2422} = 4.117 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 984.119 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (4.117)(984.119) = 4.051 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 16.15j = 16.15 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{0.9973}{16.15} \right) (984.119) = 60.77 \text{ A}$$



Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (4.051 \text{ kA}) - (60.77 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 3.990 \text{ kA}$$

Motor de inducción de 1 HP módulo Marino

$$Z_{equivalente} = 0.4163 + 0.1634j = 0.4472 \angle 21.43^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{0.9995}{0.4472} = 2.235 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 984.119 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (2.235)(984.119) = 2.199 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 210j = 210 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{0.9995}{210} \right) (984.119) = 4.683 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (2.199 \text{ kA}) - (4.683 \text{ A})$$

$$I_{conductor} = 2.194 \text{ kA}$$

Máquina síncrona de 500 kVA módulo Marino

$$Z_{equivalente} = 0.0076 + 0.1515j = 0.1516 \angle 87.12^\circ$$

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} = \frac{0.9984}{0.1516} = 6.585 \text{ p.u.}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(440 \text{ V})} = 984.119 \text{ A}$$

$$I_{CC} = I_{p.u.} \times I_{base} = (6.585)(984.119) = 6.480 \text{ kA}$$

Corriente de contribución del motor a la falla:

$$X_{p.u.} = 0.2097j = 0.2097 \angle 90^\circ$$

$$I_m = \left(\frac{0.9984}{0.2097} \right) (984.119) = 4.685 \text{ kA}$$

Corriente de cortocircuito que circula por el conductor de alimentación:

$$I_{conductor} = I_{CC} - I_m = (6.480 \text{ kA}) - (4.685 \text{ kA})$$

$$I_{conductor} = 1.795 \text{ kA}$$

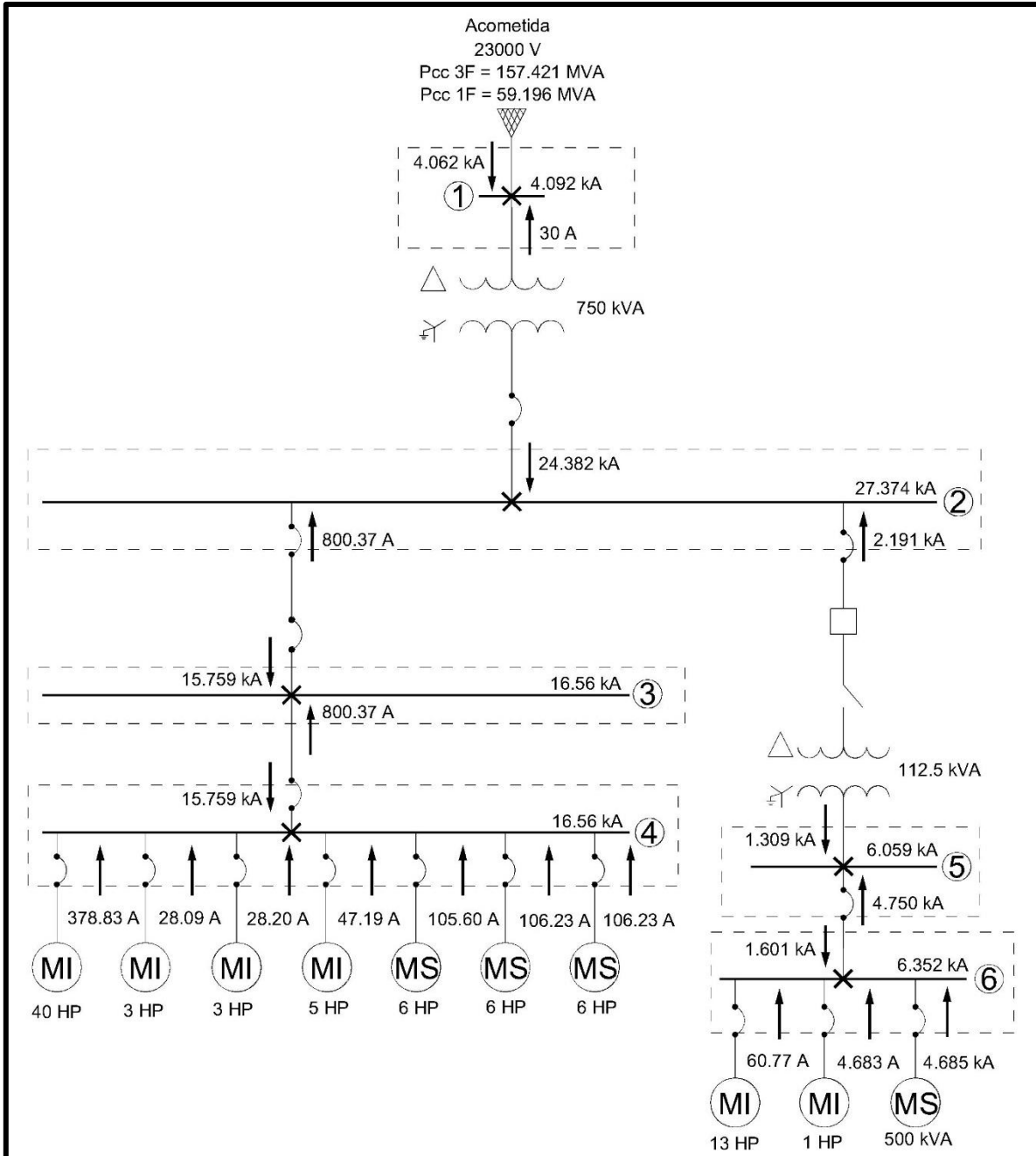


Figura 4.8 Circulación de corrientes de falla en BUSES principales del sistema eléctrico

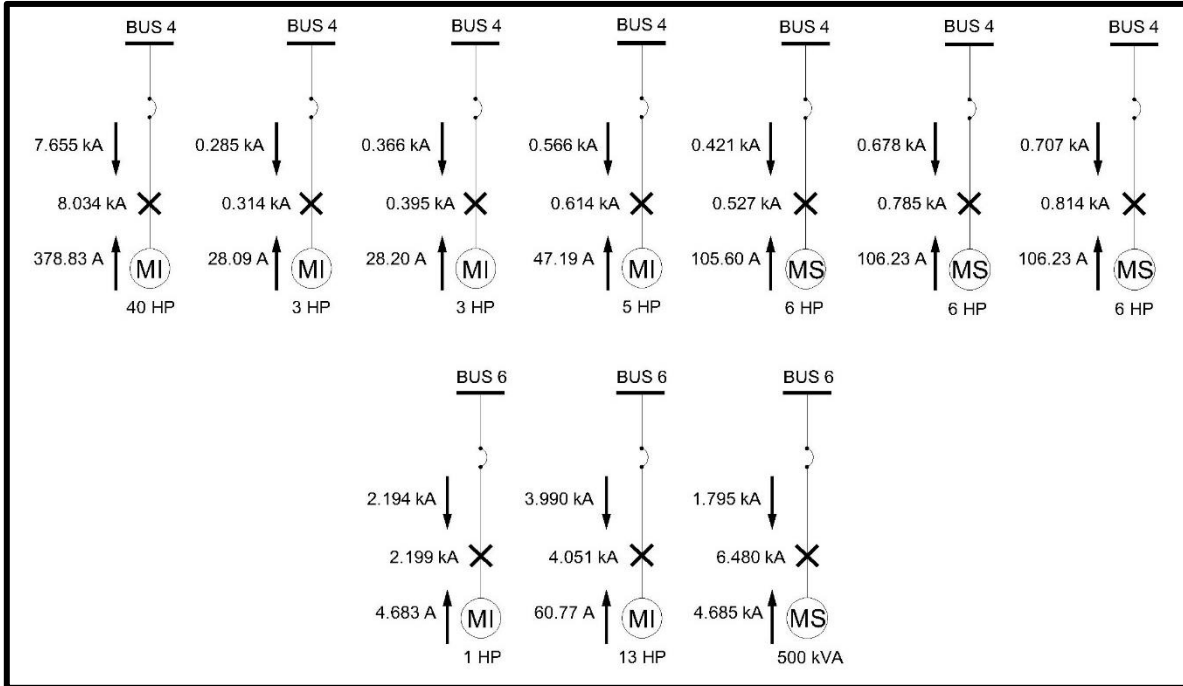


Figura 4.9 Circulación de corrientes de falla en circuitos derivados

4.2 ETAP.

El estudio de cortocircuito del sistema eléctrico fue realizado mediante una simulación desarrollada en el software ETAP, esta se presenta en la siguiente figura.

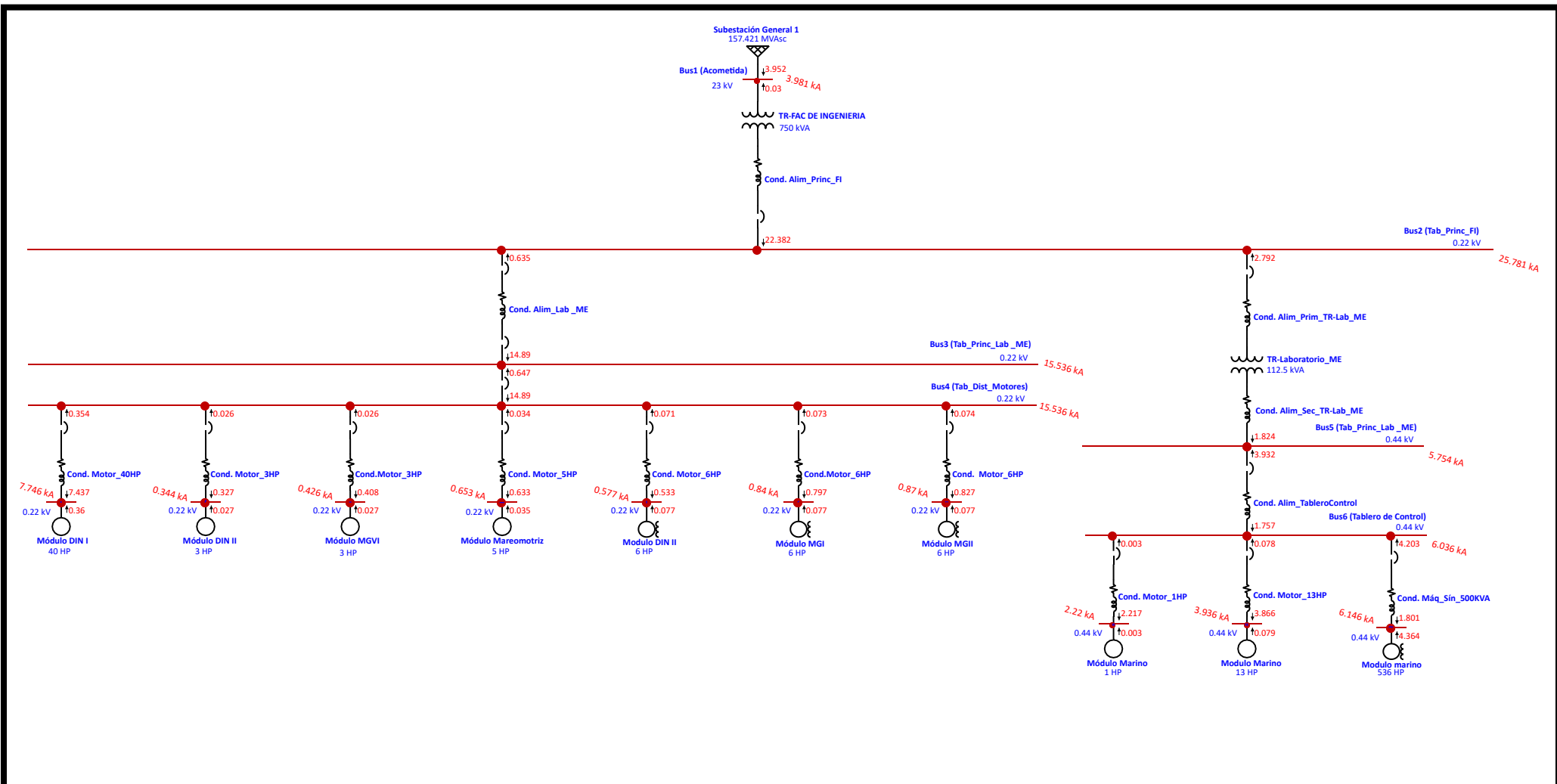


Figura 4.10 Análisis de cortocircuito trifásico

4.3 Resultados.

BUS	Corriente de cortocircuito [kA]
1	4.092
2	27.374
3	16.56
4	16.56
5	6.059
6	6.352

Tabla 4.1 Corriente de cortocircuito en buses principales.

Máquina	Corriente de cortocircuito [kA]	Corriente de cortocircuito que aporta la máquina [kA]	Corriente de cortocircuito en el conductor alimentador [kA]
40 HP módulo DIN I	8.034	0.37883	7.655
3 HP módulo DIN II	0.314	0.02809	0.285
3 HP módulo MGVI	0.395	0.02820	0.366
5 HP módulo Mareomotriz	0.614	0.04719	0.566
6 HP módulo DIN II	0.527	0.10560	0.421
6 HP módulo MGI	0.785	0.10623	0.678
6 HP módulo MGII	0.814	0.10623	0.707
13 HP módulo Marino	4.051	0.06077	3.990
1 HP módulo Marino	2.199	0.004683	2.194
500 KVA módulo Marino	6.480	4.685	1.795

Tabla 4.2 Corriente de cortocircuito en terminales de las máquinas.

BUS	Corriente de cortocircuito [kA]
1	3.981
2	25.781
3	15.536
4	15.536
5	5.754
6	6.036

Tabla 4.3 Corriente de cortocircuito en buses principales mediante simulación ETAP.

Máquina	Corriente de cortocircuito [kA]	Corriente de cortocircuito que aporta la máquina [kA]	Corriente de cortocircuito en el conductor alimentador [kA]
40 HP módulo DIN I	7.746	0.36	7.437
3 HP módulo DIN II	0.344	0.027	0.327
3 HP módulo MGVI	0.426	0.027	0.408
5 HP módulo Mareomotriz	0.653	0.035	0.633
6 HP módulo DIN II	0.577	0.077	0.533
6 HP módulo MGI	0.84	0.077	0.797
6 HP módulo MGII	0.87	0.077	0.827
13 HP módulo Marino	3.936	0.079	3.866
1 HP módulo Marino	2.22	0.003	2.217
500 KVA módulo Marino	6.146	4.364	1.801

Tabla 4.4 Corriente de cortocircuito en terminales de las máquinas mediante simulación ETAP.



Al comparar los resultados obtenidos mediante el análisis teórico y la simulación en ETAP se observa que la diferencia entre ambos es mínima. La coherencia de los resultados confirma la validez de los cálculos teóricos.

4.4 Conductores eléctricos.

Es fundamental garantizar que el calibre de los conductores esté dimensionado para soportar las corrientes previstas en el análisis de cortocircuito, ya que, en condiciones de falla eléctrica una selección inadecuada del conductor puede ocasionar un sobrecalentamiento excesivo dañando el aislamiento y, en casos más graves, generar riesgos de incendio.

Con el fin de asegurar el cumplimiento de este requisito la Tabla 240-92(b).- Corriente nominal de cortocircuito de conductores de derivación de la NOM-001-SEDE-2012 establece las ecuaciones aplicables para el dimensionamiento de conductores frente a corrientes de cortocircuito.

De acuerdo con la tabla y debido a que se ha definido el uso de conductores eléctricos de cobre se emplea la ecuación correspondiente para este material conductor:

$$\left(\frac{I^2}{A^2}\right)t = 0.0297 \log_{10} \left[\frac{(T_2 + 234)}{(T_1 + 234)}\right] \quad (14)$$

Donde:

I : Corriente de cortocircuito en amperes.

A : Área del conductor en circular mil.

t : Tiempo del cortocircuito en segundos (para tiempos iguales o menores a 10 segundos).

T_1 : Temperatura inicial del conductor en grados Celsius.

T_2 : Temperatura final del conductor en grados Celsius.

La ecuación para calcular la capacidad de cortocircuito que puede soportar un conductor sin sufrir daños en una determinada sección transversal queda representada de la siguiente forma:

$$I = A \sqrt{\frac{0.0297 \log_{10} \left[\frac{(T_2 + 234)}{(T_1 + 234)}\right]}{t}} \quad (15)$$

Se considera un tiempo $t = 0.01$ segundos para evaluar el efecto de cortocircuito antes que actúe la protección.



T1 = 90 °C (Temperatura conductor de cobre en condición normal de operación)

T2 = 250 °C (Temperatura conductor de cobre con asilamiento polietileno de cadena cruzada)

Comprobación para conductor calibre 14 AWG:

$$I = 4110 \sqrt{\frac{0.0297 \log_{10} \left[\frac{(250 + 234)}{(90 + 234)} \right]}{0.01}} = 2957.12 \text{ A}$$

4.5 Resultados.

Calibre	Corriente de cortocircuito permisible [kA]
14 AWG	2.957
12 AWG	4.698
10 AWG	7.468
1/0 AWG	75.978
2/0 AWG	95.764
3/0 AWG	120.731
350 kcmil	251.823
600 kcmil	431.696

Tabla 4.5 Corriente de cortocircuito permisible en los conductores

Al comparar los resultados presentados en la Tabla 4.5 con las magnitudes de corriente de cortocircuito obtenidas para los conductores en las Tablas 4.2 y 4.4, se verifica que los conductores del sistema cuentan con la capacidad requerida para soportar las corrientes de cortocircuito previstas. Este análisis confirma adecuada selección de los conductores.



CAPÍTULO 5. PROTECCIÓN ELÉCTRICA.

5.1 Protección de motores eléctricos.

La protección eléctrica de motores tiene como objetivo preservar la integridad del equipo y los conductores asociados mediante la detección de una condición de falla eléctrica y la actuación automática del dispositivo de protección para evitar daños. La protección debe cubrir las siguientes contingencias:

- **Sobrecarga:** Corrientes superiores a la nominal durante un tiempo prolongado que producen sobrecalentamiento en los devanados del motor y en los conductores.
- **Cortocircuito:** Corriente de gran magnitud que supera varias veces la corriente nominal causada por el contacto entre conductores.
- **Falla a tierra:** Corriente que fluye a tierra provocando riesgo de electrocución.

5.2 Protección contra sobrecarga.

Se prevé que los motores del laboratorio operen en vacío por periodos cortos de tiempo y solo bajo condiciones específicas con carga, la probabilidad de que se produzca una falla por sobrecarga es considerablemente baja, no obstante, la implementación de dispositivos de protección contra sobrecarga se considera una práctica recomendable.

El dimensionamiento del dispositivo de protección contra sobrecarga se realiza conforme a los criterios del artículo 430-32. Estipula lo siguiente.

a) De más de 746 watts (1 hp). Todos los motores de servicio continuo de más de 746 watts (1 hp nominal) deben estar protegidos contra sobrecargas por uno de los medios indicados en (1) hasta (4) siguientes:

1) Dispositivo separado de protección contra sobrecarga. Un dispositivo separado de protección contra sobrecarga que sea sensible a la corriente del motor. Este dispositivo se debe seleccionar para que se dispare o debe tener valor nominal no mayor al siguiente porcentaje del valor nominal de corriente de plena carga, de la placa de características del motor:

Motores con un factor de servicio marcado de 1.15 ó más
por ciento

125



Motores con un aumento de temperatura marcado de 40 °C o menos por ciento	125
Todos los demás motores por ciento (Secretaría de Energía, 2012, p. 307)	115

5.2.1 Dimensionamiento del sistema protección contra sobrecarga para motores.

Motor de inducción de 40 HP módulo DIN I

No cuenta con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(102)(1.15)=117.3$ A.

Motores de inducción de 3 HP módulo DIN II y módulo MGVI

No cuentan con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(9.4)(1.15)=10.81$ A.

Motor de inducción de 5 HP módulo Mareomotriz

La placa de datos del motor indica un factor de servicio de 1.25. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(11.8)(1.25) =14.75$ A.

Máquinas síncronas de 4 kVA módulo DIN II, módulo MGI y módulo MGII

No cuentan con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(10.45)(1.15)=12.017$ A.

Motores de corriente directa de 7.5 HP módulo MGI y módulo MGII

No cuentan con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(57)(1.15)=65.55$ A.

Motores de corriente directa de 7.5 HP módulo Motor Serie

La placa de datos de los motores indica un factor de servicio de 1.15. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(56)(1.25)=70$ A.

Motores de corriente directa de 3 HP módulo MGVI

La placa de datos de los motores indica un aumento de temperatura de 40 °C. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de: $(25)(1.25)=31.25$ A



Máquina síncrona de 5 KVA módulo MGVI

No cuenta con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de $(13.1)(1.15)=15.065$ A.

Motor de inducción de 13 HP módulo Marino

No cuenta con un factor de servicio de 1.15 o aumento de temperatura de 40 °C o menos en la placa de datos. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de: $(19.5)(1.15)=22.425$ A.

Motor de inducción de 1 HP módulo Marino

La placa de datos del motor indica un aumento de temperatura de 30 °C. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de: $(1.35)(1.25)=1.68$ A.

Máquina síncrona de 500 KVA módulo Marino

La placa de datos de a la máquina indica un aumento de temperatura de 40 °C. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de: $(100)(1.25)=125$ A.

Máquina de corriente directa de 75 kW módulo Marino

La placa de datos de a la máquina indica un aumento de temperatura de 40 °C. El ajuste de la protección contra sobrecarga será de: $(100)(1.25)=125$ A.

5.3 Protección contra cortocircuito y fallas a tierra.

El artículo 430-52 establece los criterios para dimensionar el dispositivo de protección contra cortocircuito y fallas a tierra. No obstante, se optó dimensionar el dispositivo de protección con base en la corriente nominal de los motores empleando interruptores termomagnéticos de tiempo inverso bajo las siguientes consideraciones:

a) Selección de la curva de disparo

Se selecciona la curva característica de disparo adecuada de tal forma que el interruptor no opere durante el arranque de los motores provocando una desconexión indebida.

b) Selectividad y coordinación

El dispositivo seleccionado cumpla con las condiciones de selectividad y coordinación con los dispositivos de protección aguas arriba.



c) Protección de los conductores

El valor nominal del interruptor termomagnético será menor o igual a la ampacidad de los conductores conectados para evitar que circulen corrientes superiores sin que el interruptor las detecte.

d) Capacidad de interrupción

Su capacidad de interrupción sea igual o superior a la corriente de cortocircuito calculada en el punto de instalación.

5.3.1 Dimensionamiento del sistema protección contra cortocircuito y fallas a tierra para motores.

Motor de inducción de 40 HP módulo DIN I

- Corriente nominal: 102 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 110 A

Motores de inducción de 3 HP módulo DIN II y módulo MGVI

- Corriente nominal: 9.4 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 10 A

Motor de inducción de 5 HP módulo Mareomotriz

- Corriente nominal: 11.8 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 15 A

Máquinas síncronas de 4 kVA módulo DIN II, módulo MGI y módulo MGII

- Corriente nominal: 10.45 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 12 A

Motores de corriente directa de 7.5 HP módulo MGI y módulo MGII

- Corriente nominal: 57 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 60 A

Motores de corriente directa de 7.5 HP módulo Motor Serie

- Corriente nominal: 56 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 60 A

Motores de corriente directa de 3 HP módulo MGVI

- Corriente nominal: 25 A



- Valor nominal dispositivo de protección: 30 A

Máquina síncrona de 5 KVA módulo MGVI

- Corriente nominal: 13.1 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 15 A

Motor de inducción de 13 HP módulo Marino

- Corriente nominal: 19.5 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 20 A

Motor de inducción de 1 HP módulo Marino

- Corriente nominal: 1.35 A
- Valor nominal dispositivo de protección: 3 A

Máquina síncrona de 500 KVA módulo Marino

La máquina síncrona posee una corriente nominal de 642 A, sin embargo, bajo las condiciones reales de operación como motor síncrono no alcanza dicha magnitud, se limita a un consumo aproximado de 100 A.

En atención a lo anterior, se ha optado por seleccionar un dispositivo de protección cuyo valor nominal sea el inmediato superior a los 100 A de consumo real de operación, el valor nominal del dispositivo corresponde a 110 A.

Máquina de corriente directa de 75 kW módulo Marino

Se estableció que en su operación como generador no suministrará su corriente nominal total de 682 A, solo una corriente máxima de salida de 100 A debido a las condiciones de operación donde la máquina trabajará principalmente sin carga y solo en situaciones específicas se realizarán pruebas con cargas reducidas.

En función de lo anterior, se optó por dimensionar el dispositivo de protección con base en la corriente máxima real de operación, por tanto, se seleccionó un dispositivo de protección de 100 A.

La capacidad nominal de los dispositivos de protección se encuentra dentro del intervalo de ajuste requerido para la protección contra sobrecarga, en consecuencia, se establece que los interruptores termomagnéticos proporcionaran simultáneamente la función de protección frente a corrientes de cortocircuito y condiciones de sobrecarga.



5.4 Corriente de arranque de motores.

El dispositivo de protección de los motores debe ser capaz de soportar la corriente de arranque sin que se produzcan disparos que provoquen desconexiones indebidas. Conocer su magnitud permite seleccionar la curva de disparo adecuada o ajustar los parámetros de operación para permitir su funcionamiento continuo. La corriente de arranque de motores de inducción se determina mediante la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} V_T} \quad (16)$$

Donde:

I_L : Corriente de arranque.

V_T : Voltaje nominal.

S_{start} : Kilovoltamperes máximos de arranque del motor.

$$S_{start} = (\text{potencia nominal en caballos de fuerza})(\text{factor de letra código})$$

La Tabla 430-7(b).- Letras de código de indicación para rotor bloqueado, proporciona los kilovoltamperes mínimos y máximos de arranque de los motores.

Tabla 430-7(b).- Letras de código de indicación para rotor bloqueado

Letra código	Kilovoltamperes por caballo de fuerza con el rotor bloqueado
A	0 – 3.14
B	3.15 – 3.54
C	3.55 – 3.99
D	4.0 – 4.49
E	4.50 – 4.99
F	5.0 – 5.59
G	5.60 – 6.29
H	6.30 – 7.09
J	7.10 – 7.99
K	8.0 – 8.99
L	9.0 – 9.99
M	10.0 – 11.19
N	11.20 – 12.49
P	12.50 – 13.99
R	14.0 – 15.99
S	16.0 – 17.99
T	18.0 – 19.99
U	20.0 – 22.39
V	22.40 en adelante

Figura 5.1 Letras de código de indicación para rotor bloqueado. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012 (<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)



- Motor de inducción de 40 HP módulo DIN I

La placa de datos del motor indica la letra de código “H”, los KVA/HP máximos que demanda son 7.09, los kilovoltamperes máximos de arranque del motor son:

$$S_{start} = (40)(7.09) = 283.6 \text{ KVA}$$

El valor de la corriente de arranque es:

$$I_L = \frac{283.6 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(220)} = 744.25 \text{ A}$$

- Motores de inducción de 3 HP módulo DIN II y MGVI.

La placa de datos de los motores indica la letra de código “V”, los KVA/HP máximos que demanda son 22.40, los kilovoltamperes máximos de arranque del motor son:

$$S_{start} = (3)(22.40) = 67.2 \text{ KVA}$$

El valor de la corriente de arranque es:

$$I_L = \frac{67.2 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(220)} = 176.35 \text{ A}$$

- Motor de inducción de 5 HP módulo Mareomotriz.

La placa de datos del motor indica la letra de código “J”, los KVA/HP máximos que demanda son 7.99, los kilovoltamperes máximos de arranque del motor son:

$$S_{start} = (5)(7.99) = 39.95 \text{ KVA}$$

El valor de la corriente de arranque es:

$$I_L = \frac{39.95 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(220)} = 104.84 \text{ A}$$

- Motor de inducción de 1 HP módulo Marino.

La placa de datos del motor indica la letra de código “L”, los KVA/HP máximos que demanda son 9.99, los kilovoltamperes máximos de arranque del motor son:

$$S_{start} = (1)(9.99) = 9.99 \text{ KVA}$$



El valor de la corriente de arranque es:

$$I_L = \frac{9.99 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(440)} = 13.1 \text{ A}$$

- Motor de inducción de 13 HP módulo Marino.

La operación del motor de rotor devanado se realiza con la ayuda de un reóstato, en el arranque se introduce toda la resistencia (posición 1), de esta forma aumenta la impedancia de la máquina y se reduce la corriente inicial, conforme el motor inicia su marcha se va eliminando la resistencia del reóstato moviendo el selector paulatinamente a las posiciones 2, 3, 4, 5 y 6, en la última posición queda cortocircuitado el rotor y finaliza la operación de arranque.

Debido al funcionamiento descrito en el motor la corriente de arranque se mantiene controlada y no alcanza valores elevados como ocurre en los motores de jaula de ardilla.

- Motores de corriente directa.

El arranque de los motores se efectúa de forma controlada mediante una fuente de voltaje variable.

5.5 Protección eléctrica de circuitos de alimentación.

5.5.1 Protección eléctrica para el alimentador módulo Marino.

El artículo 430-62 (a) Carga específica, estipula lo siguiente:

Un circuito alimentador que se utilice para la alimentación de unas cargas fijas específicas de motores y que conste de conductores dimensionados en base a 430-24, debe estar dotado de un dispositivo de protección con un valor nominal o ajuste no mayor al mayor valor nominal o ajuste del dispositivo de protección contra cortocircuito y fallas a tierra del circuito derivado para cualquier motor alimentado por el alimentador, más la suma de todas las corrientes de plena carga de los demás motores del grupo. (Secretaría de Energía, 2012, p.313)

En este caso se suministra energía a cargas fijas específicas de motores. Por ello, el dispositivo de protección del interruptor principal se dimensiona conforme a la siguiente ecuación:

$$I = I_{\text{Mayor valor nominal}} + I_{\text{Corriente de plena carga de los demás motores}} \quad (17)$$



Donde:

$I_{\text{Mayor valor nominal}}$ posee una magnitud de 110 A correspondiente al valor nominal del dispositivo de protección dimensionado para la máquina síncrona de 500 KVA del módulo Marino.

$I_{\text{Corriente de plena carga de los demás motores}}$ posee una magnitud de 21.6 A correspondiente a la suma de la corriente de plena carga del motor de 13 HP (19.5 A) y del motor de 1 HP (2.1 A) del módulo Marino.

$$I = 110 + 21.6 = 131.6 \text{ A}$$

El cálculo realizado proporciona un valor nominal de 131.6 A, sin embargo, conforme a lo dispuesto en el artículo 240-6 no existe una clasificación estandarizada de dispositivos de protección con dicha capacidad en amperios. En consecuencia, se selecciona un interruptor automático de 125 A.

5.5.2 Protección eléctrica para el alimentador del laboratorio de máquinas eléctricas.

La capacidad del dispositivo de protección correspondiente al alimentador del tablero principal se determina conforme a lo establecido en el artículo 430-63, inciso (3). El dimensionamiento del dispositivo de protección se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_{\text{Mayor valor nominal}} + I_{\text{Corriente de plena carga de los demás motores}} + I_{\text{Carga no motora}} \quad (18)$$

Donde:

$I_{\text{Mayor valor nominal}}$ posee una magnitud de 110 A correspondiente al valor nominal del dispositivo de protección dimensionado para el motor de inducción de 40 HP del módulo DIN I.

$I_{\text{Corriente de plena carga de los demás motores}}$ posee una magnitud de 45.89 A correspondiente a la suma de la corriente de plena carga del motor de 3 HP (9.6 A) del módulo MGVI, del motor de 5 HP (15.2 A) del módulo MM, de la máquina síncrona de 4 kVA (11.495 A) y del motor de 3 HP (9.6) del módulo DIN II.

$I_{\text{Carga no motora}}$ posee una magnitud de 162.66 A correspondiente a la suma de la corriente de consumo de los tres rectificadores propuestos (61.92 A) más la suma de la carga estimada del tablero de distribución para espacios interiores (100.74 A).

$$I_{\text{Alimentador}} = 110 + 45.89 + 162.66 = 318.55 \text{ A}$$



El cálculo realizado proporciona un valor nominal de 318.85 A, sin embargo, conforme a lo dispuesto en el artículo 240-6 no existe una clasificación estandarizada de dispositivos de protección con dicha capacidad en amperios. En consecuencia, se selecciona un interruptor automático de 300 A.

5.6 Protección eléctrica de tableros de distribución.

5.6.1 Protección eléctrica para el tablero de distribución para motores.

El artículo 430-63 Capacidad o ajuste - Cargas de motor y otras cargas, estipula lo siguiente:

Cuando un alimentador alimente una carga de motor y otra carga, el dispositivo protector del alimentador debe tener un valor nominal no menor al requerido para la suma de otra carga, más las siguientes:

- (1) Para un solo motor, el valor nominal permitido en 430-52.
- (2) Para un motocompresor hermético con refrigerante, el valor nominal permitido en 440-22.
- (3) Para dos o más motores, el valor nominal permitido en 430-62. (Secretaría de Energía, 2012, p.313)

Se establecen los criterios para dimensionar el dispositivo de protección del circuito alimentador que suministra energía a uno o varios motores y otras cargas.

Explícitamente los circuitos derivados de motores no serán alimentados directamente desde un circuito alimentador, en cambio se utiliza un tablero de distribución el cual cuenta con un interruptor principal ubicado antes de las barras que alimentan los circuitos derivados, por lo que el interruptor principal cumple la función de dispositivo de protección del alimentador. Por lo tanto, resulta prudente aplicar el criterio del artículo 430-63 para determinar su valor nominal adecuado.

En este caso se suministra energía a varios motores y otras cargas. Por ello, el dispositivo de protección del interruptor principal se dimensiona conforme al inciso (3):

$$I = I_{\text{Mayor valor nominal}} + I_{\text{Corriente de plena carga de los demás motores}} + I_{\text{Carga no motora}}$$

Donde:

$I_{\text{Mayor valor nominal}}$ posee una magnitud de 110 A correspondiente al valor nominal del dispositivo de protección dimensionado para el motor de inducción de 40 HP del módulo DIN I.



La corriente de plena carga de los demás motores posee una magnitud de 45.89 A correspondiente a la suma de la corriente de plena carga del motor de 3 HP (9.6 A) del módulo MGVI, del motor de 5 HP (15.2 A) del módulo MM, de la máquina síncrona de 4 kVA (11.495 A) y del motor de 3 HP (9.6) del módulo DIN II.

La carga no motora posee una magnitud de 61.92 A correspondiente a la suma de la corriente de consumo de los tres rectificadores propuestos (20.64 A).

$$I = 110 + 45.89 + 61.92 = 217.81 \text{ A}$$

Se contempla que las cargas no operen de manera simultánea en condiciones normales, sin embargo, para efectos de dimensionamiento se ha considerado la capacidad total instalada como si todas trabajaran simultáneamente. Esta decisión se adopta con el fin de asegurar una capacidad suficiente que permita la incorporación futura de nuevas cargas sin que sea necesario sustituir el dispositivo de protección.

El cálculo realizado proporciona un valor nominal de 217.81 A, sin embargo, conforme a lo dispuesto en el artículo 240-6 no existe una clasificación estandarizada de dispositivos de protección con dicha capacidad en amperios. En consecuencia, se selecciona un interruptor automático de 200 A.

5.6.2 Protección eléctrica para el tablero de distribución para espacios interiores.

El tablero de distribución está destinado a la alimentación de circuitos de contactos y equipos menores. Con base en el levantamiento realizado el consumo total estimado es de 100.74 A correspondiente a las fuentes de alimentación LabVolt, relevadores, laptops y televisores.

Elemento	Consumo [A]	Cantidad	Total [A]
Fuente de alimentación LabVolt	15	4	60
Relevadores	5	6	30
Laptops	1.4	6	8.4
Televisores	0.78	3	2.34

Tabla 5.1 Consumo estimado del tablero de distribución para espacios interiores

$$I = 60 + 30 + 8.4 + 2.34 = 100.74 \text{ A}$$

Aunque las cargas no operarán de manera simultánea se ha considerado el cálculo de la capacidad total como si trabajaran al mismo tiempo, esta decisión se toma con el propósito de permitir la incorporación de nuevas cargas a futuro manteniendo la capacidad necesaria para cubrir la demanda sin sustituir el dispositivo de protección.



Conforme a lo dispuesto en el artículo 240-6 no existe una clasificación estandarizada de dispositivos de protección con dicha capacidad en amperios. En consecuencia, se selecciona un interruptor automático de 100 A.

5.6.3 Protección eléctrica para el tablero de distribución para iluminación.

El tablero de distribución está destinado a la alimentación de las luminarias en el laboratorio, el consumo total estimado es de 18.8 A correspondiente a 16 luminarias de 250 W.

Conforme a lo dispuesto en el artículo 240-6 no existe una clasificación estandarizada de dispositivos de protección con dicha capacidad en amperios. En consecuencia, se selecciona un interruptor automático de 30 A.

5.7 Protección eléctrica para el transformador de 112.5 kVA del laboratorio de máquinas eléctricas.

El artículo 450-3(b) Transformadores de 600 volts nominales o menos. Establece que la protección contra sobrecorriente se debe dimensionar con base en la Tabla 450-3(b).

Tabla 450-3(b).- Valor nominal o ajuste máximo de la protección contra sobrecorriente para los transformadores de 600 volts y menos (como un porcentaje nominal de la corriente nominal del transformador)

Método de protección	Protección del primario			Protección del secundario	
	Corrientes de 9 amperes o más	Corrientes de menos de 9 amperes	Corrientes de menos de 2 amperes	Corrientes de 9 amperes o más	Corrientes de menos de 9 amperes
Protección del primario solamente	125% (véase nota 1)	167%	300%	No se requiere	No se requiere
Protección del primario y secundario	250% (véase nota 3)	250% (véase nota 3)	250% (véase nota 3)	125% (véase nota 1)	167%

NOTAS:

1. Cuando el 125 por ciento de la corriente no corresponde a un valor estándar de un fusible o interruptor automático no ajustable, se permitirá elegir el valor nominal estándar inmediatamente superior.

Figura 5.2 Valor nominal o ajuste máximo de la protección contra sobrecorriente para los transformadores de 600 volts y menos (como un porcentaje nominal de la corriente nominal del transformador). De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la

Secretaría de Energía, 2012

(<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

El transformador estará protegido en el lado primario. De acuerdo con la Tabla 450-3(b), el lado primario debe estar protegido por una protección contra sobrecorriente con una capacidad del 125% de la corriente nominal del lado primario.



Puesto que se propuso utilizar un transformador trifásico elevador con una tensión nominal en el devanado primario de 220 V y 440 V en el devanado secundario con una potencia nominal de 112.5 kVA, la corriente nominal del transformador en el devanado primario es:

$$I_{\text{Primario}} = \frac{112.5 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(220 \text{ V})} = 295.23 \text{ A}$$

El valor nominal del dispositivo de protección corresponde a:

$$I = (1.25)(I_{\text{Primario}}) = (1.25)(295.23) = 369.03 \text{ A}$$

De acuerdo con el artículo 240-6 no existe una clasificación de amperios estándar para un valor de 369.03 A, por lo tanto, se selecciona el valor nominal inmediatamente superior a dicha magnitud de corriente, correspondiente a 400 A.

El dispositivo de protección se identificará como Interruptor Principal Subestación Eléctrica del Laboratorio de Máquinas Eléctricas y, además de proporcionar la protección correspondiente al transformador, desempeñará la función de protección para el alimentador primario del transformador.

5.8 Protección eléctrica para los rectificadores de CA a CD.

El dimensionamiento de la protección eléctrica se realiza con base en la magnitud de corriente que circula por los conductores en la entrada de corriente alterna, el valor nominal corresponde a 30 A.

5.9 Protección eléctrica para el sistema de excitación de las máquinas síncronas y máquinas de corriente directa.

El dimensionamiento de la protección eléctrica del sistema de excitación de las máquinas síncronas y de corriente directa se realiza en función de la corriente nominal del sistema de excitación.

5.10 Resultados.

Se ha elaborado una tabla resumen que integra las características requeridas para los dispositivos de protección correspondientes a los distintos elementos del sistema eléctrico.

Consideraciones:

- Mediante el análisis de cortocircuito realizado se determinaron las magnitudes de corriente que pueden presentarse en el sistema eléctrico bajo condiciones de falla. Con base en dichos valores se establecen las capacidades

interruptivas requeridas para las protecciones, de manera que cada dispositivo seleccionado pueda interrumpir de manera segura la corriente máxima prevista en su punto de instalación.

- Para la determinación de la capacidad interruptiva de los interruptores que protegen los motores de corriente directa de los módulos MGI, MGII, Motor Serie y MGV se consideró la corriente de cortocircuito en el lado de entrada de las fuentes rectificadas correspondiente a una magnitud de 16 kA, ya que los motores de CD por sí mismos no aportan contribuciones significativas de cortocircuito.
- Dado que la máquina síncrona de 5 KVA del módulo MGVI, el dinamómetro del módulo DIN I y la máquina de corriente directa del módulo Marino operarán como generadores los equipos no tienen conexión eléctrica con el sistema eléctrico principal, y considerando que únicamente se efectuarán pruebas bajo condiciones específicas y con cargas reducidas se determina que una capacidad interruptiva de 5 kA resulta adecuada para estos equipos al igual para los interruptores de los circuitos de los sistemas de excitación.

Elemento	Valor nominal [A]	Voltaje de operación [V]	Capacidad interruptiva [kA]	Polos
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	110	220 VCA	16	3
Dinamómetro módulo DIN I	100	250 VCD	5	2
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	10	220 VCA	16	3
Máquinas síncronas 4 KVA módulo DIN II	12	220 VCA	16	3
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	60	115 VCD	16	2
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	12	220 VCA	16	3
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	60	115 VCD	16	2
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	12	220 VCA	16	3
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	60	120 VCD	16	2
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGV	30	115 VCA	16	2
Máquina síncrona 5 KVA módulo MGVI	15	220 VCA	5	3
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	10	220 VCA	16	3
Motor de inducción 5 HP módulo MM	15	220 VCA	16	3
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	20	440 VCA	6	3
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	3	440 VCA	6	3
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	110	440 VCA	6	3
Máquina de CD de 75 KW módulo Marino	100	110 VCD	5	2
Rectificadores CA-CD	30	220 VCA	16	3
Tablero de distribución para motores	200	220 VCA	16	3
Tablero de distribución para espacios interiores	100	220 VCA	16	3
Tablero de distribución para iluminación	30	220VCA	16	3
Alimentador módulo Marino	125	440 VCA	6	3
Alimentador Laboratorio de Máquinas Eléctricas	300	220 VCA	27	3
Alimentador primario TR-Laboratorio ME	400	220 VCA	27	3
Alimentadores sistema de excitación de CD	6	125 VCD	5	2

Tabla 5.2 Características de los dispositivos de protección



CAPÍTULO 6. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.

La coordinación de protecciones tiene como objetivo establecer el comportamiento de los dispositivos de protección que conforman el sistema eléctrico ante una falla. Consiste en determinar los ajustes y parámetros de operación de los dispositivos de protección para que actúen de manera selectiva aislando únicamente la parte afectada del sistema ante una falla y manteniendo la continuidad del servicio eléctrico en el resto del sistema. Asimismo, los dispositivos de protección deben permitir el arranque y operación normal de los elementos que protegen.

El estudio de coordinación de protecciones del sistema eléctrico del laboratorio se realiza en el software de ETAP. Se establecen los ajustes y parámetros de operación de cada dispositivo de protección para el cumplimiento de los objetivos del estudio: proteger los equipos, mantener la continuidad del servicio eléctrico y garantizar la seguridad del personal y la instalación.

Mediante las hojas de tiempo-corriente se grafican las curvas de disparo de los dispositivos de protección junto con las curvas de daño térmico de los elementos protegidos. Estas representaciones permiten analizar visualmente la selectividad entre protecciones.

La coordinación de protecciones del sistema eléctrico de laboratorio se desarrolla bajo los siguientes principios:

1. Operación bajo condiciones de falla del sistema

Las protecciones están dimensionadas para distinguir adecuadamente entre condiciones normales de operación y condiciones de falla, de modo que no se produzcan interrupciones por disparos indebidos.

2. Desconexión del elemento fallado

Ante una falla los dispositivos de protección actúan aislando únicamente el circuito afectado preservando la continuidad del suministro en el resto del sistema.

3. Actuación coordinada de protecciones primarias y de respaldo

En caso de que una protección primaria no actúe la protección de respaldo correspondiente debe operar después de un retardo temporal asignado. Este principio se aplica de manera jerárquica en todas las protecciones aguas arriba sobre las protecciones aguas abajo donde los dispositivos de protección final deben ser capaces de desconectar completamente la instalación.

4. Protección del sistema eléctrico



La coordinación entre las protecciones primarias y de respaldo asegura en todo momento que ningún elemento del sistema eléctrico resulte dañado por la circulación de corrientes de cortocircuito durante el tiempo de despeje de la falla. Los tiempos y niveles de disparo se ajustan conforme a las curvas de daño térmico de los elementos que protegen manteniendo su integridad.

6.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico en ETAP.

El sistema eléctrico de la Figura 6.1 consta de un tablero general (denominado Tablero_Princ_FI) alimentado por el transformador denominado Facultad de Ingeniería de 750 KVA, desde el tablero general se obtienen dos derivaciones hacia el tablero principal del laboratorio de máquinas eléctricas. La derivación del lado izquierdo alimenta los equipos y espacios dentro de laboratorio, la derivación del lado derecho alimenta la subestación del laboratorio conformada por el transformador propuesto de 112.5 KVA para obtener una salida de voltaje en 440 V y alimentar el sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”.

Notas: Debido a restricciones del software, no fue posible implementar una protección con el valor nominal del dispositivo de protección correspondiente al motor de 1 HP del módulo Marino, las máquinas síncronas de 4 kVA (motores de 6 HP) módulo DIN II, módulo MGI y módulo MGII los y los motores de 3 HP de los módulos DIN II y MGVI.

Inicialmente se dimensionó un interruptor de 125 A para la protección del alimentador del módulo Marino, sin embargo, se optó por implementar un interruptor de 150 A. Esta selección se justifica al analizar la coordinación de protecciones y verificar que, con un dispositivo de 125 A la curva de disparo del interruptor cruza con la corriente de inrush del transformador propuesto para el laboratorio de máquinas eléctricas. Al emplear un interruptor de 150 A la curva de disparo evita el cruce previniendo disparos intempestivos durante la energización del transformador.

Se seleccionaron interruptores con una capacidad nominal superior al dimensionamiento inicial para los tableros de distribución y el tablero principal del laboratorio de máquinas eléctricas. No obstante, los interruptores fueron ajustados conforme a los parámetros del dimensionamiento original. Se propone implementar esta estrategia con el objetivo de obtener una capacidad de expansión futura al sistema eléctrico del laboratorio, de esta forma, ante un incremento de demanda o la incorporación de nuevas cargas no será necesario sustituir los interruptores instalados por dispositivos de mayor capacidad, únicamente se requerirá modificar los ajustes de protección para adecuarlos a las nuevas condiciones de operación.

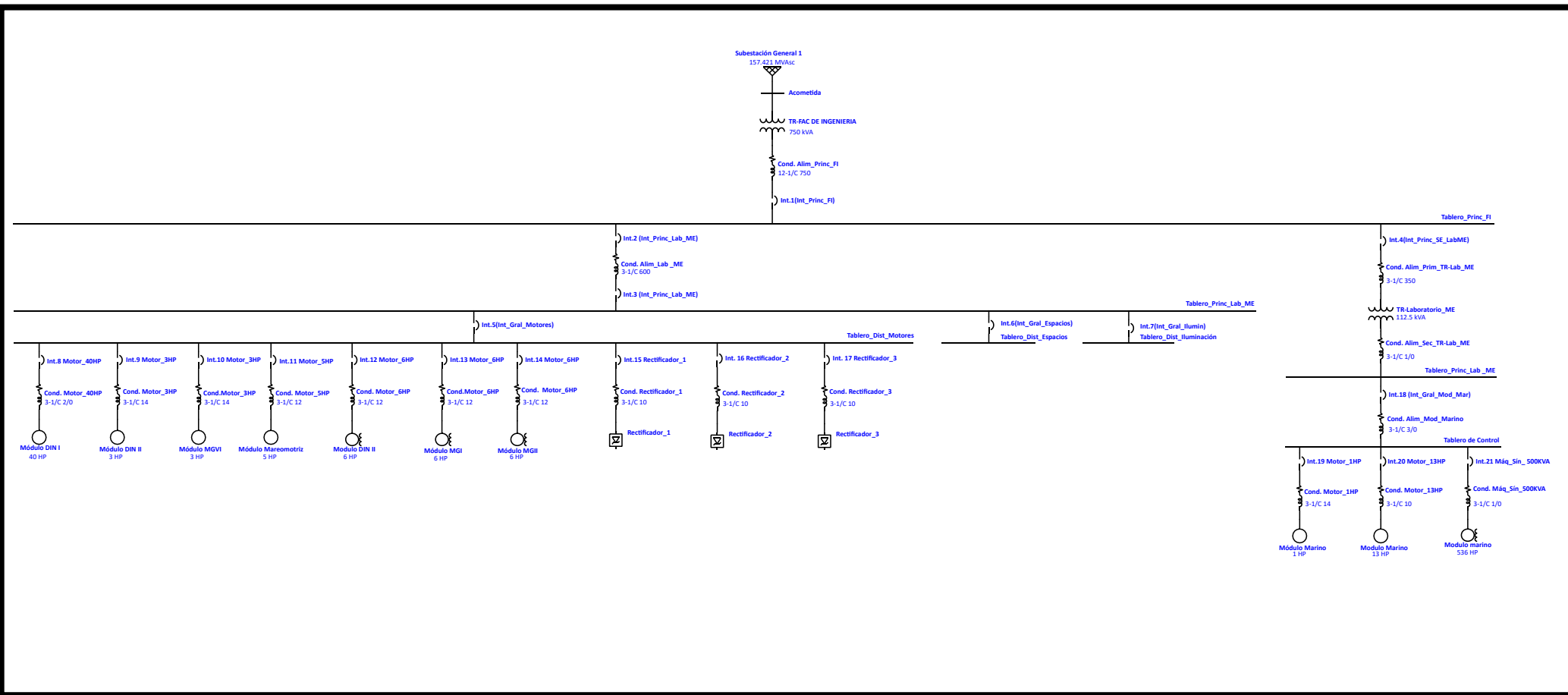


Figura 6.1 Diagrama unifilar propuesta del sistema eléctrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas



6.2 Coordinación de protecciones interruptor principal FI.

Los interruptores *Int.2(Int_Princ_Lab_ME)* e *Int.4(Int_Princ_SE_LabME)* se coordinan con el interruptor *Int.1(Int_Princ_FI)*, este último posee los ajustes y parámetros de operación establecidos por el personal autorizado de la facultad. Puesto que se desconoce si el interruptor *Int.1(Int_Princ_FI)* posee un tiempo de retardo, en este punto del sistema la coordinación tiene una selectividad parcial a partir de una magnitud de corriente de 4800 A.

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo de Largo-Retardo	Disparo de Corto-Retardo	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.1(Int_Princ_FI)	1600 A	Sin ajuste (1600 A)	Ajuste a 4800 A	Sin ajuste	-	Tablero Principal FI
Int.2(Int_Princ_Lab_ME)	400 A	300 A	Ajuste a 2400 A	Sin ajuste	0.3 s	Tablero Principal Laboratorio de ME
Int.4(Int_Princ_SE_LabME)	400 A	Sin ajuste (400 A)	Ajuste a 3200 A	Sin ajuste	0.3 s	Transformador de subestación del laboratorio de ME

Tabla 6.1 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección de estado sólido

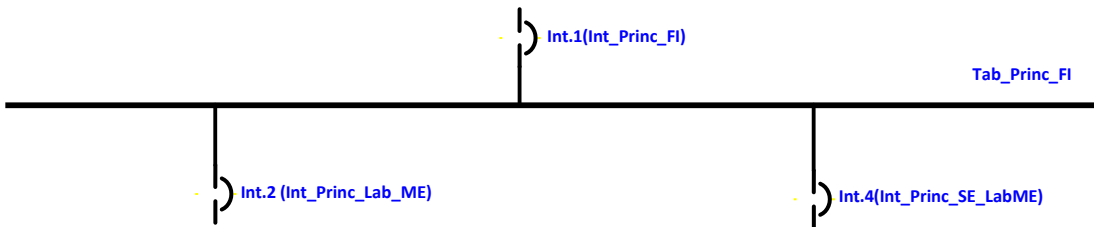
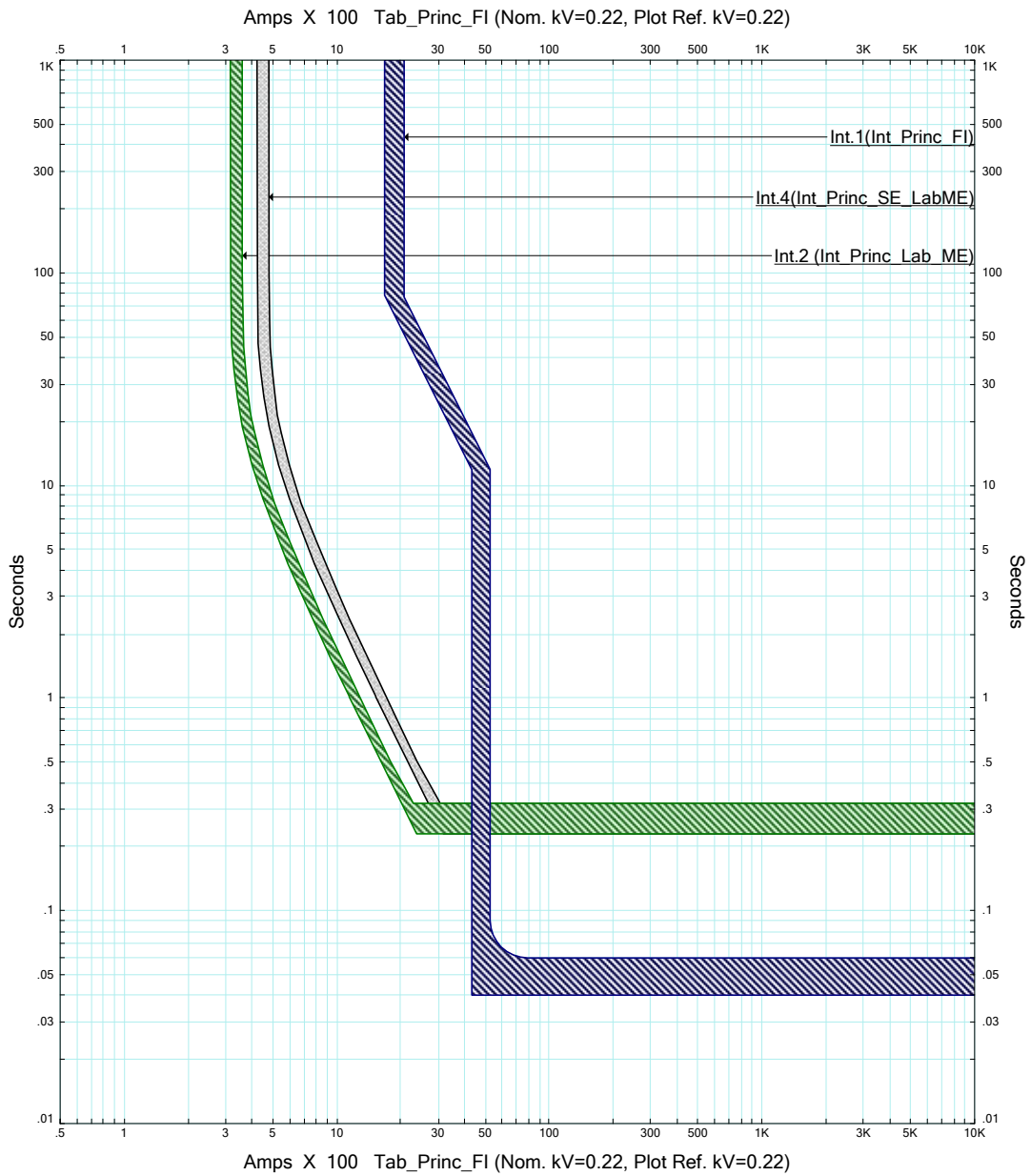


Figura 6.2 Coordinación de protecciones interruptor principal FI



6.3 Coordinación de protecciones tableros de distribución e interruptor principal del laboratorio.

El interruptor *Int.3(Int_Princ_Lab_ME)*, correspondiente al interruptor principal del laboratorio de máquinas eléctricas, comparte los mismos parámetros y ajustes de protección que el interruptor *Int.2(Int_Princ_Lab_ME)*. Se propone la incorporación del *Int.3(Int_Princ_Lab_ME)* como un medio de desconexión local permitiendo aislar completamente el laboratorio sin necesidad de acceder al Tablero Principal FI para operar el interruptor *Int.2(Int_Princ_Lab_ME)*.

A su vez el *Int.3(Int_Princ_Lab_ME)* cumple la función de protección de respaldo para los interruptores principales de los tableros de distribución para motores, para espacios interiores y para iluminación. No obstante, su intervención para aislar una falla eléctrica se considera únicamente como último recurso, dado que los interruptores principales de los tableros de distribución *Int.5(Int_GraL_Motores)*, *Int.6(Int_GraL_Espacios)* e *Int.7(Int_GraL_Ilumin)* actúan como protecciones de respaldo de las cargas conectadas en sus respectivos circuitos derivados.

Esta jerarquía de protecciones pretende evitar el disparo del interruptor principal del laboratorio, ya que si actúa desconectará la alimentación total del laboratorio, lo cual no es una acción óptima ya que afectaría a todo el sistema interrumpiendo el suministro en otros circuitos que no están en falla.

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo de Largo-Retardo	Disparo de Corto-Retardo	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.2(Int_Princ_Lab_ME)	400 A	300 A	Ajuste a 2400 A	Sin ajuste	0.3 s	Tablero Principal Laboratorio de ME
Int.3(Int_Princ_Lab_ME)	400 A	300 A	Ajuste a 2400 A	Sin ajuste	0.3 s	Tablero Principal Laboratorio de ME
Int.5(Int_GraL_Motores)	250 A	200 A	Ajuste a 1800 A	Sin ajuste	0.1 s	Tablero de distribución para motores
Int.6(Int_GraL_Espacios)	150 A	100 A	Ajuste a 1000 A	Sin ajuste	0.1 s	Tablero de distribución para espacios interiores
Int.7(Int_GraL_Ilumin)	60 A	30 A	Ajuste a 195 A	Sin ajuste	0.1 s	Tablero de distribución para iluminación

Tabla 6.2 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección de estado sólido

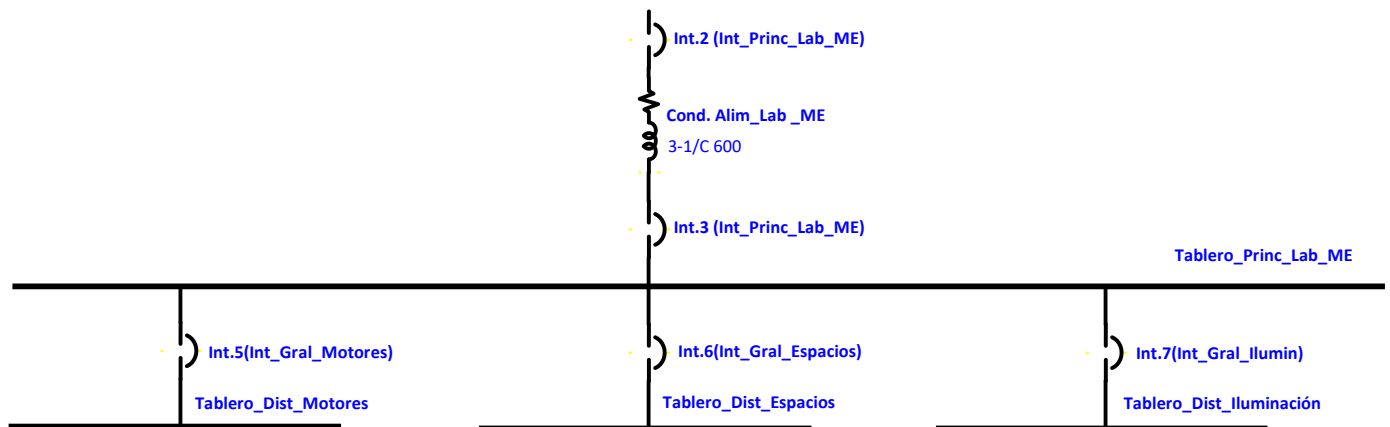
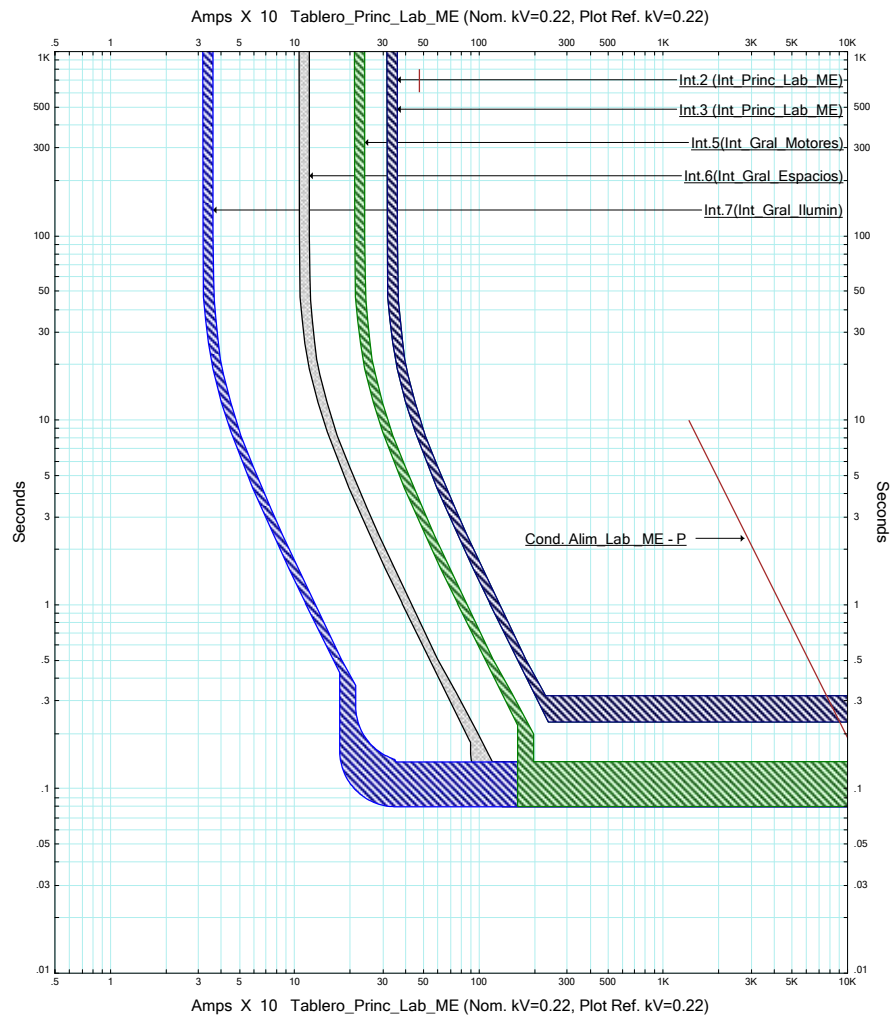


Figura 6.3 Coordinación de protecciones tableros de distribución e interruptor principal del laboratorio

6.4 Coordinación de protecciones tablero de distribución para motores.

La propuesta de incorporación del tablero de distribución específico para los motores del laboratorio tiene el propósito de mejorar la selectividad entre las protecciones. De esta manera, en caso de presentarse una falla eléctrica en alguno de los motores y que el dispositivo de protección asociado no opere adecuadamente intervendrá la protección de respaldo, la cual corresponde al interruptor general del tablero *Int.5(Int_Gral_Motores)*, evitando así que actúe el interruptor principal del laboratorio.

Este esquema asegura que en caso de presentarse una falla eléctrica en la cual el interruptor de un circuito derivado no opere adecuadamente y deba intervenir la protección de respaldo únicamente se interrumpa la continuidad del tablero de distribución para motores, manteniendo en operación el resto del sistema.

El principio de operación selectiva para el tablero de distribución de motores se aplica en el tablero de distribución para espacios interiores y en el tablero de distribución para iluminación.

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo de Largo-Retardo	Disparo de Corto-Retardo	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.5(Int_GraL_M áquinas)	250 A	200 A	Ajuste a 1800 A	Sin ajuste	0.1 s	Tablero de distribución de motores
Int.8 Motor_40HP	150 A	110 A	Ajuste a 1100 A	Ajuste a 1200 A	Sin retardo	Motor de 40 HP módulo DIN I

Tabla 6.3 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección de estado sólido

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo térmico	Disparo magnético	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.9 Motor_3HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Motor de 3 HP módulo DIN II
Int.10 Motor_3HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Motor de 3 HP módulo MGVI
Int.11 Motor_5HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Motor de 5 HP módulo mareomotriz
Int.12 Motor_6HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Máquina síncrona de 4 kVA módulo DIN II
Int.13 Motor_6HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Máquina síncrona de 4 kVA módulo MGI
Int.14 Motor_6HP	15 A	15 A	Fijo	–	–	Máquina síncrona de 4 kVA módulo MGII
Int.15 Rectificador_1	30 A	30 A	Fijo	–	–	Rectificador 1
Int.16 Rectificador_2	30 A	30 A	Fijo	–	–	Rectificador 2
Int.17 Rectificador_3	30 A	30 A	Fijo	–	–	Rectificador 3

Tabla 6.4 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección termomagnético

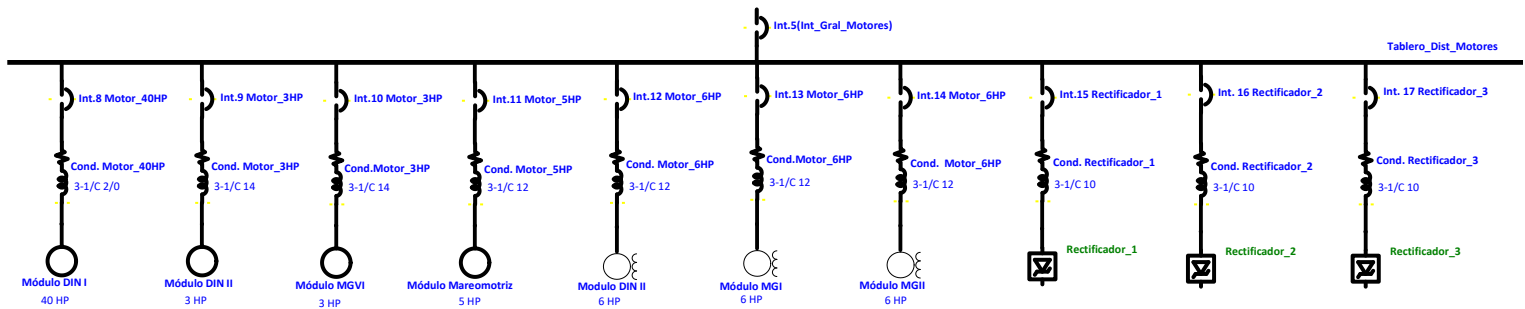
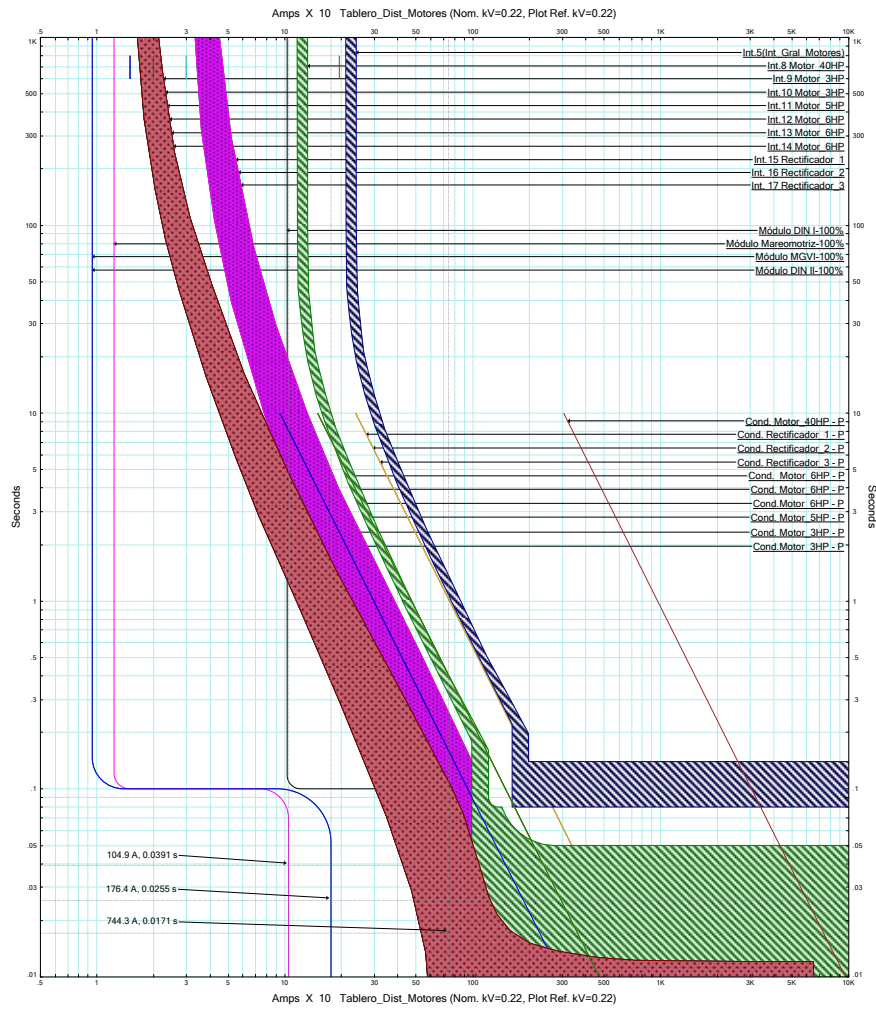


Figura 6.4 Coordinación de protecciones tablero de distribución para motores



6.5 Coordinación de protecciones sistema de 440 V.

El tablero de control mostrado en el diagrama unifilar mantiene el principio de operación selectiva de las protecciones conforme al criterio aplicado en los demás tableros de distribución. El *Int.18(Int_Gral_Mod_Mar)* actúa como protección de respaldo de los dispositivos de protección asociados a los circuitos derivados del tablero de control, asegurando que en caso de falla en alguno de los equipos la interrupción se limite únicamente al circuito afectado.

Por otro parte, el *Int.18(Int_Gral_Mod_Mar)* desempeña la función de protección del secundario transformador de 112.5 KVA evitando que una corriente de falla proveniente del tablero de control se propague hacia el tablero principal del laboratorio y, en consecuencia, hacia el transformador.

El esquema de coordinación implementado asegura que las protecciones primarias aíslen las fallas locales, si estas no actúan intervendrá la protección de respaldo *Int.18(Int_Gral_Mod_Mar)* para aislar la falla.

El interruptor *Int.4(Int_Princ_SE_LabME)*, ubicado en el lado de alimentación del transformador tiene la función de proteger el devanado primario y los conductores de alimentación frente a condiciones falla que pudieran originarse en el transformador o en su circuito de conexión. Este dispositivo constituye la protección principal del lado de alta tensión, coordinada selectivamente con las protecciones instaladas en el lado secundario de manera que solo intervenga en casos de falla severa o cuando las protecciones secundarias no logren despejar la falla.

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo de Largo-Retardo	Disparo de Corto-Retardo	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.4(Int_Princ_SE_LabME)	400 A	Sin ajuste (400 A)	Ajuste a 3200 A	Sin ajuste	0.3 s	Transformador de subestación del laboratorio de ME
Int.18(Int_Gral_Mod_Mar)	150 A	Sin ajuste (150 A)	Ajuste a 1500 A	Sin ajuste	0.1 s	Tablero de Control
Int.21 Máq_Sín_500KV A	150 A	110 A	Ajuste a 825 A	Ajuste a 900 A	Sin retardo	Máquina síncrona de 500 KVA módulo marino

Tabla 6.5 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección de estado sólido

Dispositivo de protección	Corriente nominal	Disparo térmico	Disparo magnético	Disparo instantáneo	Tiempo de retardo	Elemento protegido
Int.19 Motor_1HP	15 A	15 A	Sin ajuste	Sin ajuste	Sin retardo	Motor de 1 HP módulo Marino
Int.20 Motor_13HP	20 A	20 A	Sin ajuste	Sin ajuste	Sin retardo	Motor de 13 HP módulo Marino

Tabla 6.6 Ajustes y parámetros de operación dispositivos de protección termomagnético

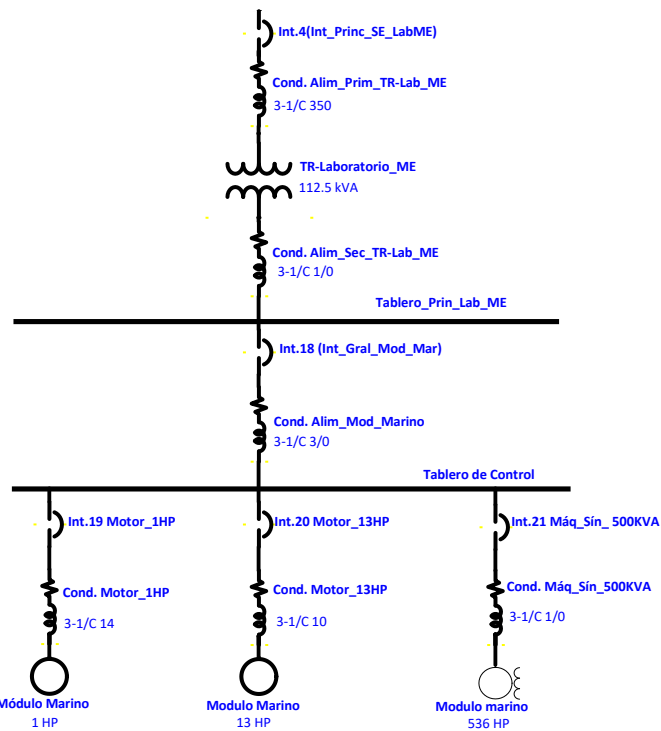
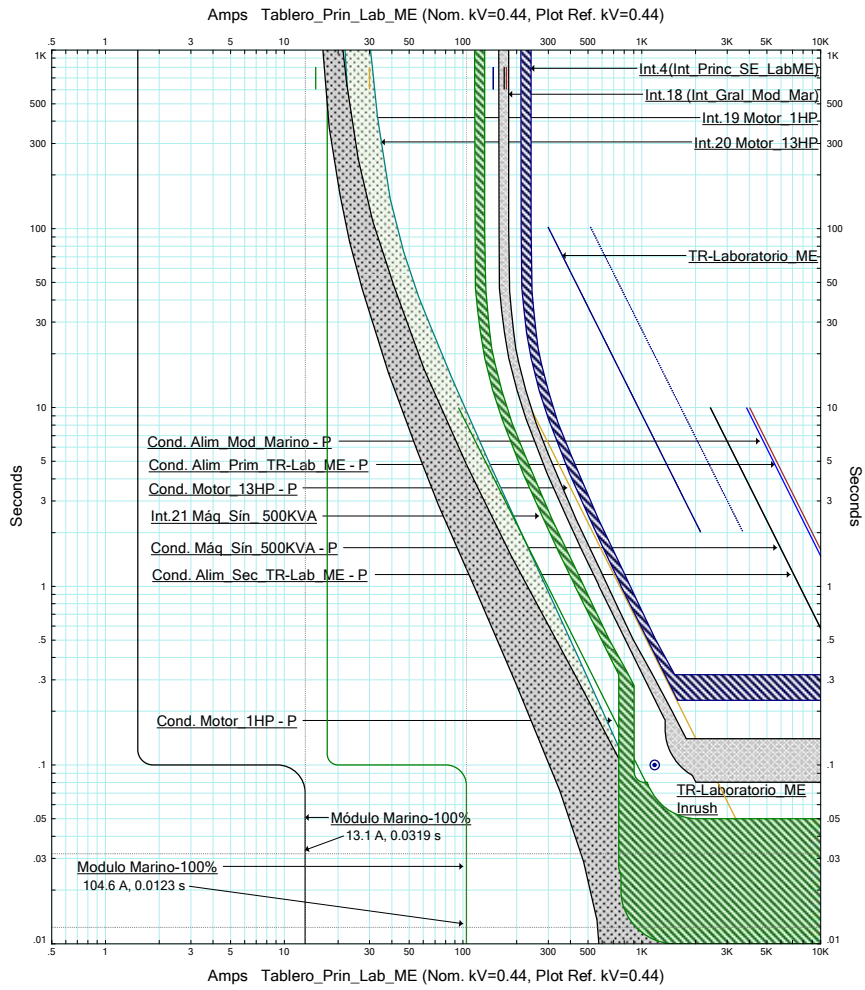


Figura 6.5 Coordinación de protecciones sistema de 440 V



CAPÍTULO 7. CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA.

El conductor de puesta a tierra es un conductor eléctrico que proporciona un camino de baja impedancia hacia tierra para disipar las corrientes de falla. Los equipos eléctricos que posean partes metálicas expuestas no destinadas a conducir corriente eléctrica deberán ser conectados a tierra mediante un conductor de puesta a tierra cuando exista la posibilidad de contacto con personas, esto con la finalidad de proteger su integridad cuando dichas superficies metálicas resulten energizadas de manera accidental.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 especifica los requisitos para el dimensionamiento del calibre del conductor de puesta a tierra en función de las condiciones del sistema. El artículo 250-122(a) establece lo siguiente:

Los conductores de puesta a tierra de equipos, de cobre, aluminio, o aluminio recubierto de cobre, del tipo alambre, no deben ser de tamaño menor a los mostrados en la Tabla 250-122, pero en ningún caso se exigirá que sean mayores que los conductores de los circuitos que alimentan el equipo. (Secretaría de Energía, 2012, p.107)

Tabla 250-122.- Tamaño mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos

Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones etc., sin exceder de: (amperes)	Tamaño			
	Cobre		Cable de aluminio o aluminio con cobre	
	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
15	2.08	14	-	-
20	3.31	12	-	-
60	5.26	10	-	-
100	8.37	8	-	-
200	13.30	6	21.20	4
300	21.20	4	33.60	2
400	33.60	2	42.40	1
500	33.60	2	53.50	1/0
600	42.40	1	67.40	2/0
800	53.50	1/0	85.00	3/0
1000	67.40	2/0	107	4/0
1200	85.00	3/0	127	250
1600	107	4/0	177	350
2000	127	250	203	400
2500	177	350	304	600
3000	203	400	304	600
4000	253	500	380	750
5000	355	700	608	1200
6000	405	800	608	1200

Figura 7.1 Tamaño mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012 (<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)



De acuerdo con la tabla el tamaño mínimo del conductor de puesta a tierra se determina con base en la capacidad o ajuste del dispositivo de protección contra sobrecorriente que protege el circuito de fase.

En el análisis realizado para dimensionar los dispositivos de protección de las máquinas eléctricas del laboratorio se obtuvieron diversos valores nominales, no obstante, algunos de los valores no se encuentran de manera explícita en la Tabla 250-122.

Por lo anterior, se selecciona el calibre correspondiente al valor nominal inmediatamente superior al obtenido para el dispositivo de protección. Este criterio asegura que el conductor de puesta a tierra siempre disponga de una capacidad de conducción de corriente suficiente, ya que considerar el valor inferior al obtenido para el dispositivo de protección implicaría un riesgo de subdimensionamiento del conductor, esto podría causar sobrecalentamiento y daños al aislamiento.

7.1 Resultados.

La selección de los conductores se muestra en la Tabla 7.1, se relaciona cada equipo con el calibre de conductor correspondiente.

Elemento	Conductor de puesta a tierra
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	6 AWG
Dinamómetro módulo DIN I	8 AWG
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	14 AWG
Máquinas síncronas 4 kVA módulo DIN II	14 AWG
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	10 AWG
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	14 AWG
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	10 AWG
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	14 AWG
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	10 AWG
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGV	10 AWG
Máquina síncrona 5 KVA módulo MGVI	14 AWG
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	14 AWG
Motor de inducción 5 HP módulo MM	14 AWG
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	10 AWG
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	14 AWG
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	6 AWG
Máquina de CD de 75 KW módulo Marino	8 AWG
Máquina de CD de 55 KW módulo Marino	10 AWG
Transformador trifásico de 112.5 KVA	2 AWG

Tabla 7.1 Conductor de puesta a tierra para equipos



CAPÍTULO 8. DUCTOS ELÉCTRICOS.

El diámetro de tubería por donde pasan los conductores constituye un aspecto importante en el diseño de las instalaciones ya que influye en la seguridad y vida útil del sistema eléctrico.

Un espacio adecuado dentro de la tubería favorece la circulación de aire para disipar la acumulación de calor generado por el flujo de corriente en los conductores reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento y prolongando su vida útil evitando el deterioro prematuro de su aislamiento y minimizando el riesgo de fallas eléctricas a largo plazo.

El dimensionamiento de la tubería se realiza conforme a los criterios establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012.

La Tabla 1.- Porcentaje de la sección transversal en tubo Conduit y en tubería para los conductores, proporciona el porcentaje de ocupación permitido en tubo conduit y en tubería de acuerdo con la cantidad de conductores eléctricos que se instalen en su interior, considerando todos los conductores de fase, conductor de puesta a tierra y neutro cuando se utilice para determinar el porcentaje de ocupación total.

Tabla 1.- Porcentaje de la sección transversal en tubo conduit y en tubería para los conductores

Número de conductores	Todos los tipos de conductores
1	53
2	31
Más de 2	40

Figura 8.1 Porcentaje de la selección transversal en tubo Conduit y en tubería para los conductores. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012

(<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

El área total ocupada por los conductores que pueden alojarse en una tubería se estima mediante la Tabla 5.- Dimensiones de los conductores aislados y cables para artefactos, la cual proporciona el área de cada calibre de conductor, según el tipo de aislamiento y el calibre correspondiente.

Tabla 5.- Dimensiones de los conductores aislados y cables para artefactos

Tipo	Tamaño		Diámetro aproximado	Área aproximada
	mm ²	AWG o kcmil	mm	mm ²
RHF-2, FFH-2	0.824	18	3.454	9.355
	1.31	16	3.759	11.1
	2.08	14	4.902	18.9
	3.31	12	5.385	22.77



RHH, RHW, RHW-2	5.26	10	5.994	28.19
	6.63	8	8.28	53.87
	8.37	6	9.246	67.16
	21.2	4	10.46	86
	26.7	3	11.18	98.13
	33.6	2	11.99	112.9
	42.4	1	14.78	171.6
	53.5	1/0	15.8	196.1
	67.4	2/0	16.97	226.1
	85	3/0	18.29	262.7
	107	4/0	19.76	306.7
	127	250	22.73	405.9
	152	300	24.13	457.3
	177	350	25.43	507.7
	203	400	26.62	556.5
	253	500	28.78	650.5
	304	600	31.57	782.9
	355	700	33.38	874.9
	380	750	34.24	920.8
405	800	35.05	965	

Figura 8.2 Dimensiones de los conductores aislados y cables para artefactos. De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012 (<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

La Tabla 4.- Dimensiones y porcentaje disponible para los conductores del área del tubo Conduit, presenta una clasificación de tuberías fabricadas en distintos materiales, cada uno para condiciones y requerimientos específicos de instalación. La selección del material influye en las dimensiones internas de la tubería y, por consiguiente, en su capacidad para alojar conductores eléctricos.

Debido a las condiciones del laboratorio se considera que el material a utilizar será tubo conduit metálico semipesado (IMC).

El tubo conduit metálico semipesado ofrece una resistencia y durabilidad superior al tubo conduit PVC, no metálico y metálico flexible, posee propiedades estructurales similares a las del tubo conduit metálico pesado, pero reduciendo su peso sin disminuir mucho su resistencia y protegiendo adecuadamente la integridad del sistema eléctrico, siendo más económico en comparación con el tubo conduit metálico pesado.

Tabla 4.- Dimensiones y porcentaje disponible para los conductores del área del tubo conduit

Artículo 342 – Tubo conduit metálico semipesado (IMC)

Designación métrica	Tamaño comercial	Diámetro interno	100% del área total	60% del área total	Un conductor fr = 53%	Dos conductores fr = 31%	Más de dos conductores fr = 40%
		mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²



12	3/8	-	-	-	-	-	-
16	1/2	16.8	222	133	117	69	89
21	3/4	21.9	377	226	200	117	151
27	1	28.1	620	372	329	192	248
35	1 1/4	36.8	1064	638	564	330	425
41	1 1/2	42.7	1432	859	759	444	573
53	2	54.6	2341	1405	1241	726	937
63	2 1/2	64.9	3308	1985	1753	1026	1323
78	3	80.7	5115	3069	2711	1586	2046
91	3 1/2	93.2	6822	4093	3616	2115	2729
103	4	105.4	8725	5235	4624	2705	3490

Figura 8.3 Tubo conduit metálico semipesado (IMC). De “NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones Eléctricas (utilización)”, por la Secretaría de Energía, 2012

(<https://dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=11&day=29#gsc.tab=0>)

8.1 Ducto eléctrico de servicio para el motor de corriente directa del módulo MGI.

Son dos conductores portadores de corriente y el conductor de puesta a tierra los que pasaran a través de la tubería, al ser más de dos conductores se permitirá un relleno del 40%.

El aislamiento de los conductores es RHW-2, el calibre de los conductores para alimentar el motor de corriente directa corresponde a 2 AWG, el calibre del conductor de puesta a tierra corresponde a 10 AWG, por lo tanto, el área total ocupada por los conductores es la siguiente:

Cantidad de conductores	Calibre AWG	Área de la sección transversal mm ²	Total mm ²
2	2	112.9	225.8
1	10	28.19	28.19
Total			253.99

Tabla 8.1 Área de ocupación total de los conductores

De acuerdo con el apartado del Artículo 342 – Tubo conduit metálico semipesado (IMC) se requiere una designación métrica de 35 o un tamaño comercial de 1 ¼ para un relleno de 40%.

El procedimiento se aplica para los conductores asociados a los motores de corriente directa correspondientes a los módulos MGII, Motor Serie y MGV y el generador de CD del módulo Marino, considerando el calibre de conductor específico para cada equipo.

8.2 Ducto eléctrico de servicio para el motor de inducción del módulo DIN I.

Son tres conductores portadores de corriente y el conductor de puesta a tierra los que pasaran a través de la tubería, al ser más de dos conductores se permitirá un relleno del ducto del 40%.



El aislamiento de los conductores es RHW-2, el calibre de los conductores para alimentar el motor de inducción corresponde a 2/0 AWG, el calibre del conductor de puesta a tierra corresponde a 6 AWG, por lo tanto, el área total ocupada por los conductores es la siguiente:

Cantidad de conductores	Calibre AWG	Área de la sección transversal mm ²	Total mm ²
3	2/0	226.1	678.3
1	6	67.16	67.16
Total			745.46

Tabla 8.2 Área de ocupación total de los conductores

De acuerdo con el apartado del Artículo 342 – Tubo conduit metálico semipesado (IMC) se requiere una designación métrica de 53 o un tamaño comercial de 2 para un relleno de 40%.

El procedimiento se aplica para los conductores asociados a los motores de inducción correspondientes a los módulos DIN II, MGVI, MM y Marino, así como para las máquinas síncronas pertenecientes a los módulos DIN II, MGI, MGII y Marino, considerando el calibre de conductor específico para cada equipo.

Bajo el mismo criterio se dimensiona el ducto para los conductores alimentadores módulo Marino, laboratorio de máquinas eléctricas, devanado primario y devanado secundario del transformador del laboratorio de máquinas eléctricas.

8.3 Resultados.

Elemento	Designación métrica	Tamaño comercial
Motor de inducción 40 HP módulo DIN I	53	2
Motor de inducción 3 HP módulo DIN II	16	½
Máquinas síncronas 4 kVA módulo DIN II	16	½
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGI	35	1 ¼
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGI	16	½
Máquina de corriente directa 7.5 HP módulo MGII	35	1 ¼
Máquina síncrona 4 kVA módulo MGII	16	½
Máquinas de corriente directa 7.5 HP módulo Motor Serie	27	1
Máquinas de corriente directa 3 HP módulo MGVI	21	¾
Motor de inducción 3 HP módulo MGVI	16	½
Motor de inducción 5 HP módulo MM	16	½
Motor de inducción 13 HP módulo Marino	21	¾
Motor de inducción 1 HP módulo Marino	16	½
Máquina síncrona 500 kVA módulo Marino	53	2
Máquina de CD de 75 KW módulo Marino	35	1 ¼
Alimentador módulo Marino	53	2
Alimentador Laboratorio Máquinas Eléctricas	91	3 ½
Alimentador primario TR-Laboratorio ME	78	3
Alimentador secundario TR-Laboratorio ME	53	2

Tabla 8.3 Designación métrica y tamaño comercial de tuberías



CAPÍTULO 9. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

El sistema de puesta a tierra es un conjunto de conductores y electrodos interconectados con el propósito de establecer una referencia hacia tierra y proporcionar una trayectoria para la disipación de corrientes de falla.

El sistema de puesta a tierra depende de una serie de parámetros para evaluar su diseño, entre estos están:

- Resistividad del suelo: La resistividad del suelo define la capacidad con que el terreno puede conducir y disipar la corriente hacia tierra.
- Área utilizada: Conocer el área permite definir la extensión.
- Corriente de falla y tiempo de despeje: La magnitud de la corriente de falla y el tiempo de operación de los dispositivos de protección determinan la cantidad de energía que el sistema debe disipar. Corrientes de falla elevadas y tiempos de despeje extensos expone al personal a tensiones peligrosas, esto requiere de configuraciones o arreglos más extensos y mayor sección de conductores que influyen en el costo del sistema.

Debido a que en el laboratorio se contempla realizar prácticas con motores, generadores y transformadores de categoría industrial es fundamental disponer de un sistema de puesta a tierra que garantice la seguridad del personal y la protección de los equipos. Se propone la instalación de un sistema de puesta a tierra de tipo malla enterrada conformada por conductores de cobre desnudo.

9.1 Metodología.

Con el propósito de asegurar que el sistema de puesta a tierra cumpla con los requerimientos de seguridad y desempeño se adoptó una metodología para su diseño conforme a las siguientes etapas:

1. Propuesta inicial del sistema de puesta a tierra.

- Se realiza la propuesta del diseño del sistema de puesta a tierra con el propósito de cumplir los criterios de seguridad definidos por normatividad.

2. Evaluación de la propuesta inicial.

- Si la propuesta inicial cumple con los criterios de seguridad esta se establece como propuesta definitiva.



- Si la propuesta inicial no cumple con los criterios de seguridad se procederá a realizar una nueva propuesta del diseño del sistema de puesta a tierra.

3. Nueva propuesta del diseño del sistema de puesta a tierra.

- La nueva propuesta se evalúa bajo los criterios de seguridad definidos por normatividad.
- Si la nueva propuesta cumple con los criterios de seguridad, esta se establece como propuesta definitiva.
- Si la nueva propuesta no cumple con los criterios de seguridad se procederá a realizar nuevos diseños hasta garantizar su cumplimiento.

4. Implementación de sistema de electrodos profundos.

- En caso de que ninguna propuesta del sistema de puesta a tierra logre satisfacer los criterios de seguridad se propondrá la incorporación de un sistema de electrodos profundos con el fin de alcanzar capas de menor resistividad para reducir significativamente la resistencia de puesta a tierra.

Se tomó como referencia el estándar IEEE Std. 80-2000 para la realizar el diseño del sistema de puesta a tierra. El estándar proporciona una metodología para el diseño de mallas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas, no obstante, sus principios y criterios pueden adaptarse a otros tipos de instalaciones que no correspondan específicamente a subestaciones.

La Figura 9.1 muestra el procedimiento a seguir para diseñar el sistema de puesta a tierra.

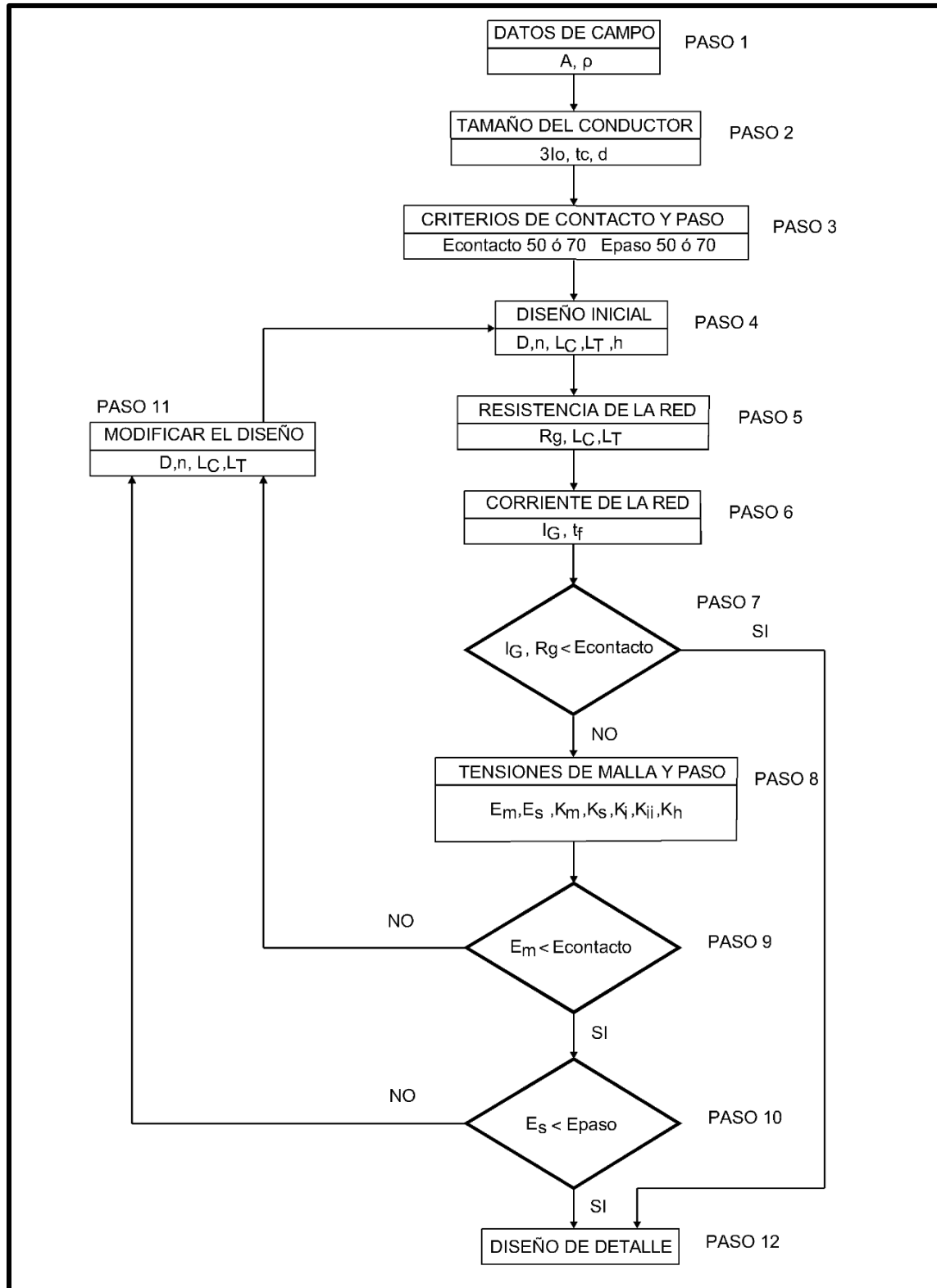


Figura 9.1 Diagrama de flujo del procedimiento de diseño (IEEE Std. 80-2000)



9.2 Diseño y cálculo del sistema de puesta a tierra.

Paso 1. Datos de campo.

El laboratorio de máquinas eléctricas cuenta con una estructura existente, el piso de concreto posee un espesor aproximado de 0.9 [m], por lo cual excavar para poder acceder al terreno requiere de maniobras complejas que representan un alto costo económico e interrupciones operativas en el laboratorio, por esa razón se ha evaluado como alternativa la implementación de la malla de puesta a tierra en la capa superficial de concreto. El concreto seco no es el medio más eficiente para disipar corrientes de falla ya que posee alta resistividad, sin embargo, su uso para un sistema de puesta a tierra es una solución práctica al tratarse de una edificación existente.

Las dimensiones para realizar el diseño de la malla corresponden a una longitud de 10.63 [m] × 17.39 [m] y un área de 184.85 [m²].

Se considera una resistividad de 5000 [Ω·m] para la capa superficial de concreto.

Paso 2. Calibre del conductor.

Mediante la siguiente ecuación se obtiene el área de la sección transversal del conductor requerido para el diseño de la malla.

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \sqrt{t_c} \quad (19)$$

Donde:

A_{kcmil} : Área del conductor en kcmil

I : Corriente de falla rms en kA

t_c : Duración de la falla

K_f : Constante material que depende del metal del conductor y de sus propiedades térmicas.

Se propone utilizar cobre comercial de alambre duro por ser un material que cuenta con gran conductividad eléctrica y térmica, además de ser resistente a la corrosión. Consultando la Tabla 2-Constante de materiales del IEEE Std. 80-2000 (IEEE, 2000, p.44) el valor de K_f corresponde a 7.06.

Se asumirá el tiempo de duración de la falla en 0.1 segundos correspondiente al tiempo de operación de las protecciones de respaldo.

Se realiza el análisis de cortocircuito para determinar el valor máximo esperado de corriente de cortocircuito monofásico a tierra en el laboratorio.

Cálculo de cortocircuito monofásico

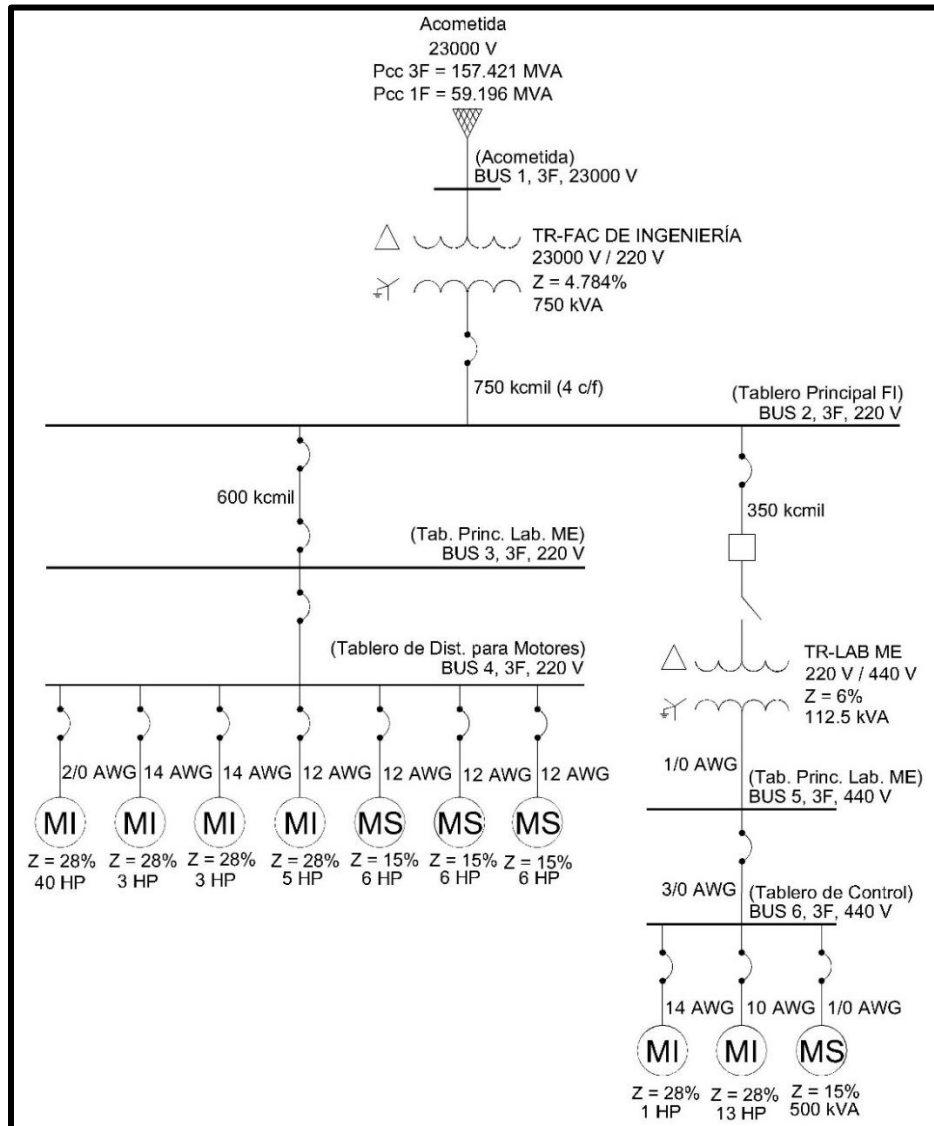


Figura 9.2 Diagrama unifilar

Reactancias de secuencia cero

Acometida

$$I_{cc} = \frac{59.196 \text{ MVA}}{(\sqrt{3})(23 \text{ kV})} = 1485.94 \text{ A}$$

$$I_{base} = \frac{750 \text{ kVA}}{(\sqrt{3})(23 \text{ kV})} = 18.82 \text{ A}$$

$$I_{p.u.} = \frac{1485.94}{18.82} = 78.95 \text{ p.u.}$$



$$I_{a0} = \frac{78.95}{3} = 26.31$$

$$I_{a0} = \frac{E}{X_0 + X_1 + X_2} \quad (20)$$

Despejando la ecuación (20):

$$X_0 = \frac{E}{I_{a0}} - 2X_1 \quad (21)$$

Sustituyendo parámetros en la ecuación (21):

$$X_0 = \frac{1}{26.31} - 2(0.0047) = 0.0286 \text{ p.u.}$$

Transformadores

Transformador de 750 KVA: $X_0 + X_1 + X_2 = 0.0478 \text{ p.u.}$

Transformador de 112.5 KVA: $X_0 + X_1 + X_2 = 0.4 \text{ p.u.}$

Conductores

$$Z_{base\ 220\ V} = \frac{(0.22)^2}{0.75} = 0.0645 \Omega$$

$$Z_{base\ 440\ V} = \frac{(0.44)^2}{0.75} = 0.2581 \Omega$$

Impedancia de secuencia cero de conductores

1) Alimentador principal FI, 220 V

Conductor: Calibre 750 kcmil, Longitud = 50 metros

$$Z = 0.217 + 0.387j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - 75)] = (0.217)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.2275$$

$$Z = 0.2275 + 0.387j / 4 = 0.0568 + 0.0967j$$

$$Z_{total} = (0.0568 + 0.0967j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.05 \text{ } [\text{km}]) = 0.0028 + 0.0048j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{p.u.} = 0.0434 + 0.0744j$$

2) Alimentador laboratorio de máquinas eléctricas, 220 V



Conductor: Calibre 600 kcmil, Longitud = 19.82 metros

$$Z = 0.2583 + 0.3873j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.2583)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.2708$$

$$Z = 0.2708 + 0.3873j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{\text{total}} = (0.2708 + 0.3873j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.01982 \text{ } [\text{km}]) = 0.0053 + 0.0076j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0821 + 0.1178j$$

3) Alimentador módulo Marino, 440 V

Conductor: Calibre 3/0 AWG, Longitud = 24.82 metros

$$Z = 0.8164 + 0.4196j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (0.8164)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 0.8559$$

$$Z = 0.8559 + 0.4196j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{\text{total}} = (0.8559 + 0.4196j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.02482 \text{ } [\text{km}]) = 0.0212 + 0.0104j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0821 + 0.0402j$$

4) Alimentador secundario transformador laboratorio de máquinas eléctricas, 440 V

Conductor: Calibre 1/0 AWG, Longitud = 9 metros

$$Z = 1.2401 + 0.4438j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Resistencia corregida:

$$R2 = R1[1 + \alpha(T2 - 75)] = (1.2401)[1 + (0.00323)(90 - 75)] = 1.3$$

$$Z = 1.3 + 0.4438j \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{\text{total}} = (1.3 + 0.4438j \text{ } [\Omega/\text{km}])(0.009 \text{ } [\text{km}]) = 0.0117 + 0.0039j \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\text{p.u.}} = 0.0453 + 0.0151j$$

Diagrama de impedancias en por unidad

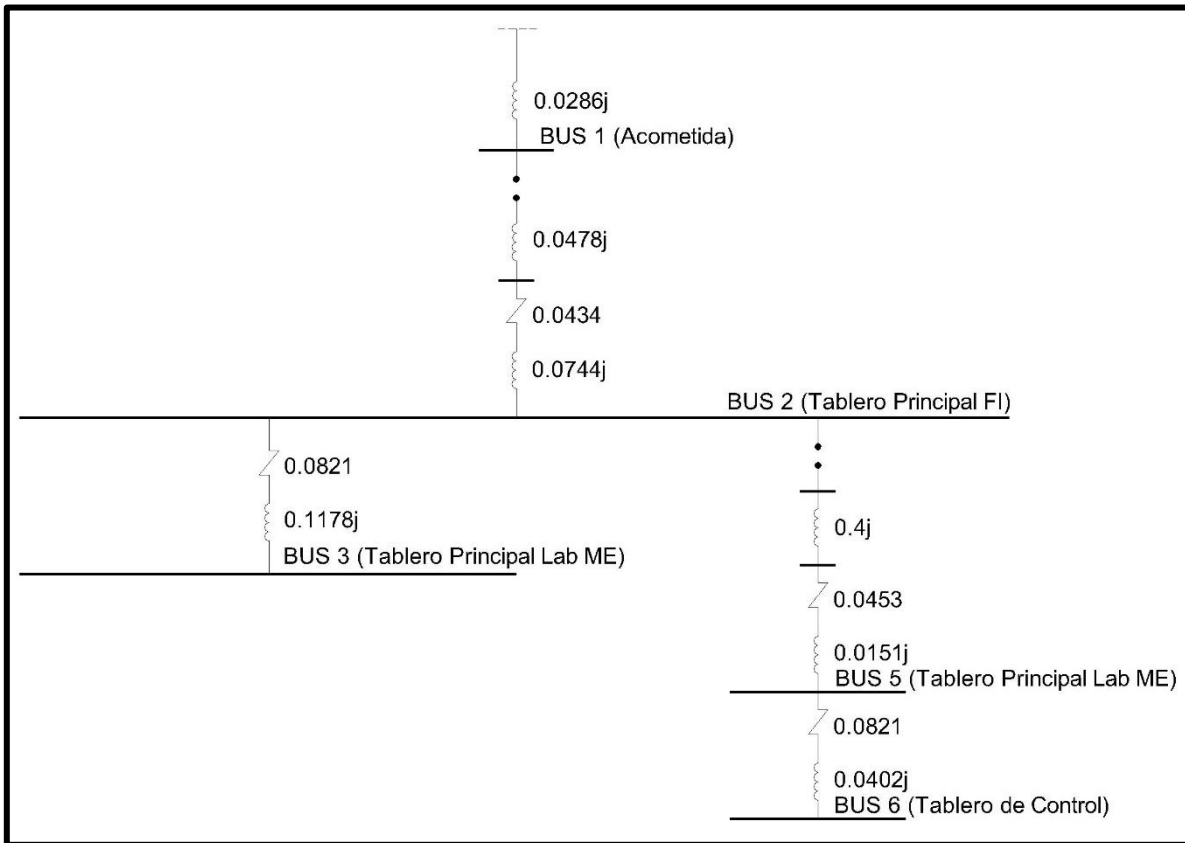


Figura 9.3 Diagrama de impedancias

Reducción de la red en cada punto de falla

BUS 1

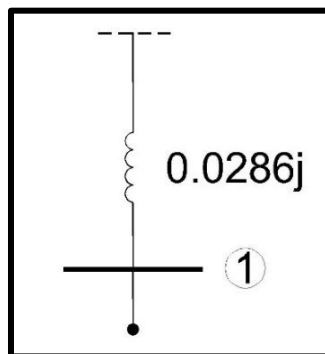


Figura 9.4 Impedancia equivalente en BUS 1

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0286j$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2)(0.0046j) + (0.0286j)} = -26.4550j \text{ p.u.}$$

$$I_a = (3)(-26.4550j) = -79.3650j = 79.365 \angle -90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{CC} = I_a \times I_{base} = (79.365)(18.826) = 1494.12 \text{ A}$$

BUS 2

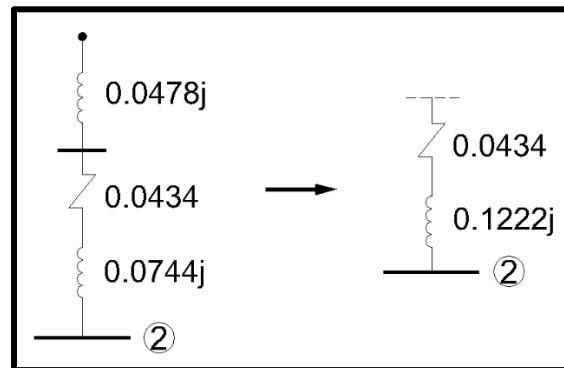


Figura 9.5 Impedancia equivalente en BUS 2

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0434 + 0.1222j$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2)(0.0116 + 0.0710j) + (0.0434 + 0.1222j)} = 0.8971 - 3.5588j \text{ p.u.}$$

$$I_a = (3)(0.8971 - 3.5588j) = 2.6913 - 10.6765j = 11.01 \angle -75.85^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{CC} = I_a \times I_{base} = (11.01)(1968.239) = 21670.31 \text{ A}$$

BUS 3

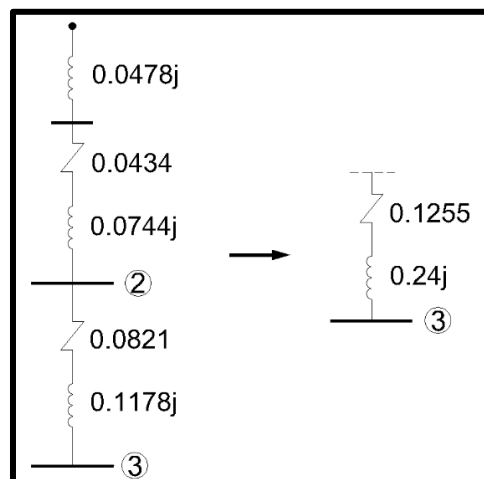


Figura 9.6 Impedancia equivalente en BUS 3



Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.1255 + 0.24j$$

$$I_{a0} = \frac{1.014}{(2)(0.0340 + 0.1157j) + (0.1255 + 0.24j)} = 0.7556 - 1.8408j \text{ p. u.}$$

$$I_a = (3)(0.7556 - 1.8408j) = 2.2668 - 5.5224j = 5.969 \angle -67.68^\circ \text{ p. u.}$$

$$I_{CC} = I_a \times I_{base} = (5.969)(1968.239) = 11748.41 \text{ A}$$

BUS 5

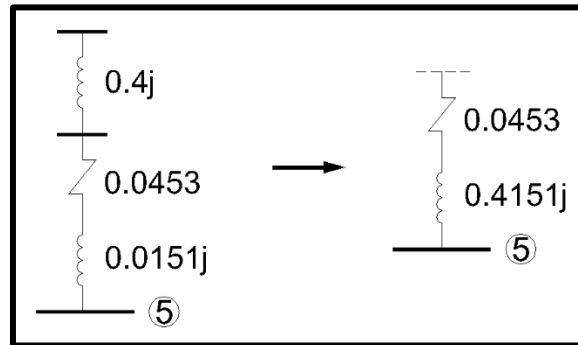


Figura 9.7 Impedancia equivalente en BUS 4

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.0453 + 0.4151j$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2)(0.0257 + 0.1604j) + (0.0453 + 0.4151j)} = 0.1755 - 1.3358j \text{ p. u.}$$

$$I_a = (3)(0.1755 - 1.3358j) = 0.5265 - 4.0074j = 4.041 \angle -82.51^\circ \text{ p. u.}$$

$$I_{CC} = I_a \times I_{base} = (4.041)(984.119) = 3976.82 \text{ A}$$

BUS 6

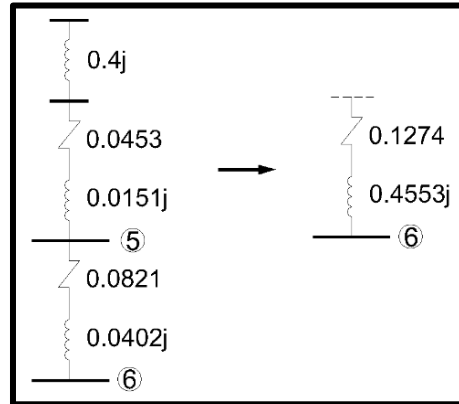


Figura 9.8 Impedancia equivalente en BUS 5

Corriente de cortocircuito:

$$Z_{equivalente} = 0.1274 + 0.4553j$$

$$I_{a0} = \frac{1}{(2)(0.0148 + 0.1537j) + (0.1274 + 0.4553j)} = 0.2589 - 1.2578j \text{ p.u.}$$

$$I_a = (3)(0.2589 - 1.2578j) = 0.7767 - 3.7734j = 3.852 \angle -78.36^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{CC} = I_a \times I_{base} = (3.852)(984.119) = 3790.82 \text{ A}$$

BUS	Corriente de cortocircuito [kA]
1	1.494
2	21.670
3	11.748
5	3.976
6	3.790

Tabla 9.1 Resumen del cálculo de cortocircuito en BUSES principales.

Estudio de cortocircuito por ETAP

BUS	Corriente de cortocircuito [kA]
1	1.489
2	20.545
3	11.152
5	3.829
6	3.644

Tabla 9.2 Resumen del cálculo de cortocircuito en BUSES principales.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de cortocircuito, el BUS 3, correspondiente al tablero principal del laboratorio, presenta una magnitud de corriente de cortocircuito monofásico a tierra de 11.748 kA, la cual constituye el valor máximo esperado dentro del sistema eléctrico del laboratorio.

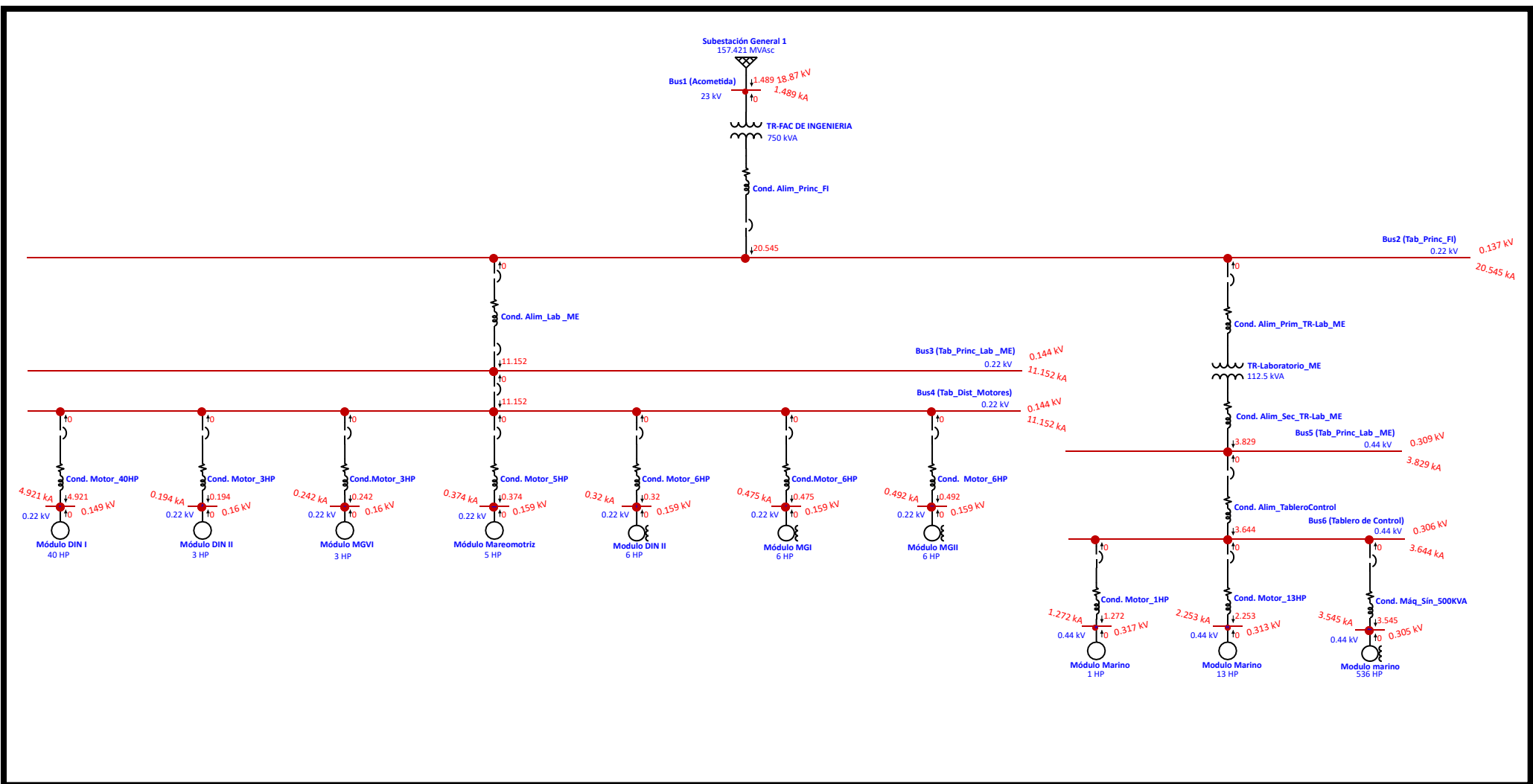


Figura 9.9 Análisis de cortocircuito monofásico



Sustituyendo los parámetros en la ecuación (19) el área de sección transversal requerida de los conductores en kcmil es:

$$A_{kcmil} = (11.748 kA) \cdot (7.06)(\sqrt{0.1}) = 26228.20 kcmil$$

Basado en este cálculo, se debe utilizar conductor de cobre calibre 6 AWG, sin embargo, el IEEE Std. 80-2000 establece que debido a los requisitos de resistencia mecánica y robustez generalmente el calibre 4/0 AWG es el comúnmente utilizado, presenta una sección transversal mayor lo que lo hace más resistente a esfuerzos mecánicos, por lo cual se propone usar conductor desnudo de cobre calibre 4/0 AWG.

Paso 3. Criterio de potencial de contacto y de paso.

Los potenciales tolerables son el límite máximo seguro de voltaje entre dos puntos del cuerpo para que la magnitud de corriente resultante no cause un daño grave durante el tiempo que dura una falla eléctrica.

El efecto de la corriente eléctrica depende de varios factores, la magnitud de corriente que circula a través del cuerpo, el tiempo a la exposición de la corriente y la zona por donde circula. Las consecuencias de la exposición a la corriente durante una falla eléctrica pueden ser fatales si la corriente circula por el cerebro, corazón o pulmones.

Los efectos fisiológicos causados por la exposición a la corriente eléctrica son los siguientes:

- 0 – 0.5 [mA]
No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 [mA].
- 0.5 – 10 [mA]
Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 [mA].
- 10 – 25 [mA]
Contracción muscular de piernas y brazos con dificultad para soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.
- 25 – 40 [mA]
Irregularidades cardíacas.
- 40 – 100 [mA]



Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardiacas.

- ~1 [A]
Fibrilación y paro cardiaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.
- 1 – 5 [A]
Quemaduras muy graves. Paro cardiaco con elevada probabilidad de muerte.

El límite tolerable de corriente en el cuerpo debe ser menor que el valor que puede causar fibrilación ventricular del corazón, entre 40 – 100 [mA].

Las ecuaciones para determinar la corriente tolerable para personas con un peso corporal de 50 kg y 70 kg son las siguientes:

Peso corporal de 50 kg:

$$I = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (22)$$

Peso corporal de 70 kg:

$$I = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (23)$$

Donde:

I : Corriente de fibrilación.

t_s : Tiempo que circula la corriente.

Estos criterios son la base para evaluar los potenciales de contacto y de paso.

Potencial de paso: Es la diferencia de potencial presente en la superficie del terreno que puede experimentar una persona al situar sus pies separados aproximadamente 1 metro, sin establecer contacto con ninguna otra estructura o elemento conectado a tierra.

Potencial de contacto: Es la diferencia de potencial existente entre una estructura metálica puesta a tierra y el punto de la superficie del terreno sobre el cual se encuentra una persona al tocar dicha estructura con las manos.

Ambos potenciales son parámetros críticos para evaluar el diseño y la seguridad de sistemas de puesta a tierra. El potencial de contacto y de paso tolerables se



determinan mediante las ecuaciones para determinar la corriente tolerable, dando como resultado las siguientes ecuaciones.

Para un peso corporal de 50 kg:

$$E_{contacto50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (24)$$

Para un peso corporal de 70 kg:

$$E_{contacto70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (25)$$

Para un peso corporal de 50 kg:

$$E_{paso50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (26)$$

Para un peso corporal de 70 kg:

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (27)$$

Donde:

C_s : Factor de reducción de la capa superficial

ρ_s : Resistividad de la capa superficial en $\Omega\cdot m$

t_s : Tiempo que circula la corriente

Puesto que no se utiliza una capa superficial protectora $C_s = 1$

Sustituyendo los parámetros en las ecuaciones (24), (25), (26) y (27) los potenciales tolerables del diseño de la malla de puesta tierra para un peso corporal de 50 kg y 70 kg son:

Potencial de contacto para un peso corporal de 50 kg:

$$E_{contacto50} = (1000 + 1.5(1) \cdot (5000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.1}} = 3118.005 [V]$$

Potencial de contacto para un peso corporal de 70 kg:

$$E_{contacto70} = (1000 + 1.5(1) \cdot (5000)) \frac{0.157}{\sqrt{0.1}} = 4220.05 [V]$$



Potencial de paso para un peso corporal de 50 kg:

$$E_{paso50} = (1000 + 6(1) \cdot (5000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.1}} = 11371.55 [V]$$

Potencial de paso para un peso corporal de 70 kg:

$$E_{paso70} = (1000 + 6(1) \cdot (5000)) \frac{0.157}{\sqrt{0.1}} = 15390.8 [V]$$

Paso 4. Diseño inicial.

El diseño inicial propuesto será una cuadrícula rectangular de 10.63 [m] × 17.39 [m] cuya longitud periférica atraviesa los registros del laboratorio, posee los siguientes parámetros.

$$L_T = (2)(17.39) + (2)(10.63) = 56.04 [m]$$

$$h = 0.5 [m]$$

$$D = 17.39 [m]$$

Donde:

L_T : Longitud total efectiva del conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo la malla y las varillas de tierra.

h : Profundidad de enterramiento de la malla.

D : Espaciamiento entre conductores paralelos.

Con las condiciones anteriores el diseño de la malla de puesta a tierra propuesta queda representado como se muestra en la siguiente figura.



Paso 5. Resistencia a tierra.

El diseño de un sistema de puesta a tierra de baja resistencia es de gran importancia para mantener las magnitudes de los potenciales de paso y de contacto en valores seguros.

Una resistencia por debajo de 1 ohm suele requerirse en instalaciones de alta tensión como grandes subestaciones eléctricas, plantas generadoras o líneas de transmisión. Un rango entre 1 ohm a 5 ohm suele considerarse en grandes instalaciones industriales y subestaciones eléctricas.

La NOM-001-SEDE-2012 en su artículo 921-18. Resistencia a tierra de electrodos. Describe los requisitos generales para la puesta a tierra, donde:

El sistema de tierra debe consistir de uno o más electrodos conectados entre sí. Debe tener una resistencia a tierra baja para minimizar los riesgos al personal en función de la tensión de paso y de contacto (se considera aceptable un valor de 10 ohms; en terrenos con alta resistividad este valor puede llegar a ser hasta de 25 ohms). (Secretaría de Energía, 2012, p.702)

El artículo establece un valor máximo de 25 ohms para garantizar la seguridad en instalaciones en terrenos con alta resistividad, esta condición coincide con las características del terreno donde se realiza el diseño del sistema de puesta a tierra. Sin embargo, el valor de 25 ohms no debe interpretarse como un valor de resistencia satisfactorio, pues este valor no garantiza el mejor desempeño en instalaciones con equipos electrónicos sensibles. Debido a que en el laboratorio se contempla el uso de estos equipos el valor de la resistencia a tierra del sistema debe ser inferior a 25 ohms para garantizar su protección.

Por lo tanto, el diseño deberá tener un valor de resistencia a tierra inferior al límite de 25 ohms establecido por la norma.

El estándar IEEE Std. 80-2000 proporciona la ecuación para evaluar la resistencia a tierra del diseño de una malla. Considerando la profundidad de los conductores de la malla se usará la ecuación de Sverak.

$$R_g = \sigma \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (28)$$

$$L_T = (2)(17.39) + (2)(10.63) = 56.04 [m]$$



$$h = 0.5 [m]$$

$$A = 184.85 [m^2]$$

Donde:

L_T : Longitud total efectiva del conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo la malla y las varillas de tierra.

h : Profundidad de enterramiento de la malla.

A : Área de la malla

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (28) la resistencia a tierra es:

$$R_g = (5000) \left[\frac{1}{56.04} + \frac{1}{\sqrt{20(184.85)}} \right] \left(1 + \frac{1}{1 + (0.5) \sqrt{\frac{20}{184.85}}} \right) = 242.07 [\Omega]$$

Paso 6. Corriente a tierra.

Se define la magnitud de la corriente de falla a tierra y la duración de la falla.

$$I_G = 11.748 [kA] \quad t_f = 0.1 [s]$$

Paso 7. Comparar el potencial de contacto con la elevación de potencial de la red (EPR)

La elevación de potencial de la red (EPR) es el potencial eléctrico máximo que experimenta el sistema de puesta a tierra de una instalación respecto a un punto remoto de referencia cuando circula la corriente de falla a tierra máxima. Este potencial es igual a la corriente a tierra máxima durante la falla multiplicada por la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra.

Si la magnitud de EPR es menor que la magnitud de potencial de contacto se considera que el diseño del sistema de puesta a tierra es adecuado, por lo cual no se requerirá realizar más análisis para evaluar el diseño.

Se compara el potencial de contacto con la elevación de potencial de la red (EPR), tomando como referencia el potencial de contacto para un peso corporal de 50 kg puesto que es el caso más desfavorable.

$$I_G R_G < E_{contacto}$$

$$(11.748 [kA])(242.07[\Omega]) < 3118.005 [V]$$

$$2843838.36 [V] > 3118.005 [V]$$



Al realizar la comparación se observa que no se cumple la condición, por lo tanto, son necesarias más evaluaciones de diseño. Continuando con el diagrama de flujo se calculan las tensiones de contacto y de paso máximas.

Paso 8. Cálculo de tensión de contacto máxima y tensión de paso máxima.

La tensión de contacto máxima se determina mediante la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (29)$$

$$L_M = L_C + L_R$$

Donde:

E_m : Tensión de contacto máximo en la malla.

ρ : Resistividad del suelo.

K_m : Factor de espaciado para el voltaje de malla.

K_i : Factor de corrección para la geometría de la malla.

I_G : Corriente a tierra máxima.

L_M : Longitud efectiva de la malla.

L_C : Longitud total de los conductores de la malla.

L_R : Longitud total de los electrodos de puesta a tierra.

El factor de espaciado “Km” se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \left(\frac{K_{ii}}{K_h} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (30)$$

Donde:

D : Espaciamiento entre conductores paralelos.

h : Profundidad de enterramiento de la malla.

d : Diámetro del conductor de la red en [m].

K_{ii} : Factor correctivo de los efectos de los conductores internos en la malla.

K_h : Factor correctivo de los efectos de la profundidad de la malla.

n : Factor geométrico.



$$Km = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(17.39)^2}{16 (0.5)(0.0134)} + \frac{(17.39 + 2(0.5))^2}{8 (17.39)(0.0134)} - \frac{0.5}{4(0.0134)} \right) + \left(\frac{0.25}{1.22} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$Km = 1.26$$

Debido a que el diseño de la malla de puesta a tierra no contiene ningún electrodo en las esquinas o en el perímetro de la malla el factor correctivo “Kii” se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (31)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot 2.02)^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

El factor geométrico “n” se aplica diseños de malla irregulares, cuadrículas cuadradas o cuadrículas rectangulares.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 2 \cdot 1.01 \cdot 1 \cdot 1 = 2.02$$

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_P} \quad (32)$$

Donde:

L_P : Longitud periférica de la malla.

$$L_P = (2)(17.39) + (2)(10.63) = 56.04 [m]$$

$$n_a = \frac{2 (56.04)}{(56.04)} = 2$$

$n_b = 1$ para cuadrículas cuadradas.

$n_c = 1$ para cuadrículas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$ para cuadrículas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

Puesto que la cuadrícula no es cuadrada “nb” se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (33)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{56.04}{4 \cdot \sqrt{184.85}}} = 1.01$$



El factor correctivo “Kh” se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (34)$$

Donde:

$h_o = 1\text{m}$ (profundidad de referencia de la cuadrícula)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.22$$

El factor de corrección para la geometría de la malla “Ki” se determina mediante la siguiente ecuación.

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (35)$$

$$K_i = 0.644 + (0.148)(2.02) = 0.94$$

Longitud efectiva de la malla:

$$L_M = L_C + L_R = 56.04 \text{ [m]}$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (29) la tensión de contacto máximo en la malla es:

$$E_m = \frac{(5000) \cdot (1.26) \cdot (0.94) \cdot (11.748 \text{ [kA]})}{56.04} = 1241464.24 \text{ [V]}$$

La tensión de paso máxima se determina mediante la siguiente ecuación

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (36)$$

$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R$$

Donde:

E_s : Tensión de paso máximo en la malla.

ρ : Resistividad del suelo.

K_s : Factor de espaciado para el voltaje de paso.

K_i : Factor de corrección para la geometría de la malla.

I_G : Corriente a tierra máxima.



L_S : Longitud efectiva de la malla.

L_C : Longitud total de los conductores de la malla.

L_R : Longitud total de los electrodos de puesta a tierra.

El factor de espaciado “Ks” se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (37)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{17.39 + 0.5} + \frac{1}{17.39} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.33$$

Longitud efectiva de la malla:

$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R = 0.75 \cdot (56.04) + 0.85 \cdot (0) = 42.03$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación (36) la tensión de paso máximo en la malla es:

$$E_s = \frac{(5000) \cdot (0.33) \cdot (0.94) \cdot (11.748 [kA])}{42.03} = 433527.194 [V]$$

Paso 9. Comparación de la tensión máxima de contacto de la malla con la tensión normal de contacto de la malla

$$1241464.24 [V] > 3118.005 [V] \Leftrightarrow E_m > E_{contacto50}$$

Paso 10. Comparación de la tensión máxima de paso de la malla con la tensión normal de paso de la malla

$$433527.194 [V] > 11371.55 [V] \Leftrightarrow E_s > E_{paso50}$$

La tensión máxima de contacto y de paso de la malla es mayor que la tensión normal de contacto y de paso, por lo cual no se cumple la condición.

Se realiza una nueva propuesta para el diseño de la malla de puesta a tierra y se realizan los cálculos a partir del paso 5 para evaluar el diseño de la malla de acuerdo con el diagrama de flujo establecido por el IEEE Std. 80-2000.

Paso 11. Modificación del diseño.

El nuevo diseño de la malla de puesta a tierra queda representado como se muestra en la siguiente figura.

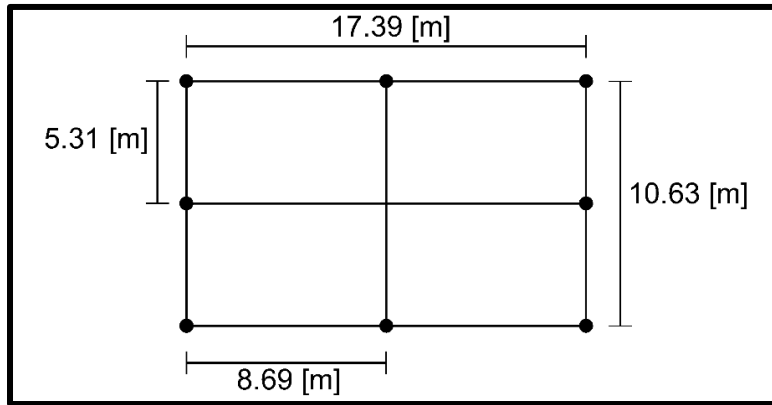


Figura 9.11 Segundo diseño de la malla de puesta a tierra

Longitud de electrodos: 3 [m]

$$L_T = (3)(17.39) + (3)(10.63) + (8)(3) = 108.06 \text{ [m]}$$

$$h = 0.5 \text{ [m]}$$

Resistencia a tierra:

$$R_g = \sigma \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} 1 \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = (5000) \left[\frac{1}{108.06} + \frac{1}{\sqrt{20(184.85)}} 1 \left(1 + \frac{1}{1 + (0.5)\sqrt{\frac{20}{184.85}}} \right) \right] = 199.12 \text{ [\Omega]}$$

Una vez obtenida resistencia a tierra se compara el potencial de contacto con la elevación de potencial de la red (EPR). La comparación se realizará tomando como referencia el potencial de contacto para un peso corporal de 50 kg puesto que es el caso más desfavorable.

$$I_G R_G < E_{\text{contacto}}$$

$$(11.748 \text{ [kA]})(199.12[\Omega]) < 3118.005 \text{ [V]}$$

$$2339261.76[\text{V}] > 3118.005 \text{ [V]}$$

Al realizar la comparación se observa que no se cumple la condición, por lo tanto, se calculan las tensiones de contacto y de paso máximas.

Tensión de contacto máximo en la malla:



$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} = \frac{(5000) \cdot (0.97) \cdot (1.09) \cdot (11.748 [kA])}{108.06} = 574734.425 [V]$$

Factor de espaciado para el voltaje de malla:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \left(\frac{K_{ii}}{Kh} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$
$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(8.69)^2}{16(0.5)(0.0134)} + \frac{(8.69+2(0.5))^2}{8(8.69)(0.0134)} - \frac{0.5}{4(0.0134)} \right) + \left(\frac{1}{1.22} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2(3.03)-1)} \right) \right]$$
$$K_m = 0.97$$

Debido a que hay electrodos colocados a lo largo del perímetro de la malla $K_{ii} = 1$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 3 \cdot 1.01 \cdot 1 \cdot 1 = 3.03$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2(84.06)}{(56.04)} = 3$$

$n_b = 1$ para cuadrículas cuadradas.

$n_c = 1$ para cuadrículas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$ para cuadrículas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

$$L_p = (2)(17.39) + (2)(10.63) = 56.04 [m]$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{56.04}{4 \cdot \sqrt{184.85}}} = 1.01$$

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{h}{ho}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.22$$

Factor de corrección para la geometría de la malla:

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n = 0.644 + (0.148)(3.03) = 1.09$$

Longitud efectiva de la malla:

$$L_M = L_C + L_R = 84.06 [m] + 24 [m] = 108.06 [m]$$

Tensión de paso máximo en la malla:



$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} = \frac{(5000) \cdot (0.37) \cdot (1.09) \cdot (11.748 [kA])}{83.44} = 283914.69 [V]$$

Factor de espaciado para el voltaje de paso:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$
$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{8.69 + 0.5} + \frac{1}{8.69} (1 - 0.5^{3.03-2}) \right] = 0.37$$

Longitud efectiva de la malla:

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R = 0.75 \cdot (84.06) + 0.85 \cdot (24) = 83.44$$

Comparación de la tensión máxima de contacto de la malla con la tensión normal de contacto de la malla:

$$574734.425 [V] > 3118.005 [V] [V] \Leftrightarrow E_m > E_{\text{contacto}50}$$

Comparación de la tensión máxima de paso de la malla con la tensión normal de paso de la malla:

$$283914.69[V] > 11371.55 [V] \Leftrightarrow E_s > E_{\text{paso}50}$$

La tensión máxima de contacto y de paso de la malla es mayor que la tensión normal de contacto y de paso, por lo cual no se cumple la condición. Se realiza una nueva propuesta para el diseño de la malla de puesta a tierra.

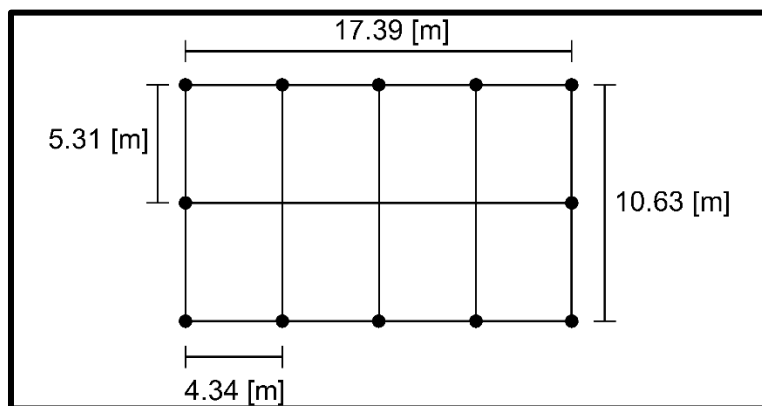


Figura 9.12 Tercer diseño de la malla de puesta a tierra

Longitud de electrodos: 3 [m]

$$L_T = (3)(17.39) + (5)(10.63) + (12)(3) = 141.32 [m]$$



$$h = 0.5 [m]$$

Resistencia a tierra:

$$R_g = \sigma \left[\frac{1}{LT} + \frac{1}{\sqrt{20A}} 1 \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

$$R_g = (5000) \left[\frac{1}{141.32} + \frac{1}{\sqrt{20(184.85)}} 1 \left(1 + \frac{1}{1 + (0.5)\sqrt{\frac{20}{184.85}}} \right) \right] = 188.23 [\Omega]$$

Una vez obtenida resistencia a tierra se compara el potencial de contacto con la elevación de potencial de la red (EPR). La comparación se realizará tomando como referencia el potencial de contacto para un peso corporal de 50 kg puesto que es el caso más desfavorable.

$$I_G R_G < E_{\text{contacto}}$$

$$(11.748 [kA])(188.23[\Omega]) < 3118.005 [V]$$

$$2211326.0 [V] > 3118.005 [V]$$

Al realizar la comparación se observa que no se cumple la condición, por lo tanto, se calculan las tensiones de contacto y de paso máximas.

Tensión de contacto máximo en la malla:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} = \frac{(5000) \cdot (0.74) \cdot (1.2) \cdot (11.748 [kA])}{141.32} = 369099.349 [V]$$

Factor de espaciado para el voltaje de malla:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \left(\frac{K_{ii}}{Kh} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(4.34)^2}{16(0.5)(0.0134)} + \frac{(4.34+2(0.5))^2}{8(4.34)(0.0134)} - \frac{0.5}{4(0.0134)} \right) + \left(\frac{1}{1.22} \right) \ln \left(\frac{8}{\pi(2(3.78)-1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.74$$

Debido a que hay electrodos colocados a lo largo del perímetro de la malla $K_{ii} = 1$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 3.75 \cdot 1.01 \cdot 1 \cdot 1 = 3.78$$



$$n_a = \frac{2 L_c}{L_p} = \frac{2 (105.32)}{(56.04)} = 3.75$$

$n_b = 1$ para cuadrículas cuadradas.

$n_c = 1$ para cuadrículas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$ para cuadrículas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

$$L_p = (2)(17.39) + (2)(10.63) = 56.04 [m]$$

Puesto que la cuadrícula no es cuadrada n_b se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{56.04}{4 \cdot \sqrt{184.85}}} = 1.01$$

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{h}{ho}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.22$$

Factor de corrección para la geometría de la malla:

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n = 0.644 + (0.148)(3.78) = 1.2$$

Longitud efectiva de la malla:

$$L_M = L_C + L_R = 105.32 [m] + 36 [m] = 141.32 [m]$$

Tensión de paso máximo en la malla:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} = \frac{(5000) \cdot (0.43) \cdot (1.2) \cdot (11.748 [kA])}{109.59} = 276574.87 [V]$$

Factor de espaciado para el voltaje de paso:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$
$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{4.34 + 0.5} + \frac{1}{4.34} (1 - 0.5^{3.78-2}) \right] = 0.43$$

Longitud efectiva de la malla:



$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R = 0.75 \cdot (105.32) + 0.85 \cdot (36) = 109.59$$

Comparación de la tensión máxima de contacto de la malla con la tensión normal de contacto de la malla:

$$369099.349 [V] > 3118.005 [V] \Leftrightarrow E_m > E_{contacto50}$$

Comparación de la tensión máxima de paso de la malla con la tensión normal de paso de la malla:

$$276574.87 [V] > 11371.55 [V] \Leftrightarrow E_s > E_{paso50}$$

La tensión máxima de contacto y de paso de la malla es mayor que la tensión normal de contacto y de paso, por lo cual no se cumple la condición.

9.3 Análisis de resultados.

Tras realizar los cálculos conforme al diagrama de flujo se establecen las siguientes observaciones.

- Aumentar la cantidad de material no favorece la reducción de la resistencia a tierra de la malla, esto implica un aumento económico sin obtener un beneficio real.
- La tendencia de tener un valor de resistencia a tierra elevado se debe a que la resistividad del concreto es muy alta, esta tendencia persiste aun cuando los electrodos tienen contacto con el terreno natural, ya que es rocoso y presenta igualmente una resistividad elevada, en consecuencia, no se satisface la condición entre la tensión de contacto y la elevación de potencial de la red.
- Retomando la ecuación para comparar la tensión de contacto y la elevación de potencial de la red se puede obtener el valor deseado de la resistencia a tierra para satisfacer la condición.

$$I_G R_G < E_{contacto}$$

$$R_G = \frac{3118.005}{11.784 \text{ kA}}$$

$$R_G = 0.264 \Omega$$

- Una vez que se conoce el valor necesario de la resistencia a tierra para garantizar un buen diseño es necesario aplicar un método para lograr el valor de



CAPÍTULO 10. PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DEL TABLERO PRINCIPAL DEL LABORATORIO.

El tablero principal del laboratorio cuenta con infraestructura antigua, el uso de bornes y conductores de interconexión son el elemento principal para alimentar y derivar los distintos circuitos, esta forma de distribución en baja tensión era común en instalaciones antiguas, sin embargo, frente a los tableros de distribución en baja tensión actuales presentan desventajas operativas y de seguridad.

1. Seguridad eléctrica

- Los bornes de interconexión aumentan el riesgo de electrocución por contactos accidentales al requerir de maniobras manuales para conectar o desconectar cargas.
- Son propensos a falsos contactos produciendo puntos calientes que pueden dañar los conductores de interconexión.
- Con el paso del tiempo los bornes han sufrido deterioro progresivo en su aislamiento provocando que sus propiedades dieléctricas se reduzcan.
- No dispone de estándares o normas de protección actuales como los tableros de distribución modernos que cumplen con clasificaciones NEMA 1 y UL 891.

Norma UL 891: Es una norma elaborada por UL Solutions, empresa global dedicada a la certificación de seguridad, establece los requisitos aplicables a los tableros de distribución de baja tensión con una tensión nominal de hasta 600 V, diseñados para operar conforme al Código Eléctrico Nacional (NEC), al Código Eléctrico Canadiense o a la norma ANSI/NFPA 70.

NEMA 1: La clasificación NEMA 1 corresponde a gabinetes que ofrecen protección mediante un frente muerto, evitando el contacto con partes energizadas. Estos gabinetes están diseñados para alojar en su interior los interruptores derivados y aumentar la seguridad del sistema gracias al aislamiento de sus barras conductoras.

2. Limitaciones operativas o de mantenimiento

- Dificultad para integrar o sustituir elementos de protección.
- Al utilizar conductores de interconexión estos suelen entrelazarse provocando que sea difícil distinguir un circuito específico.

- Los tableros con bornes de interconexión requieren mayor espacio para alimentar una misma cantidad de circuitos en comparación con los tableros de distribución actuales.
- Por seguridad de la persona que manipule los conductores de interconexión, para alimentar un segundo circuito derivado implica desconectar la alimentación de los circuitos que ya estén operando y realizar todas las conexiones desde cero.

Con el objetivo de mejorar estas limitaciones se propone la implementación de un nuevo tablero de distribución de baja tensión. El tablero incluirá:

- Diseño expandible para la incorporación de nuevas cargas y equipos a futuro.
- Seccionamiento de los circuitos derivados para la integración o sustitución de cargas sin afectar la operación total del laboratorio.
- Implementación de un equipo de monitoreo que permita la medición local y remota para evaluar la calidad de la energía, crear registros y controlar consumos energéticos en tiempo real en el laboratorio.

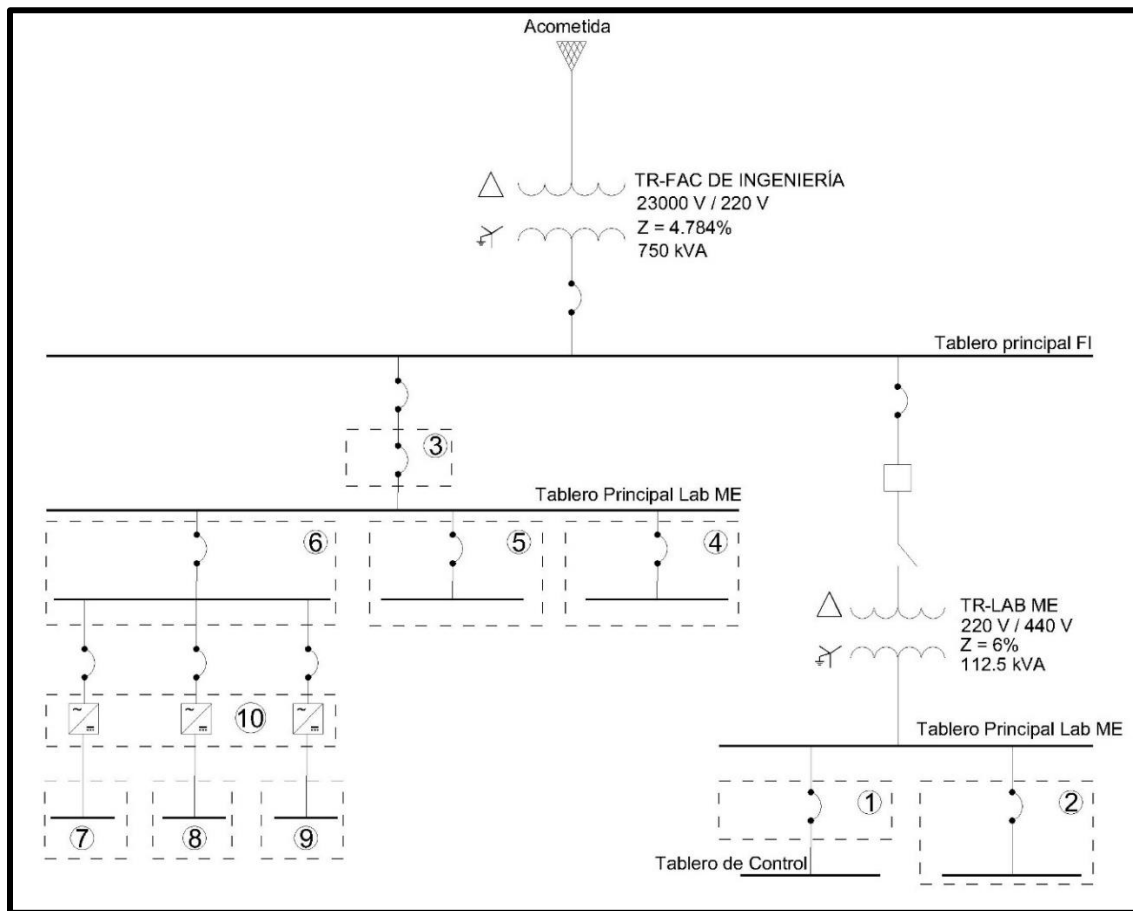


Figura 10.1 Diagrama unifilar propuesta de actualización del tablero principal del laboratorio

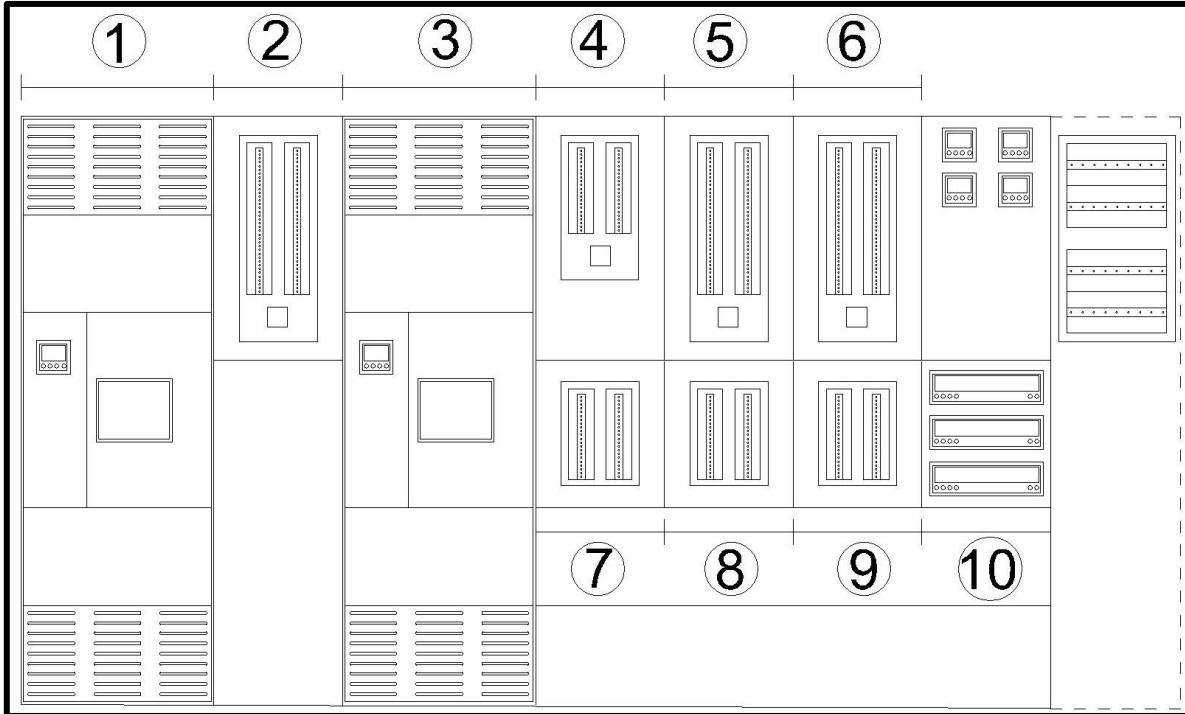


Figura 10.2 Esquema de la propuesta de actualización del tablero principal del laboratorio.

- 1. Tablero principal de 440 V.
- 2. Tablero de distribución para cargas de 440 V.
- 3. Tablero principal de 220 V.
- 4. Tablero de distribución para iluminación.
- 5. Tablero de distribución para espacios interiores.
- 6. Tablero de distribución para motores
- 7. Tablero 1 de distribución en corriente directa.
- 8. Tablero 2 de distribución en corriente directa.
- 9. Tablero 3 de distribución en corriente directa.
- 10. Rectificadores electrónicos variables.
- - - - Tablero de distribución guardamotores.

10.1 Propuesta para el sistema de 440 V.

1. Tablero principal de 440 V.

El tablero incorporará el interruptor general del módulo Marino que protege el Tablero de Control del módulo Marino. Incluirá un equipo de medición y monitoreo para proporcionar información en tiempo real sobre el desempeño eléctrico del sistema “Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM”.

Características del tablero:



- Tipo de gabinete: Tablero autosoportado tipo principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 3 hilos 60 Hz.
- Tensión de operación: 440 V.
- Barras conductoras principales: 150 A.
- Capacidad interruptiva: 6 kA.
- Valor nominal del interruptor: 125 A.
- Con equipo de medición y monitoreo.

2. Tablero de distribución para cargas de 440 V.

El gabinete tendrá la función de distribuir los circuitos derivados destinados a la alimentación de cargas que operan a 440 V.

Características del tablero:

- Tipo de tablero: Tablero de alumbrado y distribución con interruptor principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 4 hilos, 60 Hz.
- Tensión nominal: 440 VCA.
- Barras conductoras principales: Sujeto a dimensionamiento de cargas a instalar.
- Capacidad de cortocircuito: Sujeto a dimensionamiento de cargas a instalar.
- Valor nominal del interruptor: Sujeto a dimensionamiento de cargas a instalar.
- Número de circuitos: Sujeto a cargas a instalar.

10.2 Propuesta para el sistema de 220 V.

3. Tablero principal de 220 V.

El tablero incorporará el Interruptor Principal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas encargado de conectar y desconectar la alimentación eléctrica del laboratorio. Incluirá un equipo de medición y monitoreo del sistema para proporcionar información en tiempo real sobre el desempeño eléctrico del laboratorio.

Características del tablero:

- Tipo de tablero: Tablero autosoportado tipo principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 3 hilos 60 Hz.
- Tensión de operación: 220 VCA.
- Barras conductoras principales: 400 A.
- Capacidad interruptiva: 16 kA.
- Valor nominal del interruptor: 300 A.
- Con equipo de medición y monitoreo.



Características del equipo de medición y monitoreo:

- Medición de energía
 - kWh, kVARh y kVAh
- Medición de demanda
 - Demanda de kW, kVAR y kVA
- Mediciones instantáneas
 - Tensión trifásica por fase y media
 - Corriente trifásica por fase y media
 - Potencia activa (kW), reactiva (kVAR) y aparente (kVA) por fase y total
 - Factor de potencia por fase y total
 - Frecuencia del sistema
 - Inversión de fases
- Medición de armónicos
 - Magnitud y ángulo de fase de armónicos
 - Distorsión armónica total
 - Distorsión de demanda total
 - Factor K
 - Factor de cresta
- Medición de calidad de energía
 - Bajadas y subidas de tensión y corriente del sistema de alimentación
 - Variación rápida de tensión
 - Armónicos
 - Eventos de perturbaciones
 - Detección de dirección de perturbaciones
 - Visualización de formas de onda
 - Captura de forma de onda
 - Adquisición de umbrales
- Registro de valores máximos y mínimos
 - Tensión y corriente
 - kW, kVAR y kVA
 - Factor de potencia
 - Frecuencia



- Desequilibrio de tensión
- Registro de datos
 - Datos históricos
 - Pérdidas
 - Armónicos
 - Energía y demanda
 - Valores nominales diarios
 - Variación rápida de tensión
 - Bajadas y subidas
 - Eventos
 - Forma de ondas
- Implementación de tendencias y pronósticos
 - Capacidad de elaboración de tendencias y pronósticos para predecir el siguiente conjunto de datos. Los datos de tendencias y pronósticos constituyen una útil herramienta que ayuda a analizar cambios operados en la carga y la calidad de energía y en valores de pronóstico como la demanda.
- Alarmas y alertas
 - Notificar al usuario que se ha detectado un evento que no forma parte de las condiciones de funcionamiento normales.
- Pasarela de comunicación
 - Capacidad para permitir el monitoreo, control y análisis remoto del sistema eléctrico.

Desde el Interruptor Principal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas se derivarán tres tableros de distribución:

- Tablero de distribución para iluminación.
- Tablero de distribución para espacios interiores.
- Tablero de distribución para motores.

4. Tablero de distribución para iluminación.

Encargado de suministrar energía a las luminarias del laboratorio.



Características del tablero:

- Tipo de tablero: Tablero de alumbrado y distribución con interruptor principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 4 hilos 60 Hz.
- Tensión nominal: 220 VCA.
- Barras conductoras principales: 40 A.
- Capacidad interruptiva: 10 kA.
- Valor nominal del interruptor: 30 A
- Número de circuitos: 18

5. Tablero de distribución para espacios interiores.

Encargado de distribuir la alimentación de contactos y áreas de trabajo dentro del laboratorio.

Características del tablero:

- Tipo de tablero: Tablero de alumbrado y distribución con interruptor principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 4 hilos 60 Hz.
- Tensión de operación: 220 VCA.
- Barras conductoras principales: 200 A.
- Capacidad interruptiva: 10 kA.
- Valor nominal del interruptor: 100 A.
- Número de circuitos: 42

6. Tablero de distribución para motores.

Encargado de distribuir los circuitos destinados a la alimentación de motores del laboratorio.

Características del tablero:

- Tipo de gabinete: Tablero de alumbrado y distribución con interruptor principal.
- Tipo de sistema: 3 fases, 4 hilos 60 Hz.
- Tensión de operación: 220 VCA.
- Barras conductoras principales: 300 A.
- Capacidad interruptiva: 16 kA.
- Valor nominal del interruptor: 200 A.
- Número de circuitos: 42.



Desde el tablero de distribución para motores se derivarán tres tableros de distribución para alimentar cargas en corriente directa:

- Tablero 1 de distribución en corriente directa.
- Tablero 2 de distribución en corriente directa.
- Tablero 3 de distribución en corriente directa.

7. Tablero 1 de distribución en corriente directa

Encargado de distribuir los circuitos destinados a la alimentación de cargas en corriente directa.

Características del tablero:

- Tipo de gabinete: Tablero de alumbrado y distribución.
- Tipo de sistema: 3 fases, 3 hilos.
- Tensión de operación: 120 VCD.
- Barras conductoras principales: 100 A.
- Capacidad interruptiva: 5 kA.
- Número de circuitos: 18

El tablero 2 y 3 de distribución en corriente directa tendrán las mismas características que el tablero 1.

Tablero de distribución guardamotores.

Se considera la incorporación de un gabinete con Riel Din destinado a alojar guardamotores con el propósito de anticipar y facilitar su posible implementación futura. Esta previsión permite disponer del espacio físico y la infraestructura necesaria para integrar dispositivos de protección adicionales conforme a la ampliación del laboratorio e incorporación de nuevas cargas asociadas a motores.

Consideraciones

- Se propone que los tableros de distribución para motores, espacios interiores, iluminación y cargas de 440 V sean de tipo interruptor principal de manera que dispongan de un medio de desconexión general que permita aislarlos del sistema eléctrico cuando sea necesario y realizar pruebas o intervenciones técnicas, así como la atención segura de emergencias sin interrumpir el suministro en el resto del sistema eléctrico del laboratorio.



En caso de presentarse una falla eléctrica y el dispositivo de protección de un circuito derivado no opere el interruptor principal del tablero de distribución en cuestión actuará como protección de respaldo aislando la falla, evitando que ésta afecte el resto del sistema eléctrico del laboratorio.

- Se propone seleccionar los interruptores principales de los tableros con una capacidad nominal superior a la dimensionada siempre que estos cuenten con ajustes térmicos y magnéticos regulables que permitan configurarlos a los valores nominales determinados en el dimensionamiento actual.

Esta estrategia asegura que los interruptores funcionen adecuadamente y, simultáneamente, ofrezcan flexibilidad para futuras ampliaciones o incorporación de nuevas cargas en el laboratorio de modo que los parámetros de disparo puedan ajustarse a las nuevas demandas sin requerir el reemplazo del interruptor.

- Finalmente se contempla la instalación de un gabinete dedicado al monitoreo el cual alojará equipos de medición conectados a cada gabinete de distribución permitiendo registrar y analizar el comportamiento eléctrico individual de cada subsistema.

10.3 Incorporación de variadores de frecuencia.

Los motores demandan una cantidad determinada de energía eléctrica para generar el par y la velocidad necesarios en su funcionamiento. Idealmente la velocidad de operación de un motor debería coincidir con la que exige el proceso en cuestión y usar solo la energía necesaria. Para lograr esta condición se propone la incorporación de variadores de frecuencia para alimentar y controlar los motores de corriente alterna del laboratorio.

Un variador de frecuencia es un regulador que se ubica entre la alimentación y un motor. La energía de la red pasa por el variador regulando la energía en función de la demanda real de la aplicación ajustando la frecuencia y la tensión.

Se propone que cada variador de frecuencia esté equipado con una botonera o selector que incorpore funciones de marcha, parada, contramarcha y parada de emergencia además de un potenciómetro, con la finalidad de tener una operación segura y un mayor control del proceso cambiando el sentido y ajuste de velocidad desde el potenciómetro externo.



Beneficios que aporta:

- Control de velocidad: Permite ajustar la velocidad del motor de acuerdo con las condiciones operativas requeridas.
- Arranque suave: Evita los picos de corriente y los esfuerzos mecánicos durante el arranque del motor.
- Optimización energética: Reduce el consumo eléctrico al adaptar la velocidad del motor a la demanda real del proceso, en lugar de operar siempre a su potencia nominal.

Características del variador de frecuencia para motor de 5 HP módulo MM:

- Entrada: 220 V CA, 60 Hz, 3F
- Salida: 220 V CA, 11.8 A, 5 HP / 3.7 kW

Características del variador de frecuencia para motores de 3 HP módulo DIN II Y MGVI:

- Entrada: 220 V CA, 60 Hz, 3F
- Salida: 220 V CA, 9.4 A, 3 HP / 2.2 kW

Características del variador de frecuencia para motor de 40 HP módulo DIN I:

- Entrada: 220 V CA, 60 Hz, 3F
- Salida: 220 V CA, 102 A, 40 HP / 29.8 kW

Características del variador de frecuencia para máquinas síncronas de 4 kVA módulo DIN II, MGI y MGII:

- Entrada: 220 V CA, 60 Hz, 3F
- Salida: 220 V CA, 20 A, 6 HP / 4.4 kW

10.4 Incorporación de rectificadores electrónicos variables.

Actualmente, el laboratorio cuenta con tres excitatrices mecánicas para la alimentación de cargas en corriente directa, se propone sustituir las excitatrices por rectificadores electrónicos variables, esto contribuye a la modernización del laboratorio con tecnologías actuales reduciendo la dependencia de los sistemas mecánicos.

Se propone que el Tablero 1 de distribución en corriente directa, el Tablero 2 de distribución en corriente directa y el Tablero 3 de distribución en corriente directa sean



alimentados de manera independiente mediante rectificadores electrónicos variables, lo cual implica la instalación de un total de tres equipos de este tipo.

Los motores de corriente directa de 7.5 HP representan la carga de mayor consumo en el laboratorio, por tanto, sus características eléctricas se emplearán como referencia para las especificaciones de los rectificadores.

Características rectificador electrónico:

- Entrada: 220 V CA, 60 Hz, 3F
- Salida: 120 V CD, 60 A, 7.5 HP / 5.5 kW



CONCLUSIONES.

El análisis del sistema eléctrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería permitió identificar deficiencias derivadas de la antigüedad de la infraestructura. La degradación del sistema eléctrico, la obsolescencia del transformador asociado a la antigua alimentación de 6.6 kV y la inactividad prolongada de los equipos industriales propician un entorno operativo limitado e ineficiente que no cumple con las condiciones de seguridad para su correcta operación.

La propuesta del sistema eléctrico diseñada conforme a las Normas Oficiales Mexicanas aplicables, demostró mediante estudios teóricos y simulaciones que cumple con los criterios de seguridad y eficiencia requeridos para las actividades del laboratorio. Asimismo, constituye una solución técnica integral que atenderá tanto las necesidades operativas actuales como las futuras del laboratorio. Este enfoque asegura que la infraestructura sea segura y capaz de adaptarse a posibles expansiones o nuevas implementaciones tecnológicas.

La estimación de un presupuesto aproximado no fue considerado dentro del alcance del proyecto debido a que los costos de materiales, equipos y mano de obra pueden variar en función de factores externos como proveedores, marcas, especificaciones comerciales, condiciones del mercado y políticas de adquisición de la institución que requiere información administrativa y de gestión que no forma parte de los objetivos académicos del presente trabajo. No obstante, el proyecto proporciona una base técnica que permite a la institución realizar, en caso de considerarlo pertinente, una evaluación económica posterior.

La actualización del sistema eléctrico del laboratorio implica un costo inicial asociado a la adecuación de los elementos propuestos para el sistema eléctrico. No obstante, esta inversión se ve compensada por los beneficios que aporta a la comunidad universitaria en términos de seguridad, continuidad del servicio, reducción de riesgos, ahorro en mantenimiento y mejora en la calidad del servicio eléctrico generando un impacto positivo y sostenible para la comunidad universitaria que hace uso del laboratorio.

La implementación de las mejoras y actualización del laboratorio tendrá una contribución en la formación académica de los estudiantes favoreciendo el aprendizaje práctico reforzando la relación entre los conocimientos teóricos y su aplicación real. Asimismo, constituirá la base para el desarrollo de proyectos de investigación para titulación como tesis, tesina, proyectos en apoyo a la docencia y trabajos académicos vinculados a las máquinas eléctricas



La sociedad en su conjunto se verá beneficiada, ya que la implementación de un nuevo laboratorio permitirá mejorar la calidad de los servicios, la investigación y/o la formación técnica, generando profesionales mejor capacitados y resultados más confiables. Además, una infraestructura moderna contribuye a la innovación y al desarrollo tecnológico, lo que se traduce en un impacto positivo a mediano y largo plazo para la comunidad.



REFERENCIAS.

- Becerril L., D. (2005). *INSTALACIONES ELÉCTRICAS PRÁCTICAS*.
- Lorenzo Bautista, R. (1992). *ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO en sistemas eléctricos industriales*.
- J. Champan, S. (2000). *Máquinas eléctricas*. Mc Graw Hill.
- Fraile Mora, J. (2003). *Máquinas eléctricas*. Mc Graw Hill.
- Harper, E. (2015). *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. Limusa.
- Oropeza Ángeles, J. (2007). *Instalaciones eléctricas comerciales e industriales*. Schneider Electric México.
- Secretaría de Energía. (2011). *NOM-029-STPS-2011, MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES ELECTRICAS EN LOS CENTROS DE TRABAJO-CONDICIONES DE SEGURIDAD*. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5227363&fecha=29/12/2011#gsc.tab=0
- Secretaría de Energía. (2012). *NOM-001-SEDE-2012, INSTALACIONES ELECTRICAS (UTILIZACION)*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4951/SENER/SENER.html>
- Secretaría de Energía. (2015). *NOM-022-STPSE-2015, ELECTRICIDAD ESTÁTICA EN LOS CENTROS DE TRABAJO-CONDICIONES DE SEGURIDAD*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435581&fecha=01/04/2016#gsc.tab=0
- Asociación de Normalización y Certificación. (2016). *NMX-J-351-1-ANCE-2016: Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia tipo secos – Especificaciones*. ANCE.
- IEEE, (2000). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding Std 80-2000*.
- IEEE, (1993). *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants Std 141-1993*.
- IEEE, (2007). *Práctica recomendada de IEEE para Puesta a tierra de sistemas de energía industriales y comerciales Std 142-2007*.
- González Reyes, M. A., Solís Rojas, J., & Uribe Flores, V. M. (2013). *Diseño y construcción de la subestación general 1 del campus universitario* (Tesis de



licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/disenio-y-construccion-de-la-subestacion-general-1-del-campus-universitario-220163>

- Comisión Nacional del Agua. (2025). *Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvias*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Westinghouse. (s.f.). Westinghouse laboratory apparatus for educational institutions. Westinghouse.
- Instructivo de operación Grupo Motor-Generador Laboratorio Facultad de Ingeniería UNAM. (s.f.)