



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

EMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 kV PARA LA ELABORACIÓN DE PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

HENDRY MAURICIO JIMÉNEZ BAUTISTA

JUAN FERNANDO LLUMIQUINGA SIMBAÑA

DIRECTOR: Ing. Miguel Ángel Lucio Castro M.Sc.

CODIRECTOR: Dr. Hugo Neptalí Arcos Martínez

Quito, junio 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Hendry Mauricio Jiménez Bautista y Juan Fernando Llumiquinga Simbaña, bajo nuestra supervisión.

Ing. Miguel Ángel Lucio Castro, M.Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dr. Hugo Neptalí Arcos Martínez
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Hendry Mauricio Jiménez Bautista y Juan Fernando Llumiquinga Simbaña, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Simbaña B. Hendry M.", with a circled number "1" above it.

Hendry Mauricio Jiménez Bautista

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "J.F. Llumiquinga Simbaña".

Juan Fernando Llumiquinga Simbaña

DEDICATORIA

A Dios y a mi santa madre María de Guadalupe

A mis padres Ángel Jiménez y Rocío Bautista

A mis hermanos Angélica y Alexander

A mis sobrinas Sarahí, Belén y Guadalupe

A mi cuñado Wellington Villarroel

¡Todos ustedes forman parte de mi vida!

Hendry Mauricio Jiménez B.

AGRADECIMIENTO

“El señor es mi pastor nada me faltará... Salmo 23: 1-3”, oraciones como estas son las que me ha inculcado mi madre, a quien me permito agradecer en primera instancia, siempre he recibido de ella un caluroso abrazo en cada llegada y su santa bendición al despedirme de casa; te amo mami Rosi, de igual manera y con el mismo amor a mi santo padre Angelito, quien es la persona más trabajadora que he conocido, su apoyo incondicional tanto económico como moral es lo que me ha llevado hasta esta instancia, eternamente agradecido con ustedes mis amados padres.

La vida me ha regalado dos tesoros, mi hermana mayor Angélica a quien adoro con todas las fuerzas de mi corazón, mi ejemplo a seguir, tú eres la mujer perfecta gracias por tenerme paciencia y gracias por darme tanto amor, te tengo en lo más íntimo de mi corazón mi bella flor aikuileña. Y mi hermano menor Alexander, no tengo palabras para expresarle el cariño inmenso que le tengo, siempre junto a mí en las buenas y en las malas, soy muy feliz al saber que sigues mis pasos y que podemos hablar de ingeniería eléctrica muchas horas.

Desde lo más profundo de mi corazón a mi primo-hermano Juan Fernando Espín, parte de mi vida parte de mi esencia.

De manera muy especial agradezco al M.Sc. Miguel Lucio por dirigir con mucha paciencia este proyecto de titulación, Dios le colme de sabiduría y bendiciones para que siga impartiendo conocimientos y guiando a los futuros ingenieros eléctricos.

Un caluroso Dios le pague al Dr. Hugo Arcos, quien me ha brindado su amistad y sus conocimientos lo largo de la carrera, todos quienes hemos sido sus estudiantes sabemos que es un excelente profesional y un excelente ser humano.

A Juan Fernando mi compañero de tesis y ahora buen amigo, quedo profundamente agradecido; sin tu ayuda esto no hubiese sido posible, te auguro el mejor de los éxitos.

A mis amigos: Danilo Pilacuán, Roberto Llive, Patricio López, Juan Molina, Willy Coronel, Edison Guamba, Jorge Zurita, Diego Velázquez, Grace Chicaiza, Eduardo Ortiz, Kevin Sánchez, Paul Fiallos y Andrés López.

Finalmente, a personas muy especiales para mí: Carmelina Espín, Narcisa Bautista, Teresa Bautista, Anita Espín, Luis Bautista, Maricela Bautista y a mis seres que están en el cielo.

Eternamente agradecido,

Hendry Mauricio Jiménez Bautista

DEDICATORIA

A mis padres, Juan y Rocío por mostrarme el camino hacia la superación.

Al mejor hermano, Mateo Llumiquinga.

A mi primo, Nicolás Simbaña quien en vida sabía que lo iba a lograr.

¡A mi familia, por confiar en mí!

Juan Fernando Llumiquinga S.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por haber sido la razón de mi constante esfuerzo, porque a pesar de las circunstancias siempre supieron apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida, mostrándome que puedo ser capaz de todo aquello que me proponga y que al final con cada granito de arena se forma una fortaleza de perseverancia que demuestra el fruto del esfuerzo que un hijo puede otorgarles. A ti mamita, es por ti que todo esto ha sido posible en lo más profundo de mi corazón no hay palabras que expresen toda la gratitud que siento por ti. ¡Lo logramos más!

A mi padre por ser el pilar de la familia, que siempre estuvo ahí para darme un buen jalón de orejas y encontrar el camino que a veces creía perdido.

A mi hermano por ser mi mano derecha en estas duras circunstancias, y ser un apoyo para con cada día a día lograr nuestros objetivos.

A mi familia, por estar al pendiente de cada uno de mis logros hasta el día de hoy, por sus consejos, su sabiduría y sus enseñanzas, que con el tiempo me enseñaron que la vida universitaria es una etapa que llena de muchas enseñanzas a una persona y a quienes lo rodean, sé que con el tiempo todos esos consejos que me han brindado se verán reflejados en mi vida personal y profesional, muchas gracias.

A mis amigos de la universidad, amigos del prepo y los que conocí a lo largo de la vida politécnica, que desde un inicio hemos compartido aulas de clase, luchado duras batallas, compartido experiencias y sobre todo apoyarnos los unos a los otros en las más adversas circunstancias, logrando así establecer una amistad que estoy seguro durará toda la vida.

A mi compañero de tesis Hendry, que fue como un hermano a lo largo de este tiempo de realización del proyecto y que sin él no habría sido esto posible.

Al M.Sc. Miguel Lucio y al PhD. Hugo Arcos por habernos guiado en esta recta final de estudio, a los ingenieros y profesores que convivieron y fueron de alguna forma parte de mi vida. Por eso y más, agradezco de todo corazón a cada una de las personas que con su sabiduría y ayuda han hecho esto posible.

Agradecido por lo que me ha dado la vida y por lo que está por llegar,

Juan Fernando

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	III
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	1
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.2. ALCANCE	2
1.3. MARCO TEÓRICO.....	3
1.3.1. VISIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR.....	3
1.3.2. NIVELES DE VOLTAJE ESTANDARIZADOS EN LAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DEL ECUADOR	3
1.3.3. TOPOLOGÍAS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	4
1.3.3.1. Tipos de esquemas constructivos del alimentador primario.....	4
1.3.3.1.1. <i>Alimentador primario tipo radial</i>	4
1.3.3.1.2. <i>Alimentador primario tipo anillo</i>	5
1.3.3.1.3. <i>Alimentador primario tipo mallado</i>	6
1.3.3.2. Tipos de esquemas constructivos del circuito secundario	6
1.3.3.2.1. <i>Circuito Secundario tipo radial</i>	6
1.3.3.2.2. <i>Circuito Secundario tipo anillo</i>	7
1.3.3.2.3. <i>Circuito Secundario tipo banqueado</i>	7
1.3.3.2.4. <i>Alimentador primario tipo mallado</i>	8
1.3.4. SIMBOLOGÍA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	8
1.3.5. LA NATURALEZA DE LA CARGA.....	9
1.3.5.1. Carga individual del cliente	9
1.3.6. CONSTITUCIÓN DE LOS A/P	10

1.3.6.1.	Tipos de conductores en sistemas de distribución.....	10
1.3.6.2.	Conductores desnudos.....	10
1.3.6.2.1.	<i>Conductores ASC</i>	10
1.3.6.2.2.	<i>Conductores ACSR</i>	11
1.3.6.2.3.	<i>Conductores de cobre</i>	11
1.3.6.3.	Conductores aislados.....	11
1.3.6.3.1.	<i>Material conductor</i>	11
1.3.7.	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	11
1.3.7.1.	Resistencia	11
1.3.7.2.	Inductancia	12
1.3.7.2.1	<i>Reactancia inductiva</i>	12
1.3.7.3.	Capacitancia.....	13
1.3.7.4.	Impedancia de la línea.....	13
1.3.8.	MÉTODOS DE ANÁLISIS APROXIMADOS	13
1.3.8.1.	Caída de Voltaje	14
1.3.8.2.	Caídas de voltaje permitidas por la E.E.Q.....	15
1.3.9.	MODELADO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	16
1.3.10.	SISTEMA DE MEDICIÓN EN POR UNIDAD	16
1.3.11.	IMPEDANCIA SERIE EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN.....	17
1.3.11.1.	Impedancia serie en líneas aéreas.....	17
1.3.11.2.	Ecuaciones de Carson.....	18
1.3.11.3.	Matriz de impedancia primitiva en líneas aéreas de distribución.....	19
1.3.11.4.	Matriz de Impedancia de fase en líneas aéreas y reducción de Kron ..	20
1.3.12.	TECNOLOGÍA INALÁMBRICA UTILIZADA EN EL PROTOTIPO	22
1.3.12.1.	Módulo ESP32-C3.....	22
1.3.12.2.	Servidor Web.....	23
1.3.12.3.	API Rest	24
CAPÍTULO 2	25
2.	METODOLOGÍA.....	25
2.1.	CONFIGURACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CONDUCTORES DEL ALIMENTADOR PRIMARIO Y CIRCUITO SECUNDARIO	25
2.2.	DETERMINACIÓN Y CÁLCULOS DE PARAMETROS ELÉCTRICOS EN ALIMENTADOR PRIMARIO Y CIRCUITO SECUNDARIO	27
2.2.1.	PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE	28

2.3. ESCALAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN AL VOLTAJE DEL LABORATORIO, UTILIZANDO EL FACTOR EN POR UNIDAD.....	33
2.4. DESARROLLO DE UN CASO ESPECÍFICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA EL DEBIDO ESCALAMIENTO.....	35
2.4.1. CÁLCULO DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PROPIA DE CADA CONDUCTOR.....	36
2.4.2. ESCALAMIENTO DE VALORES DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PARA SU POSTERIOR IMPLEMENTACIÓN EN EL PROTOTIPO USANDO EL SISTEMA EN POR UNIDAD.....	37
2.4.3.ESCALAMIENTO DEL VALOR DE POTENCIA A IMPLEMENTAR EN BASE AL VALOR DE POTENCIA DEL SISTEMA DE 13.8 kV.....	40
2.4.4.COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN POR UNIDAD PARA EL SISTEMA DE 13.8 kV Y EL SISTEMA PROTOTIPO PARA UN CASO PARTICULAR	41
2.4.4.1. Obtención de las caídas de voltaje en el modelo de 13.8 kV.....	41
2.4.4.2. Obtención de las caídas de voltaje en el modelo de prototipo a 120 V	41
2.4.5. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS VALORES DE CORRIENTE EN POR UNIDAD TANTO EN EL SISTEMA SIMULADO DE 13.8 kV COMO EN EL PROTOTIPO.....	42
2.4.5.1. Obtención de los valores de corriente en por unidad en el sistema real de 13.8 kV simulado en CYMDIST.....	42
2.4.5.2. Obtención de valores de corriente en p.u. para el sistema prototipo	43
2.5. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SIMULADO EN MATLAB	44
2.6. ECUACIONES QUE INTERVIENEN EN LOS CÁLCULOS DEL DEVANADO PRIMARIO Y SECUNDARIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR REAL.....	45
2.6.1. CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR REAL, PARA LA REDUCCIÓN DEL NIVEL DE VOLTAJE EN EL PROTOTIPO.....	47
2.6.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO ACORAZADO	48
2.6.2.1. Cálculo de la potencia y área del transformador	48
2.6.2.2. Calibre de alambre a utilizar	49
2.7. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES DE BOBINAS NÚCLEO TOROIDAL ..	50
2.7.1. INDUCTANCIA APROXIMADA DE UN TOROIDE.....	50
2.7.2. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES DE BOBINAS CON NÚCLEO ACORAZADO DE HIERRO.....	52
2.7.2.1. Flujo magnético creado al aplicar voltaje en una bobina	53
2.7.2.2. Inductancia de la bobina de núcleo acorazado.....	53
2.8. ANÁLISIS DE LAS RESISTENCIAS DEL CONDUCTOR UTILIZADAS EN LA EMULACIÓN	54

2.8.1.	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTENCIA.....	55
2.8.2.	POTENCIA DISIPADA POR LA RESISTENCIA	56
2.8.3.	RESISTENCIAS UTILIZADAS EN EL SISTEMA A ESCALA DE 13.8 KV...56	
2.9.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO	57
2.9.1.	CONSTRUCCIÓN DEL INDUCTÓMETRO Y RESISTÓMETRO	57
2.9.2.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL INDUCTÓMETRO Y RESISTÓMETRO	58
2.9.3.	CONSTRUCCIÓN DE PLACAS Y CABLEADO	59
2.9.4.	CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE INDUCTANCIAS Y RESISTENCIAS.....	60
2.9.5.	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO	60
2.9.6.	SISTEMA DE IDENTIFICADOR DE CASOS	61
2.9.6.1.	Diseño del circuito de detección de casos.....	61
2.9.7.	CONSTRUCCIÓN FÍSICA DEL CIRCUITO DETECTOR DE CASOS.....	62
2.9.8.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VOLTÍMETRO INALÁMBRICO	63
2.9.8.1.	Implementación de la circuitería que conforma la placa de desarrollo .	64
2.9.8.2.	Conexión de la placa de desarrollo al computador para la debida codificación y programación	64
2.9.8.3.	Pruebas de medición inalámbrica de voltaje, y recepción en el computador.....	65
2.9.8.4.	Ajuste de error de medición con respecto al voltaje de referencia en el conversor análogo digital	65
2.9.8.5.	Visualización de resultados en uno o más computadores.....	65
2.9.9.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	66
2.10.	CONEXIÓN DE LOS DIFERENTES CASOS EN EL TABLERO DE CONEXIÓN.....	67
CAPÍTULO 3		69
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
3.1.	RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA IMPEDANCIA DE LOS CONDUCTORES.....	69
3.2.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA.....	70
3.3.	CÁLCULOS DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA EN BASE A LA MATRIZ DE IMPEDANCIA.....	73
3.4.	EFFECTO JOULE DEL CONDUCTOR.....	75
3.5.	CONDUCTOR Y CALIBRE DE MÍNIMA CAIDA DE VOLTAJE.....	78

3.5.1.	CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A UNA DISTANCIA FIJA CON CALIBRE 2 AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A VARIAS DISTANCIAS CON UN SOLO CALIBRE DE CONDUCTOR.....	79
3.5.2.	CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A UNA DISTANCIA FIJA CON CALIBRE 2AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A LA MISMA DISTANCIA CON VARIOS CALIBRES DEL CONDUCTOR.....	80
3.5.3.	CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A VARIAS DISTANCIAS CON CALIBRE 2AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A LA MISMA DISTANCIA CON UN SOLO CALIBRE DEL CONDUCTOR.....	81
3.5.4.	COMPARACIÓN DE VALORES EN TIEMPO REAL OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO.....	82
3.6.	ESTUDIO DEL CASO EN EL QUE SE UTILICE CABLE PREENSAMBLADO PARA EL CIRCUITO SECUNDARIO.....	84
3.6.1.	CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR POR FASE Y CONDUCTOR DEL NEUTRO EN CABLE PREENSAMBLADO.....	85
3.7.	RESULTADOS DE FLUJOS DE CARGA PARA LA OBTENCIÓN DE CORRIENTE.....	87
3.8.	ESTUDIO DE SUBVOLTAJE EN EL CIRCUITO SECUNDARIO.....	89
3.8.1.	CAÍDA DE VOLTAJE EN EL CIRCUITO SECUNDARIO.....	89
3.9.	RESULTADOS DE LA MEDICIÓN INALÁMBRICA, Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN P.U DE CORRIENTE Y CAÍDA DE VOLTAJE.....	91
CAPÍTULO 4		93
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
4.1.	CONCLUSIONES.....	93
4.2.	RECOMENDACIONES.....	96
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
ANEXOS		100

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación, se diseña e implementa un emulador a escala reducida de un sistema de distribución (S/D) de 13.8 kV, considerando las longitudes y calibres de conductores más utilizados por las empresas eléctricas, tanto para alimentadores primarios (A/P) como para circuitos secundarios (C/S), el mismo que permitirá integrar la práctica con la teoría al realizar estudios experimentales dentro del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Los alimentadores del sistema de distribución a escala se representan con su impedancia serie calculados con la aplicación del software CYMDIST de CYME y haciendo uso del escalamiento en por unidad (p.u.), considerando únicamente los valores de resistencia y reactancia inductiva, pues por sus longitudes no son más que líneas cortas. En cuanto a la resistencia del conductor se empleará resistencias de potencia; mientras que, las reactancias inductivas se construirán en base a bobinas de núcleo de hierro y la carga será emulada mediante una lámpara LED de 2 W.

Se toman mediciones de voltaje y corriente en varios puntos, identificando sus caídas de voltaje en función del calibre y la distancia del alimentador considerado, estos parámetros son comparados con los obtenidos virtualmente mediante la aplicación del software mencionado, así como con el desarrollo en MATLAB. Los resultados se visualizarán digitalmente.

Finalmente se incluye un manual de utilización del módulo a escala, el mismo que permitirá el uso seguro del equipo.

PALABRAS CLAVE: Sistema de distribución (S/D), sistema a escala, resistencia de potencia, reactancia inductiva, caída de voltaje, alimentador primario (A/P), circuito secundario (C/S), sistema en por unidad (p.u.).

ABSTRACT

In the present degree project, a 13.8 kV scaled distribution system will be designed and implemented, considering the most used wire lengths and gauges of electric conductors used by electric companies, both in primary feeders and secondary circuits, this will allow the integration of theory and practice by doing experimental studies in the Electric Energy Distribution Laboratory at National Polytechnic School.

The distribution system's feeders will be represented only by their series impedance calculated with the application of the software CYMDIST of CYME using a per-unit (p.u.) based scaling method, considering just resistance and inductive reactance since the feeder lengths are small enough to consider them as short lines. The conductor resistance will be built using power resistors, while iron core coils will be used for the inductive reactance and the system load will be respectively dimensioned and the load will be emulated with a 2 W LED spotlight.

Voltage and current measurements in several points will serve to identify voltage drops, as a function of the wire gauges and distances, these parameters are compared with those obtained virtually by applying the aforementioned software and MATLAB. The results will be visualized digitally.

Finally, a manual for the use of the connection module is included, which will enable the safe use of the equipment.

KEYWORDS: distribution system, scale system, power resistor, inductive reactance, voltage drop, primary feeder, secondary circuits, per-unit (p.u.) based scaling method.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Un componente muy importante en el sistema de distribución es el alimentador primario, que cumple el papel de transportar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los transformadores de distribución, de igual forma el circuito secundario que transporta la energía desde los transformadores de distribución a cada uno de sus consumidores.

En su operación, el flujo de potencia a través de los conductores crea en sus parámetros efectos indeseables, siendo los más críticos las caídas de voltaje, que al no ser tratadas en toda su complejidad pueden no considerarse en el análisis de calidad del producto entregado por la distribuidora a los usuarios.

En este contexto y con la finalidad de tener suficientes herramientas didácticas en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica, se ha considerado la necesidad de disponer de un modelo a escala que permitirá a los estudiantes complementar el análisis computacional con la parte práctica tangible en la operación de los S/D.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto técnico se muestra a continuación:

- Diseñar y construir un sistema de distribución a escala que represente a una red de 13.8 kV, utilizando las mediciones del sistema en tiempo real, para fines didácticos en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Diseñar y construir un sistema de distribución a escala que represente a una red de 13.8 kV, mediante el uso de la impedancia propia del conductor $R+jX$, y omitiendo el modelado de admitancias dado que en distribución se usa líneas cortas no transpuestas y así, determinar el mejor calibre y los elementos serie que formarán parte del modelo, considerando las características que posee a través de su modelado en por unidad (p.u.).

- Mostrar en tiempo real los parámetros del sistema de distribución a escala, al variar sus elementos físicos, obteniendo las mediciones de voltaje y corriente que se reflejarán en la simulación.
- Obtener la medición de voltaje y corriente en los diversos puntos del sistema a escala, desarrollando un programa de medición inalámbrica a través de un microcontrolador.
- Realizar ensayos para la determinación de parámetros eléctricos de alimentadores en sistemas de distribución.

1.2. ALCANCE

Se realiza un equivalente a escala en corriente alterna del sistema de distribución. El sistema no pretende usar valores de medio voltaje como 13.8 kV ni tampoco usar cables o protecciones asociados a estos niveles de voltaje. No se analizará los fenómenos que ocurren dentro de los transformadores y tampoco se tomará en cuenta las cargas a nivel residencial ni la micro generación de energía.

Para ello, y en base a los tipos de conductores más utilizados en los sistemas de distribución, tanto en medio como en bajo voltaje y fijando distancias permitidas se establecerán parámetros de resistencia y reactancia inductiva, con la obtención de estos parámetros se efectuará la simulación del sistema utilizando MATLAB, cuyos resultados serán comparados con los obtenidos en la emulación y ratificados con el uso de CYME, lo que validará la operación del sistema a escala.

Se implementará un modelo a escala cuyos parámetros en por unidad, serán equivalentes a los reales en corriente alterna. El equipo demostrativo estará en la capacidad de variar los calibres y distancias tanto de alimentador primario como del circuito secundario de manera didáctica mediante la interconexión física de borneras.

Se podrá visualizar valores de voltaje y corriente en una simulación del sistema, estos valores serán transmitidos de forma inalámbrica desde el modelo a escala al computador, mediante el uso de voltímetros a escala con tecnología Wi-Fi.

Los puntos de medición de voltaje y corriente dentro del sistema a escala, estarán señalizados junto a las borneras de las impedancias correspondientes a los conductores del A/P y C/S.

Haciendo uso de un espacio adecuado, se realizará la construcción del sistema a escala para ser utilizado en las prácticas del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. VISIÓN GENERAL DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR

Una red de distribución de energía eléctrica es parte del sistema eléctrico de potencia, cuya función es suministrar energía desde una subestación de distribución hasta un gran número de consumidores también llamado sistema de distribución, sin limitación de voltaje de alimentación u otra restricción técnica de cualquier naturaleza [1].

Un sistema de distribución está constituido por las siguientes etapas:

- Subestación de distribución: instalación eléctrica que consta de elementos tales como (transformadores, barras, apartarrayos, interruptores de potencia, etc.), que sirve para disminuir desde alto voltaje a medio voltaje, y posteriormente distribuirlos mediante ramificaciones múltiples.
- Alimentadores primarios: son aquellos circuitos cuyo recorrido cubre sectores rurales y urbanos; su función es transportar la potencia a los transformadores de distribución, cuyos voltajes primarios son: 6.3 kV, 13.8 kV, 22.8 kV, etc.
- Circuitos Secundarios: son los encargados del transporte de energía desde los secundarios de los transformadores de distribución a las acometidas de los consumidores con niveles de voltaje homologados en: 240/120 V y 220/127 V.
- Los transformadores de distribución: son elementos que cumplen con el papel de reducir el voltaje primario a niveles de secundario factibles de manejar con las precauciones adecuadas [2].

1.3.2. NIVELES DE VOLTAJE ESTANDARIZADOS EN LAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DEL ECUADOR

Actualmente el país cuenta con CNEL y las unidades de negocio que se encargan de distribuir la energía eléctrica en todo el territorio nacional, tomando como base los datos del Plan Maestro de Electricidad, el Ecuador cuenta con: la Unidad Eléctrica de Guayaquil, las 10 Regionales de CNEL y 9 Empresas Eléctricas. La mayoría de las entidades antes mencionadas manejan idénticos niveles de voltaje siendo 13.8 kV el más común, sin embargo, existen distribuidoras con niveles de voltaje diferentes [3].

En la Tabla 1.1 se muestran los niveles de voltaje de alimentador primario correspondientes a cada empresa distribuidora de energía eléctrica a nivel nacional.

Tabla 1.1. Niveles de voltaje de CNEL y las unidades de negocio en Ecuador [3].

Nombre de la empresa	Nivel de voltage (V)
E.E. Ambato	13800
E.E. Azogues	22000
E.E. Centro Sur	13800
E.E. Cotopaxi	13800
E.E. Norte	13800
E.E. Quito	6300-22800
E.E. Riobamba	13800
E.E. Sur	13800-22000
E.E. Galápagos	13200-13800
CNEL Guayaquil	13800
CNEL Sucumbíos	13800
CNEL Santo Domingo	13800
CNEL Santa Elena	13800
CNEL Milagro	13800
CNEL Manabí S.A.	13800-34500
CNEL Los Ríos	13800
CNEL Esmeraldas	13800
CNEL El Oro	13800
CNEL Bolívar	13800
CNEL Guayas-Los Ríos	13800

1.3.3. TOPOLOGÍAS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La topología en redes de distribución se refiere a un arreglo o esquema del recorrido de los circuitos para la distribución de la energía eléctrica, desde su fuente de suministro hasta el usuario final [2].

1.3.3.1. Tipos de esquemas constructivos del alimentador primario

Las topologías básicas para alimentador primario se muestran a continuación:

1.3.3.1.1. Alimentador primario tipo radial

En la Figura 1.1 se muestra el sistema radial convencional, que es el más simple y de bajo costo, por lo tanto, el más común, este tipo de sistema tiene un solo camino para el flujo de potencia. La confiabilidad, la calidad del servicio y producto son bajas, son utilizados en

zonas de baja densidad de carga por ejemplo el sector rural. La ocurrencia de una falla en algún punto causa el corte del servicio de los usuarios.

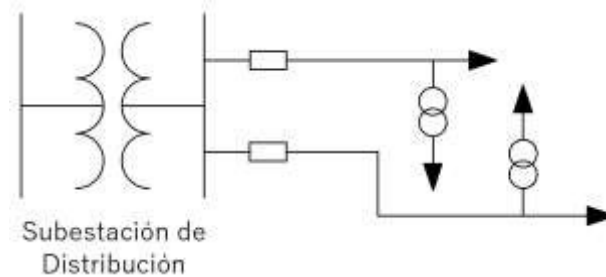


Figura 1.1. Alimentador primario tipo radial [4].

Es obvio que el sistema radial está expuesto a muchas posibilidades de interrupción por fallas en conductores aéreos, subterráneos o fallas en los transformadores cuyo tiempo de interrupción será considerable.

1.3.3.1.2. Alimentador primario tipo anillo

La Figura 1.2 muestra un alimentador tipo anillo primario, usualmente el tamaño del conductor es el mismo en todo el anillo, este arreglo provee dos trayectorias paralelas desde la subestación distribuidora a la carga, cuando el anillo es operado con interruptores de enlace.

De esta forma, alguna sección del alimentador primario puede aislarse sin interrumpir el servicio, y las fallas son reducidas en su duración a solo el tiempo necesario para localizar la falla y hacer la maniobra necesaria para restaurar el servicio. Esta topología aumenta la confiabilidad del sistema de distribución, la calidad del producto y servicio es alta, este tipo de esquema aumenta el costo de construcción y es utilizado en zonas de alta densidad de carga.

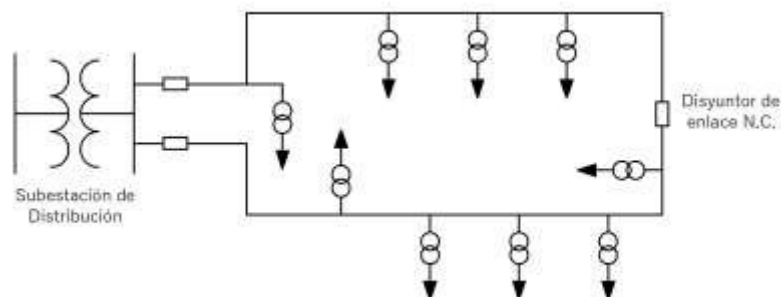


Figura 1.2. Alimentador primario tipo anillo [4].

Las trayectorias paralelas del alimentador también pueden ser conectadas desde barras separadas en la subestación y alimentadas desde transformadores separados.

1.3.3.1.3. Alimentador primario tipo mallado

En la Figura 1.3 se muestra un sistema de alimentadores interconectados en esquema tipo mallado, alimentados por varias subestaciones de distribución, los alimentadores primarios radiales pueden derivarse de los alimentadores de enlace interconectados o servidos directamente de las subestaciones de distribución.

Cada alimentador de enlace tiene dos interruptores asociados. Las pérdidas son bajas debido a la división de cargas. La confiabilidad y la calidad del servicio de este arreglo es mucho más alta, pero es más difícil de diseñar y de operar que el sistema en anillo, es utilizado en zonas de alta importancia estratégica y donde la densidad de carga es mucho más alta.

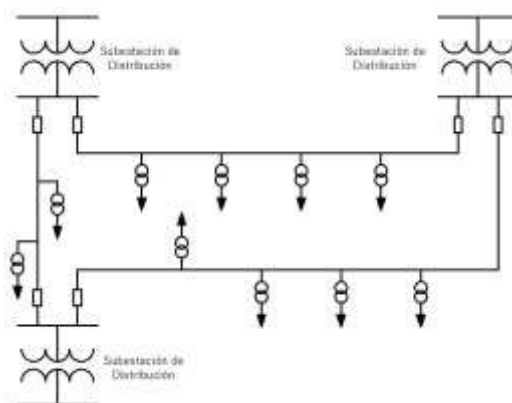


Figura 1.3. Alimentador primario tipo mallado [4].

1.3.3.2. Tipos de esquemas constructivos del circuito secundario

Las topologías básicas para circuito secundario se muestran a continuación:

1.3.3.2.1. Circuito Secundario tipo radial

El esquema de circuito secundario tipo radial que se muestra en la Figura 1.4 posee características similares a la topología utilizada en el A/P.

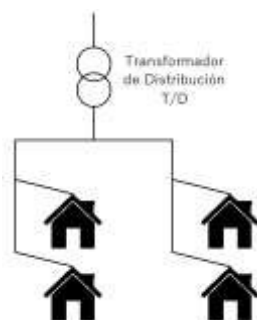


Figura 1.4. Circuito Secundario tipo radial [4].

Tomando en consideración que tendrá un solo camino para el flujo de distribución de energía, una calidad de producto y servicio baja, su costo de construcción será bajo y será utilizado en zonas de densidad de carga baja como por ejemplo el rural.

1.3.3.2.2. *Circuito Secundario tipo anillo*

El esquema de circuito secundario tipo anillo que se muestra en la Figura 1.5 posee características similares a la topología utilizada en el A/P.

Tendrá al menos dos caminos para el flujo de distribución de energía, una calidad de producto y servicio alta, su costo de construcción será alto en relación con el tipo radial y será utilizado en zonas de alta densidad de carga.

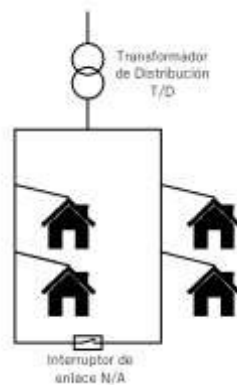


Figura 1.5. Circuito Secundario tipo anillo [4].

1.3.3.2.3. *Circuito Secundario tipo banqueado*

El esquema de circuito secundario tipo banqueado que se muestra en la Figura 1.6 posee dos o más transformadores de distribución conectados a la vez a un solo A/P, lo que es un limitante en términos de confiabilidad de la energía, sin embargo, poseerá un interruptor de enlace que permitirá a un solo transformador abastecer dos o más caminos distintos del flujo de distribución, su calidad del producto y servicio será medianamente alto, su costo de construcción será alto y será utilizado en zonas de alta densidad de carga.

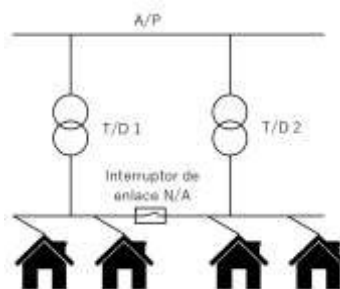


Figura 1.6. Circuito Secundario tipo banqueado [4].

1.3.3.2.4. Alimentador primario tipo mallado

El esquema de circuito secundario tipo mallado que se muestra en la Figura 1.7 posee características similares a la topología utilizada en el alimentador primario.

Tendrá varios caminos para el flujo de distribución de energía, una calidad de producto y servicio muy alta, su costo de construcción será elevado y será utilizado en zonas de alta densidad de carga, y de alta importancia estratégica. Al poseer más de un A/P conectado a los diversos transformadores la confiabilidad del sistema de distribución aumenta.

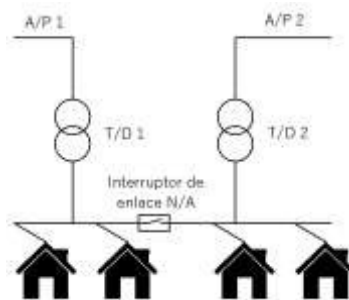


Figura 1.7. Circuito Secundario tipo mallado [4].











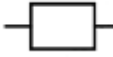
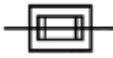

1.3.4. SIMBOLOGÍA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Conocer algunos de los elementos y símbolos normalizados que forman parte del sistema de distribución, es de suma importancia debido a que permite entender la forma básica en que las redes de distribución eléctrica están constituidas; así mismo, es de vital ayuda en la implementación de sistemas georreferenciados GIS en base de la aplicación la Norma IEC 60617 utilizada en Ecuador e internacionalmente [5].

En la Tabla 1.2. se muestra los símbolos básicos que se usarán en el presente trabajo de titulación:

Tabla 1.2. Símbolos principales de los sistemas de distribución [5].

Equipo	Símbolo
Transformador monofásico	
Transformador trifásico	
Seccionador fusible	

Seccionadora cuchilla	
Red aérea de medio voltaje	Linea tipo continuo (full) 
Red aérea de bajo voltaje	Linea tipo ACADISO10W100 (ISO dash dot) 
Acometida	Linea tipo continuo (full) 
Medidor	
Tensor a tierra simple	
Puesta a tierra	
Luminaria	
Poste Hormigón	
Interruptor	
Disyuntor	
Seccionador por fusible NH	
Descargador	

1.3.5. LA NATURALEZA DE LA CARGA

1.3.5.1. Carga individual del cliente

El análisis y modelado de los sistemas de distribución de energía eléctrica depende en gran parte de la carga individual del cliente que se encuentra sometida a constantes cambios. Cada vez que un consumidor enciende o apaga un artefacto eléctrico, su efecto

puede ser observado, directamente del C/S, y en menor proporción desde el alimentador primario [6].

Para una mejor comprensión de este trabajo de titulación es necesario definir algunos términos detallados en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Términos que caracterizan a la carga [6].

Término	Descripción
Demanda	<ul style="list-style-type: none"> • Es la carga promedio en un determinado intervalo de tiempo. • Puede ser medida en kVA, kW, kVAr, o A.
Demanda Máxima	En un intervalo de tiempo determinado se caracteriza por ser la mayor de las demandas.
Factor de Demanda	Se obtiene al dividir la demanda máxima para la carga conectada.
Factor de Utilización	Se obtiene al dividir la demanda máxima para la capacidad nominal.
Factor de Carga	Se obtiene al dividir la demanda promedio de uno o un grupo de clientes para la demanda máxima obtenida en un periodo de tiempo.

1.3.6. CONSTITUCIÓN DE LOS A/P

Están conformados principalmente por cables aéreos o subterráneos [7]. A continuación, se detallan algunos de estos componentes:

1.3.6.1. Tipos de conductores en sistemas de distribución

En las redes de distribución empleadas a nivel nacional y haciendo uso de la guía para diseño en redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito (E.E.Q.), se usa principalmente conductores de aluminio desnudo para redes aéreas y en casos especiales conductores de cobre para las subterráneas, de las cuales se detallarán sus principales características [5].

1.3.6.2. Conductores desnudos

1.3.6.2.1. Conductores ASC

El material principal de este tipo de conductor es aluminio desnudo, según la norma ASTM 1350-H19 y especificaciones B-230, B-231; cuyos conductores se encontrarán en forma concéntrica y dispondrán de 7 hilos que no sobrepasen el calibre 4/0 AWG y 19 hilos para mayores calibres [8].

1.3.6.2.2. Conductores ACSR

El material principal de este tipo de conductor es aluminio reforzado que dispone de alma de acero, según la norma ASTM designación B232 en aluminio y ASTM designación B498 en el caso del acero, de igual forma se encontrarán de manera concéntrica, cuya disposición será 6/1 hilos que no sobrepasen el calibre 4/0 AWG y 26/7 hilos para mayores calibres.

1.3.6.2.3. Conductores de cobre

El material principal de este tipo de conductor es cobre electrolítico que será estirado al frío y cuyo principal uso es el de conexión a tierra del sistema de distribución, según la norma ASTM B8-46, que además se encontrará de manera concéntrica.

Para el caso de los conductores que se usarán en el neutro para redes subterráneas se usará conductores similares, pero de cobre estañado.

1.3.6.3. Conductores aislados

1.3.6.3.1. Material conductor

El material principal de este tipo de conductor es cobre electrolítico, según la norma ASTM B3, de igual forma será concéntrico, y en casos especiales puede ser de aluminio.

1.3.7. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Un sistema de distribución está conformado por cuatro parámetros fundamentales que conforman la impedancia serie del alimentador (resistencia e inductancia) y los parámetros paralelos del mismo (capacitancia y conductancia), de estos cuatro parámetros, en el presente trabajo de titulación únicamente se detallará y profundizará en los componentes serie del conductor y que serán objeto de estudio más adelante [2].

1.3.7.1. Resistencia

Un parámetro eléctrico importante en el sistema de distribución es la resistencia, debido a que las pérdidas de potencia en el alimentador se deben principalmente al efecto joule, también conocida como resistencia efectiva o de corriente alterna, que se describe en la Ecuación 1.1 [2].

$$R = \frac{\text{Potencia disipada del conductor}}{I^2} \quad (1.1)$$

Sin embargo, el punto de partida para el análisis es la resistencia DC en un conductor y que se describe en la Ecuación 1.2.

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (1.2)$$

Donde:

R_0 : es la resistencia DC en el conductor

ρ : es la resistividad en el conductor dado en $\Omega \cdot m$

l : es la longitud en metros

A : es el área transversal en metros cuadrados

1.3.7.2. Inductancia

La inductancia se origina cuando por el conductor circula una corriente cuya magnitud varía en el tiempo, creando un flujo magnético que se entrelaza con los conductores cercanos al mismo. Está definido por la Ecuación 1.3 [2].

$$L = \frac{d\sigma}{di} \quad (1.3)$$

Donde:

L : es la inductancia propia del conductor

$\frac{d\sigma}{di}$: es la variación del flujo magnético con respecto a la variación de la corriente

El valor de la inductancia es un elemento fundamental para el cálculo de la reactancia inductiva se, y cuyo análisis se presenta en el siguiente apartado.

1.3.7.2.1 Reactancia inductiva

Dada la frecuencia de un sistema eléctrico, además de su inductancia total, se deduce la Ecuación 1.4., que define la reactancia inductiva del sistema, que equivale a la suma de la inductancia interna y externa en el cable [2].

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.4)$$

Que mediante artificios matemáticos se deduce la Ecuación 1.5 en función de la distancia media geométrica DMG y el radio medio geométrico RMG.

$$X_L = 0.11736 \log \frac{DMG}{RMG} \left(\frac{\Omega}{km} \right) \quad (1.5)$$

Donde se tienen las mismas unidades tanto en el DMG como en el RMG.

1.3.7.3. Capacitancia

Al considerar tanto los A/P y C/S como líneas cortas, se puede omitir por completo la capacitancia en derivación debido a que su valor es muy pequeño; es por esto, que en este tipo de líneas solo se considera la resistencia R y la inductancia L, mismas que se conectan en serie y se aplica para la longitud total de la línea [2].

1.3.7.4. Impedancia de la línea

Para realizar un modelo aproximado de una línea de distribución, se toma como suposición que dicho segmento de la línea se encontrará transpuesta, de esta forma únicamente se considera la impedancia que surge en secuencia positiva del segmento de línea en mención, para representar la configuración de una línea trifásica en distribución se hace uso de la Figura 1.8. que muestra una estructura con configuración semicentrada de la línea, además la Ecuación 1.6. define la impedancia de la línea [6].

$$Z = R + j 0.07533 \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{RMG}\right) \left(\frac{\Omega}{milla}\right) \quad (1.6)$$
$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}}$$

Donde:

Z: Impedancia de línea

R: es la resistencia en ohmios por millas del conductor

RMG: es el radio medio geométrico

D_{eq} : es la distancia equivalente entre conductores

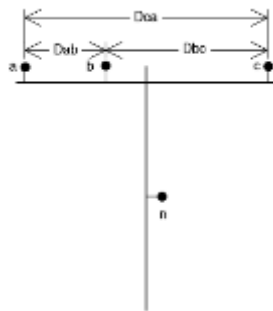


Figura 1.8. Configuración semicentrada de una línea trifásica. [6]

1.3.8. MÉTODOS DE ANÁLISIS APROXIMADOS

Al realizar el estudio de un alimentador de distribución se puede observar que abastece de servicio a cargas de todo tipo, estas pueden ser monofásicas, bifásicas, trifásicas y algunos casos especiales.

Para realizar un estudio de este tipo de alimentadores y en el caso de 13.8 kV lo conveniente es considerar las corrientes de línea y voltajes de línea trifásicos, tratando de modelar de manera aproximada el alimentador en estudio. A continuación, se exponen algunos de los más importantes métodos de análisis, que darán una idea previa para luego profundizar en estudios más exactos [6].

1.3.8.1. Caída de Voltaje

Mediante el circuito equivalente que se puede observar en la Figura 1.9 se representa el equivalente línea-neutro de un alimentador trifásico que abastece a una carga trifásica, al aplicar la ley de voltajes de Kirchoff se obtiene la Ecuación 1.7, que muestra la caída de voltaje del equivalente línea neutro [6].

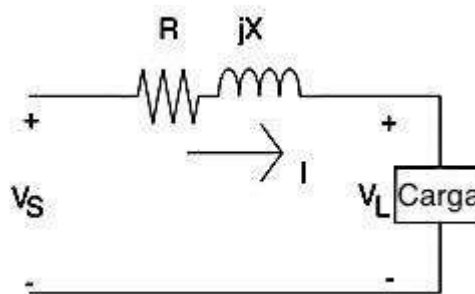


Figura 1.9. Circuito equivalente línea-neutro [6].

$$V_s = V_L + (R + jXL) \cdot I \quad (1.7)$$

Donde:

V_s : voltaje de la fuente

V_L : voltaje de la carga

R : resistencia equivalente por fase

jXL : reactancia inductiva del equivalente línea-neutro

I : corriente que absorbe la carga

Al descomponer dicha expresión en su diagrama fasorial tal como se observa en la Figura 1.10, se evidencia que el fasor de la caída de voltaje correspondiente a la resistencia de una de las líneas está en fase con la corriente, mientras que el fasor de caída de voltaje a través de la reactancia estará noventa grados en adelanto, las líneas entrecortadas muestran la parte real e imaginaria de la caída de voltaje en la impedancia. Finalmente, la caída de voltaje a lo largo de la línea será la diferencia existente entre los voltajes de la fuente y de la carga como se puede observar en la Ecuación 1.8 [6].

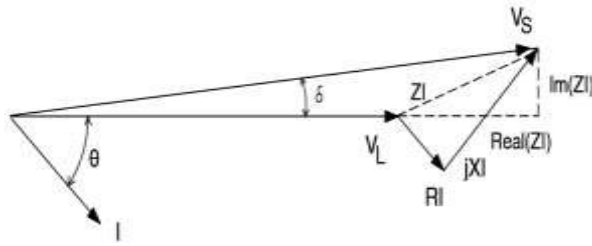


Figura 1.10. Diagrama fasorial [6].

$$\bar{V}_{drop} = |\bar{V}_S - \bar{V}_L| \quad (1.8)$$

Donde:

\bar{V}_{drop} : Caída de voltaje en el conductor

\bar{V}_S : Voltaje de la fuente

\bar{V}_L : Voltaje en la carga

1.3.8.2. Caídas de voltaje permitidas por la E.E.Q

Dado que el sistema de distribución a escala debe cumplir con ciertos parametros en los cuales se toma en cuenta los fenómenos y directrices que debe tener el sistema real, se toma en cuenta las caídas de voltaje permitidas, ya que serán de suma importancia en el sistema de distribución.

Para el caso del sistema a escala se ha tomado como referencia las caídas máximas de voltaje para una red primaria obtenidas de las Normas para Sistemas de Distribución de la E.E.Q. [5], como se muestra en la Tabla 1.4 y la Tabla 1.5, dichas caídas de voltaje servirán para establecer un rango que será utilizado en el sistema a escala.

Tabla 1.4. Caída Máxima de Voltaje en la Red Primaria
(Subestación sin cambiador de taps bajo carga) [5].

Componentes del Sistema de Distribución	Alimentador	
	Urbano	Rural
	Caída de voltaje	Caída de voltaje
Primario	3.0%	3.5%

Tabla 1.5. Caída Máxima de Voltaje en la Red Primaria
(Subestación con cambiador de taps bajo carga) [5].

Componentes del Sistema de Distribución	Alimentador	
	Urbano	Rural
	Caída de voltaje	Caída de voltaje
Primario	3.5%	4%

De manera similar para la obtención de las caídas de voltaje en el secundario se toma como referencia las Normas para Sistemas de Distribución de la E.E.Q., haciendo énfasis en las caídas de voltaje máximas en circuitos secundarios y que se muestran en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Caída Máxima de Voltaje en la Red Secundaria [5].

Componentes del Sistema de Distribución	Alimentador	
	Urbano	Rural
	Caída de voltaje	Caída de voltaje
Secundario	2.5%	3.0%

1.3.9. MODELADO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

En la Figura 1.11 se representa el esquema básico a considerarse para la modelación y para la implementación del circuito a emular. Estará compuesto por un A/P a 13.8 kV cuyo nivel de voltaje es el más usual a nivel nacional, para conectarse a un transformador reductor de 13.8 kV a 220 V, y con cuyo voltaje se llegará mediante un C/S al usuario final.

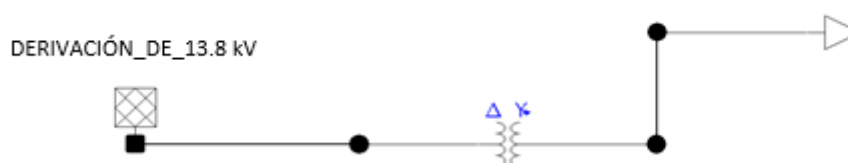


Figura 1.11. Modelación de un sistema de 13.8 kV

Para el A/P se utilizará un conductor de aluminio calibre 2 AWG ACSR y cuyas distancias variarán desde 10 km a 25 km, tratando de apegarse a la realidad que se tiene en un circuito de distribución; a continuación, el circuito secundario se podrá variar entre cuatro calibres de conductor a saber : número 2, 2/0, 3/0 y 4/0 AWG ACSR respectivamente, con distancias que variarán desde los 150 hasta los 300 metros, finalmente la carga de 2kW que será emulada en el sistema tal como se indicó en la Figura 1.11.

1.3.10. SISTEMA DE MEDICIÓN EN POR UNIDAD

Para la transformación de los parámetros reales del S/D a los elementos a escala reducida del emulador, se utiliza el sistema en por unidad que permite representar a toda cantidad

como una fracción decimal de una base adecuadamente escogida mediante la Ecuación 1.9 [9].

$$Cantidad\ por\ unidad = \frac{Valor\ real}{Valor\ base\ de\ la\ cantidad} \quad (1.9)$$

Para definir un sistema por unidad se acostumbra a seleccionar dos cantidades base que son voltaje y potencia. Una vez que se ha tomado las cantidades base, el resto de los valores se relacionan con ellas por medio de las leyes eléctricas habituales. Para un sistema monofásico, se tiene las siguientes expresiones que convergen en la Ecuación 1.10 [9].

$$\begin{aligned} S_{base}, P_{base} \text{ ó } Q_{base} &= V_{base} \cdot I_{base} \\ R_{base}, X_{base} \text{ ó } Z_{base} &= \frac{V_{base}}{I_{base}} \\ Y_{base} &= \frac{I_{base}}{V_{base}} \\ Z_{base} &= \frac{I_{base}}{V_{base}} \\ Z_{base} &= \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Una vez que los valores fueron seleccionados ya sean estos P, S o V, los demás valores que se involucran en este contexto pueden ser calculados fácilmente con las ecuaciones anteriores.

1.3.11. IMPEDANCIA SERIE EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN

La impedancia serie en líneas aéreas es de suma importancia previo a empezar el análisis en el alimentador primario de estudio, esta impedancia puede ser de un circuito monofásico, bifásico o trifásico y consiste en la resistencia del conductor y la impedancia propia y mutua resultante del campo magnético de los conductores, el componente resistivo se puede encontrar en el ANEXO A [6].

1.3.11.1. Impedancia serie en líneas aéreas

La reactancia inductiva (propia y mutua), es una componente principal de la impedancia generada por los campos magnéticos del conductor como se puede ver en la Figura 1.12, que muestra los conductores desde el primero hasta el n, con sus respectivas líneas de flujo magnético debido a la corriente que circula a través de ellos y que se asume en dirección fuera de la página, la Ecuación 1.11 define la reactancia inductiva para un haz de conductores [6].

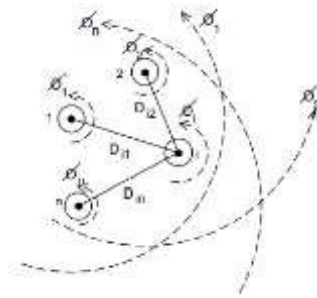


Figura 1.12. Campos magnéticos en un haz de conductores [6].

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$$

$$\lambda_i = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(I_1 \cdot \ln \frac{1}{D_{i1}} + I_2 \cdot \ln \frac{1}{D_{i2}} + \dots + I_i \cdot \ln \frac{1}{GMR_i} + \dots + I_n \cdot \ln \frac{1}{D_{in}} \right) \left(\frac{Wb-t}{m} \right) \quad (1.11)$$

Donde:

D_{in} : distancia en pies entre el conductor i y el conductor n

GMR_i : radio medio geométrico en pies del conductor i

En el conductor i esta constituido de la inductancia propia e inductancia mutua entre el conductor i y los n-1 conductores, mismas que al interactuar forman una inductancia total que es la que posee cada conductor.

1.3.11.2. Ecuaciones de Carson

Debido a que en un alimentador se encuentra intrínsecamente desequilibrado, es decir no se puede asumir algún espaciado entre conductores, o fijar un tamaño de conductor, Jhon R. Carson en 1926 publicó un artículo en el cual desarrollaba la teoría que explica que las impedancias mutuas y propias de "n" conductores pueden ser determinadas asumiendo que la tierra es un sólido infinito cuya resistencia es constante, y eliminando los efectos de la frecuencia en altas potencias. Para encontrar este equivalente Carson asumió imágenes de cada uno de los conductores aéreos y fijando la imagen bajo el suelo cuya distancia es la misma, sobre o bajo el suelo y que se puede observar en la Figura 1.13 [10].

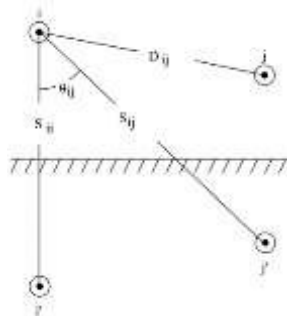


Figura 1.13. Imágenes de los conductores aéreos bajo el suelo [6].

Mediante el uso de cálculos matemáticos, se ha llegado a las ecuaciones modificadas de Carson mostradas a continuación y que se usarán en el desarrollo del presente trabajo de titulación, en la Ecuación 1.12, el modelo de Carson muestra la impedancia propia y la Ecuación 1.13 muestra la impedancia mutua [6].

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.12)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.13)$$

Donde:

\hat{z}_{ii} : impedancia propia del conductor i en $\Omega/milla$

r_i : resistencia del conductor i en $\Omega/milla$

GMR_i : radio medio geométrico del conductor i en pies

\hat{z}_{ij} : impedancia mutua entre el conductor i y j en $\Omega/milla$

D_{ij} : distancia entre los conductores i y j en pies (ver Figura 1.13)

1.3.11.3. Matriz de impedancia primitiva en líneas aéreas de distribución

Basados en las Ecuaciones 1.12 y 1.13 se puede armar la matriz de impedancia de n conductores por n conductores, para el caso de una red aérea de cuatro conductores y conectado a tierra, la matriz resultante será de una dimensión de 4×4 , en un segmento de línea subterránea se tendrá tres cables neutros concéntricos y la matriz resultante será de 6×6 , de manera general la matriz de impedancia primitiva en líneas trifásicas con m neutros se muestra en la Ecuación 1.14, esta matriz puede ser representada de manera particionada como se observa en la Ecuación 1.15 [6].

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \vdots & \hat{Z}_{an1} & \hat{Z}_{an2} & \hat{Z}_{anm} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \vdots & \hat{Z}_{bn1} & \hat{Z}_{bn2} & \hat{Z}_{bnm} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \vdots & \hat{Z}_{cn1} & \hat{Z}_{cn2} & \hat{Z}_{cnm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{Z}_{n1a} & \hat{Z}_{n1b} & \hat{Z}_{n1c} & \vdots & \hat{Z}_{n1n1} & \hat{Z}_{n1n2} & \hat{Z}_{n1nm} \\ \hat{Z}_{n2a} & \hat{Z}_{n2b} & \hat{Z}_{n2c} & \vdots & \hat{Z}_{n2n1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2nm} \\ \hat{Z}_{nma} & \hat{Z}_{nmb} & \hat{Z}_{nmc} & \vdots & \hat{Z}_{nmn1} & \hat{Z}_{nmn2} & \hat{Z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

1.3.11.4. Matriz de Impedancia de fase en líneas aéreas y reducción de Kron

En la mayoría de las aplicaciones, la matriz de impedancias se reduce a una matriz de 3x3 que considera la impedancia mutua y propia de las tres fases. En la Figura 1.14 se puede observar un segmento de línea trifásica con neutro a tierra, que al aplicar la reducción de Kron se asume que cada una de las líneas tienen un neutro común.

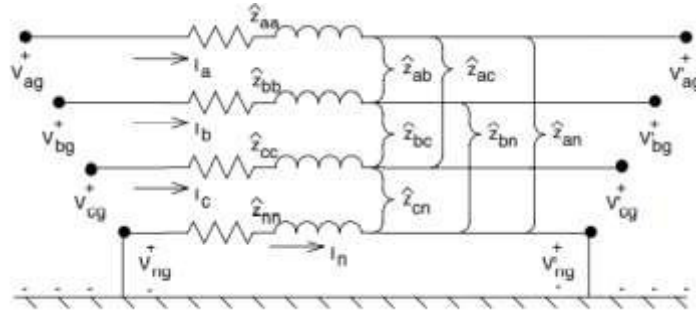


Figura 1.14. Segmento de línea en estrella de 4 hilos con conexión a tierra [6].

La reducción de Kron aplica las leyes de voltaje de Kirchoff para obtener la matriz que se observa en la Ecuación 1.16. que muestra las caídas de voltaje en base a la matriz de impedancias, de la cual se puede obtener la caída de voltaje y corriente para un tramo determinado [6].

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{an} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bn} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cn} \\ \hat{Z}_{na} & \hat{Z}_{nb} & \hat{Z}_{nc} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

En forma particionada se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix}$$

Desarrollando la ecuación matricial se obtiene:

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}]$$

Finalmente, la matriz de impedancia por fase tendrá la forma que se muestra en la Ecuación 1.17.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (1.17)$$

Donde:

Z_{ii} : impedancia propia del conductor i en Ω/milla

Z_{ij} : impedancia mutua entre el conductor i y j en Ω/milla

La matriz de impedancia de únicamente la fase b, en un circuito monofásico se puede establecer como en la Ecuación 1.18.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (1.18)$$

La impedancia propia de fase Z_{bb} puede ser usada para determinar las caídas de voltaje en el alimentador, una vez que las corrientes son conocidas. Para hacer más simples los cálculos en la matriz los demás componentes de la matriz serán puestos en cero obteniendo la impedancia de la fase B, y al aplicar las ecuaciones de Carson permite obtener un modelado más exacto del segmento de la línea en estudio como se puede observar en la Figura 1.15 [6].

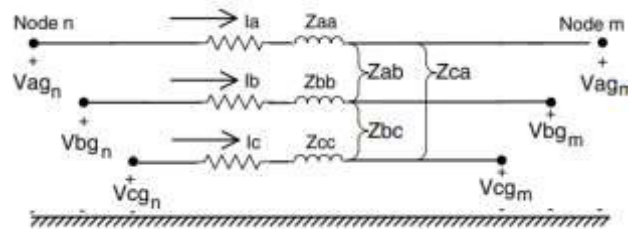


Figura 1.15. Modelado de la línea de estudio. [6]

La ecuación de voltaje en un segmento de línea en base a su matriz de impedancia se muestra en la Ecuación 1.19 [6].

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

De manera simplificada se define la Ecuación 1.20 que muestra la caída de voltaje, y que se denomina ecuación reducida de Kron [6].

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \quad (1.20)$$

Que será la ecuación utilizada para la obtención de caída de voltaje y corriente en el sistema de distribución a emular.

1.3.12. TECNOLOGÍA INALÁMBRICA UTILIZADA EN EL PROTOTIPO

Para la elaboración del voltímetro inalámbrico se hace uso de tecnología Wi-Fi, con el afán de tener un dispositivo con el cual sensor los valores de caída de voltaje y corriente en los conductores. Para la elaboración de este equipo se ha utilizado una serie de elementos electrónicos y herramientas computacionales como se muestra a continuación.

1.3.12.1. Módulo ESP32-C3

El chip ESP32 es un módulo dual Wi-Fi que nos permite recopilar la información de voltaje para almacenarla y posteriormente transmitirla de forma inalámbrica a un computador. El ESP32 emplea un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo, la Figura 1.16 muestra la configuración física del ESP32-C3, este módulo viene incorporado en una PCB (placa de circuito impreso, por sus siglas en inglés) que incluye, además del microcontrolador, una antena, un chip que tiene una memoria integrada de 4 Mb, amplificadores de potencia, receptor de bajo ruido, filtros, y módulos que permiten administrar la energía:

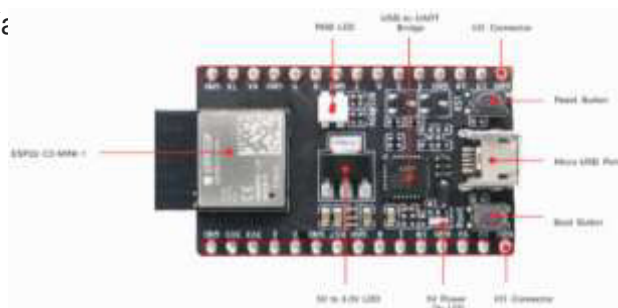


Figura 1.16. Configuración física del ESP32-C3.

Algunos de los principales componentes físicos del ESP32 se describen en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Principales componentes del ESP-32.

Componentes	Descripción
LDO de 5V a 3.3V	Regulador de voltaje que transforma de 5 VDC a 3.3 VDC.
Indicador led de encendido	Se encenderá cuando un conector USB este conectado al computador.
Pines I/O	Pines de entrada y salida.
Boton de carga	Boton de carga y reseteo.

Puerto Micro USB	Conexión para interfáz USB.
Boton de Reset	Botón para resetear el sistema.
Puente USB a UART	Puente USB-UART, transferencia de 3 Mbps.
LED RGB	Led indicador RGB.

En la Figura 1.17 se puede observar el diagrama de bloques que muestra los componentes del ESP32-C3 y sus principales interconexiones.

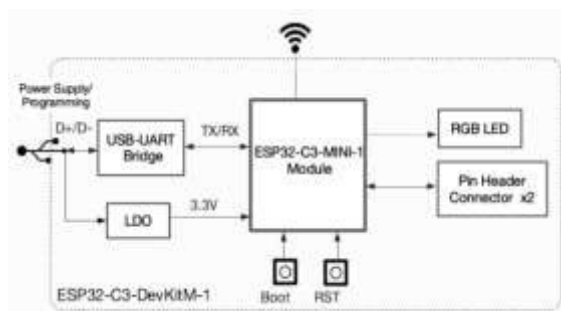


Figura 1.17. Diagrama de bloques del ESP32-C3.

1.3.12.2. Servidor Web

Es un programa de computadora que nos permite alojar páginas web y mostrarlas cuando el navegador de otro computador las solicite, haciendo uso de varias formas de conexión, tales como: bidireccionales, unidireccionales, síncronas y asíncronas con el cliente. De esta forma genera una respuesta en varios lenguajes o aplicaciones del lado del cliente, dicho código se renderiza a través de un navegador web, por medio de un protocolo y muestran contenido estático como archivos HTML, imágenes, hojas de estilo, entre otros [12].

En este tipo de comunicaciones el protocolo más utilizado es el HTTP, con un modelo cliente – servidor, donde el servidor será el que almacene los archivos a ser consultados y también resuelva las peticiones de los clientes, y el cliente, por lo general un computador personal, será el que realice las peticiones y muestre los resultados al usuario, en la Figura 1.18 se puede observar la estructura básica de un servidor web.



Figura 1.18. Estructura básica de un servidor web.

1.3.12.3. API Rest

Es una interfaz de programación de aplicaciones, la cual permite la interacción del módulo ESP32 y el computador. La definición de API o Interfaz de programación de aplicaciones es un programa o conjunto de programas que utiliza el protocolo HTTP y que permite comunicar los datos entre aplicaciones para lograr una adecuada interacción entre los datos [13], es decir una adecuada comunicación entre aplicaciones y así intercambiar información de manera rápida y segura, algunas de las solicitudes más utilizadas son:

- POST: se crea los datos en un servidor
- GET: lectura de datos en el host
- DELETE: borra la información
- PUT: registro de actualizaciones

Una vez explicado que un servidor web opera por medio del protocolo HTTP, el uso de una API Rest, y usando un Modelo Cliente - Servidor, a este protocolo se le asigna el puerto TCP 80 en la mayoría de los casos, las peticiones que se realicen al servidor se hacen mediante la petición GET, en el cual el recurso se solicita por medio del URL del servidor web [14].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para el diseño y construcción del módulo del sistema de distribución, se inicia por elaborar las matrices de impedancia, las cuales se obtienen mediante la ecuación reducida de Kron y se corroboran a través del software CYMDIST de CYME, en este software se ingresa la configuración geométrica de la estructura, calibre del conductor en las fases y el neutro, temperatura y longitud del conductor en análisis.

2.1. CONFIGURACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CONDUCTORES DEL ALIMENTADOR PRIMARIO Y CIRCUITO SECUNDARIO

Las estructuras más comunes en sistemas de distribución para niveles de voltaje de 13.8 kV son las 3CP (Trifásico Centrado Pasante), cuya altura promedio es de 9.2 m, cada una de las fases están constituidas por un conductor de aleación de aluminio ACSR mismo que puede variar dependiendo del escenario, y si se encuentran en medio voltaje o bajo voltaje; los calibres más utilizados se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Calibres utilizados para la emulación del sistema de distribución [6].

Tamaño	Clase	Material	Diámetro Pulgadas	GMR Pies	Resistencia Ω /milla	Capacidad Amperios
2	7/1	ACSR	0.325	0.00504	1.65	180
4/0	6/1	ACSR	0.563	0.00814	0.592	340
3/0	6/1	ACSR	0.502	0.006	0.723	300
2/0	6/1	ACSR	0.447	0.0051	0.895	270

Siendo el calibre 2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL el más utilizado a nivel de medio voltaje y los demás calibres en el lado de bajo voltaje, con diferentes longitudes para cada calibre del conductor. Cabe resaltar que, en cada caso, el calibre del neutro es idéntico al de las fases.

Los conductores se encuentran soportados por las estructuras de hormigón en el poste y una distribución de herrajes que forman la estructura 3CP (Trifásico Centrado Pasante) para el lado de medio voltaje como se puede observar en la Figura 2.1, y en contraste para el lado de bajo voltaje las estructuras más utilizadas son las 3EP (Tres Vías Vertical Pasante), como se muestra en la Figura 2.2.

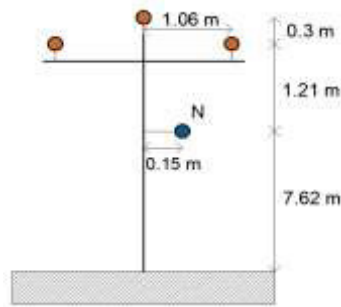


Figura 2.1. Configuración 3CP de una línea de distribución a 13.8 kV [10].

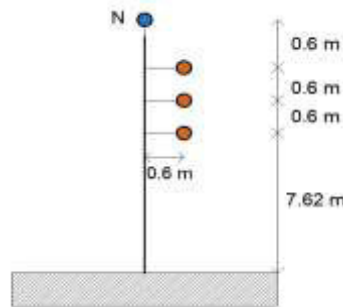


Figura 2.2. Configuración 3EP de un circuito secundario a 220 V [10].

Los datos de los conductores que conforman el alimentador primario se muestran en la Tabla 2.2 y la Tabla 2.3, de igual manera los datos de los calibres utilizados en el circuito secundario se muestran de manera detallada en el ANEXO B y que son proporcionados por las librerías del software CYMDIST.

Para el lado de A/P se considera un calibre 2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL, mientras que para el lado de C/s se tiene cuatro tipos diferentes de conductores, que son: calibre 4/0 AWG ACSR, calibre 3/0 AWG ACSR, calibre 2/0 AWG ACSR, calibre 2 AWG ACSR.

Tabla 2.2. Datos del conductor de fase en medio voltaje.

CONDUCTOR DE FASE	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal	-----
Corriente nominal	180 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	66.31 kcmil
Diámetro interno	0.12988 pulgada
Diámetro externo	0.325 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06047 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla

Tabla 2.3. Datos del conductor de neutro en medio voltaje.

CONDUCTOR DE NEUTRO	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal	-----
Corriente nominal	180 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	66.31 kcmil
Diámetro interno	0.12988 pulgada
Diámetro externo	0.325 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06047 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla

2.2. DETERMINACIÓN Y CÁLCULOS DE PARAMETROS ELÉCTRICOS EN ALIMENTADOR PRIMARIO Y CIRCUITO SECUNDARIO

El sistema a emular en el prototipo a escala está compuesto básicamente por una acometida de 13.8 kV, un alimentador primario cuyo calibre será el 2 AWG ACSR para varias distancias (longitudes en kilómetros), un transformador reductor de 13.8 kV a 220 V tratando de representar de manera eficaz a un sistema de distribución, un circuito secundario cuyas distancias y calibres irán variando de acuerdo a las más utilizadas en las empresas eléctricas del Ecuador, para finalmente conectarse a una carga que representará al consumidor final, como se aprecia en la Figura 2.3.

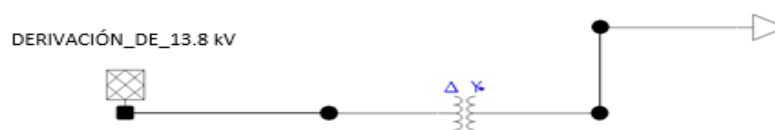


Figura 2.3. Sistema de distribución de 13.8 kV simulado en CYME.

Para obtener los parámetros que componen el A/P y el C/S, se procede a realizar la simulación del sistema de distribución en CYMDIST como se puede observar en la figura anterior, con lo cual se determina las caídas de voltaje, corrientes, y la matriz de impedancia por fase $[Z_{abc}]$, que es el punto de partida para la implementación del prototipo, el procedimiento para obtener estos resultados se describe en la subrutina del ANEXO C.

Los valores de resistencia e inductancia por fase en ohmios y henrios respectivamente se obtienen partiendo de la matriz de impedancias $[Z_{abc}]$ haciendo uso ecuaciones y cálculos. Por otro lado, los valores de R y L pueden ser determinados de manera directa usando un programa computacional cuyo dato de entrada es la matriz de impedancia, esto se expone detalladamente en la subrutina del ANEXO D, los resultados de resistencia e inductancia para todos los calibres se muestran en el ANEXO E.

De esta forma y a manera de que los datos obtenidos tanto en la simulación en CYMDIST como los obtenidos mediante cálculos y ecuaciones sean corroborados, se procede a efectuar un caso de estudio, que será replicado de manera similar para los demás casos, tanto del A/P, como en el circuito secundario C/S.

2.2.1. PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE

Tomando como referencia la estructura 3CP para el lado de medio voltaje y la estructura 3EP para bajo volate, se procede a efectuar los cálculos respectivos para la obtención de la matriz de impedancia por fase $[Z_{abc}]$.

En la Figura 2.4 se observa la configuración 3CP correspondiente al alimentador primario y cuyo calibre será 2AWG 7/1 ACSR, se debe tener en cuenta las distancias existentes entre fases y fase-neutro, para obtener las medidas que corresponden a cada distancia como se puede observar en la Ecuación 2.1.

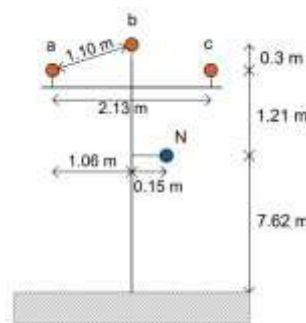


Figura 2.4. Distancias utilizadas en configuración 3CP.

$$\begin{aligned}
 D_{ab} &= \sqrt{1.0668^2 + 0.3048^2} = 1.1094891 \text{ m} = 3.64' \\
 D_{bc} &= \sqrt{1.0668^2 + 0.3048^2} = 1.1094891 \text{ m} = 3.64' \\
 D_{ca} &= 2.13364 \text{ m} = 7' \\
 D_{an} &= \sqrt{1.2192^2 + 1.2192^2} = 1.724209 \text{ m} = 5.6568' \\
 D_{bn} &= \sqrt{0.1524^2 + (1.2192 + 0.3048)^2} = 1.531601 \text{ m} = 5.0249' \\
 D_{cn} &= \sqrt{1.2192^2 + (1.0668 - 0.1524)^2} = 1.524 \text{ m} = 5' \tag{2.1}
 \end{aligned}$$

Aplicando la Ecuación 2.2 que describe la ecuación de Carson para la impedancia propia y como se describió en el anterior capítulo, se obtienen los valores de la diagonal de la matriz de impedancia primitiva.

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.2)$$

Para la fase a:

$$\hat{z}_{aa} = 1.65 + 0.09530 + j 0.12134 \left(\ln \frac{1}{0.00504} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\hat{z}_{aa} = \hat{z}_{bb} = \hat{z}_{cc} = (1.7453 + j 1.604645) \left(\frac{\Omega}{milla} \right)$$

Debido a que en el neutro se tiene el mismo conductor se obtiene:

$$\hat{z}_{nn} = (1.7453 + j 1.604645) \left(\frac{\Omega}{milla} \right)$$

De manera similar para la impedancia mutua, es decir los valores fuera de la diagonal de la matriz primitiva se hace uso de la Ecuación 2.3 que describe la ecuación de Carson para la impedancia mutua.

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.3)$$

De esta forma, se procede a calcular los elementos fuera de la diagonal y que se muestran a continuación para la fase “a” con respecto a las demás fases.

$$\hat{z}_{ab} = 0.0953 + j0.8059 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{ac} = 0.0953 + j0.7266 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{an} = 0.0953 + j0.7524 \quad (\Omega/milla)$$

De manera similar se hace el cálculo para las fases “b”, “c” y para el neutro, obteniendo todos los elementos que conforman la matriz primitiva y que se muestra en la Ecuación 2.4.

$$\hat{z}_{ba} = 0.0953 + j0.8059 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{bc} = 0.0953 + j0.8059 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{bn} = 0.0953 + j0.7668 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{ca} = 0.0953 + j0.7266 \quad (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{cb} = 0.0953 + j0.8059 \quad (\Omega/milla)$$

$$\begin{aligned}\hat{z}_{cn} &= 0.0953 + j0.7674 \text{ } (\Omega/\text{milla}) \\ \hat{z}_{na} &= 0.0953 + j0.7524 \text{ } (\Omega/\text{milla}) \\ \hat{z}_{nb} &= 0.0953 + j0.7668 \text{ } (\Omega/\text{milla}) \\ \hat{z}_{nc} &= 0.0953 + j0.7674 \text{ } (\Omega/\text{milla}) \\ [\hat{Z}_{primitiva}] &= \begin{bmatrix} 1.7453 + j1.6046 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.7524 \\ 0.0953 + j0.8059 & 1.7453 + j1.6046 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7668 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 1.7453 + j1.6046 & 0.0953 + j0.7674 \\ 0.0953 + j0.7524 & 0.0953 + j0.7668 & 0.0953 + j0.7674 & 1.7453 + j1.6046 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}}\right) \quad (2.4)\end{aligned}$$

De esta forma es posible seccionar la matriz primitiva para hacer uso de la reducción de Kron que se muestra en la Ecuación 2.5, es así como se obtiene la matriz de impedancia por fase $[Z_{abc}]$, al aplicar dicha ecuación y que se muestra en la Ecuación 2.6.

$$[\hat{Z}_{ij}] = \begin{bmatrix} 1.7453 + j1.6046 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 \\ 0.0953 + j0.8059 & 1.7453 + j1.6046 & 0.0953 + j0.8059 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 1.7453 + j1.6046 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}}\right)$$

$$[\hat{Z}_{in}] = \begin{bmatrix} 0.0953 + j0.7524 \\ 0.0953 + j0.7668 \\ 0.0953 + j0.7674 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}}\right)$$

$$[\hat{Z}_{nn}] = [1.7453 + j1.6046] \text{ } (\Omega/\text{milla})$$

$$[\hat{Z}_{nj}] = [0.0953 + j0.7524 \quad 0.0953 + j0.7668 \quad 0.0953 + j0.7674] \text{ } (\Omega/\text{milla})$$

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \quad (2.5)$$

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.87732 + j1.4010 & 0.2302 + j0.5988 & 0.2302 + j0.5196 \\ 0.2302 + j0.5988 & 1.8833 + j1.3940 & 0.2332 + j0.5953 \\ 0.2304 + j0.5193 & 0.2334 + j0.5951 & 1.8833 + j1.3939 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}}\right) \quad (2.6)$$

De manera similar para la determinación de los parámetros en bajo voltaje se hace uso de la estructura 3EP y el conductor secundario se utilizará el calibre 4/0 AWG 6/1 ACSR para este ejemplo en particular, como se muestra en la Figura 2.5.

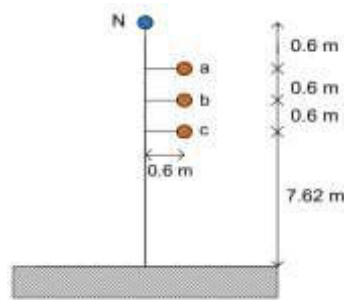


Figura 2.5. Distancias utilizadas en configuración 3EP.

Para bajo voltaje, al igual que en el apartado anterior se parte de las distancias que se observan en la Ecuación 2.7 que muestra la distancia entre fases y la distancia fase-neutro.

$$\begin{aligned}
 Dab &= 0.6096 \text{ m} = 2' \\
 Dbc &= 0.6096 \text{ m} = 2' \\
 Dca &= 1.2192 \text{ m} = 4' \\
 Dan &= \sqrt{2^2 + 2^2} = 0.6621 \text{ m} = 2.8284' \\
 Dbn &= \sqrt{4^2 + 2^2} = 1.3631 \text{ m} = 4.4721' \\
 Dcn &= \sqrt{6^2 + 2^2} = 1.9277 \text{ m} = 6.3245'
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Aplicando la Ecuación 2.8 que describe la ecuación de Carson para la impedancia propia y como se describió en el anterior capítulo, se obtienen los valores de la diagonal de la matriz de impedancia primitiva.

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \tag{2.8}$$

Para la fase a:

$$\begin{aligned}
 \hat{z}_{aa} &= 1.65 + 0.09530 + j 0.12134 \left(\ln \frac{1}{0.00504} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \\
 \hat{z}_{aa} &= \hat{z}_{bb} = \hat{z}_{cc} = (0.6873 + j 1.546476) \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right)
 \end{aligned}$$

Debido a que en el neutro se tiene el mismo conductor se obtiene:

$$\hat{z}_{nn} = (0.6873 + j 1.546476) \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right)$$

De manera similar para la impedancia mutua, es decir los valores fuera de la diagonal de la matriz primitiva se hace uso de la Ecuación 2.9 que describe la ecuación de Carson para la impedancia mutua.

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \tag{2.9}$$

Aplicando la Ecuación 2.9 se obtienen los valores fuera de la diagonal para todas las fases, de esta forma se completa toda la matriz primitiva que se muestra en la Ecuación 2.10.

$$\begin{aligned}
 \hat{z}_{ab} &= 0.0953 + j0.8786 \text{ } (\Omega/\text{milla}) \\
 \hat{z}_{ac} &= 0.0953 + j0.7945 \text{ } (\Omega/\text{milla})
 \end{aligned}$$

$$\hat{z}_{an} = 0.0953 + j0.8366 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{ba} = 0.0953 + j0.8786 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{bc} = 0.0953 + j0.8786 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{bn} = 0.0953 + j0.7809 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{ca} = 0.0953 + j0.7945 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{cb} = 0.0953 + j0.8786 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{cn} = 0.0953 + j0.7389 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{na} = 0.0953 + j0.8366 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{nb} = 0.0953 + j0.7810 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$\hat{z}_{nc} = 0.0953 + j0.7389 \text{ } (\Omega/milla)$$

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 0.6873 + j 1.5464 & 0.0953 + j0.8786 & 0.0953 + j0.7945 & 0.0953 + j0.8366 \\ 0.0953 + j0.8786 & 0.6873 + j 1.5464 & 0.0953 + j0.8786 & 0.0953 + j0.7809 \\ 0.0953 + j0.7945 & 0.0953 + j0.8786 & 0.6873 + j 1.5464 & 0.0953 + j0.7389 \\ 0.0953 + j0.8366 & 0.0953 + j0.7810 & 0.0953 + j0.7389 & 0.6873 + j 1.5464 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.10)$$

Es posible seccionar la matriz primitiva para hacer uso de la reducción de Kron que se muestra en la Ecuación 2.11, es así como se obtiene la matriz de impedancia por fase $[Z_{abc}]$ al aplicar dicha ecuación y que se muestra en la Ecuación 2.12.

$$[\hat{Z}_{ij}] = \begin{bmatrix} 0.6873 + j1.5464 & 0.0953 + j0.8786 & 0.0953 + j0.7945 \\ 0.0953 + j0.8786 & 0.6873 + j1.5464 & 0.0953 + j0.8786 \\ 0.0953 + j0.7945 & 0.0953 + j0.8786 & 0.6873 + j1.5464 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$[\hat{Z}_{in}] = \begin{bmatrix} 0.0953 + j0.8366 \\ 0.0953 + j0.7809 \\ 0.0953 + j0.7389 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$[\hat{Z}_{nn}] = [0.6873 + j1.5464](\Omega/milla)$$

$$[\hat{Z}_{nj}] = [0.0953 + j0.8366 \quad 0.0953 + j0.7810 \quad 0.0953 + j0.7389](\Omega/milla)$$

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \quad (2.11)$$

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.7669 + j1.1351 & 0.1666 + j0.4936 & 0.1603 + j0.4295 \\ 0.1666 + j0.4937 & 0.7511 + j1.1863 & 0.1533 + j0.5371 \\ 0.1603 + j0.4295 & 0.1533 + j0.5371 & 0.7400 + j1.2227 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.12)$$

2.3. ESCALAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN AL VOLTAJE DEL LABORATORIO, UTILIZANDO EL FACTOR EN POR UNIDAD.

Para ejecutar la emulación, en primera instancia se hace uso del sistema por unidad para obtener los valores de resistencia e inductancia a escala, con dichos valores se genera una impedancia, en la cual se medirá la caída de voltaje, cabe resaltar que este análisis se efectúa tanto para el A/P como para el C/S. Los valores de caídas de voltaje en por unidad obtenidos de la emulación serán comparados con las caídas de voltaje conseguidos mediante la simulación.

El modelo a escala del sistema de distribución de 13.8 kV será utilizado en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica, por lo que se toma como referencia los valores nominales de voltaje de 120 V y una potencia de 50 VA, dicha potencia está dentro del rango de los 500 VA que el regulador de voltaje del prototipo posee y que se puede observar en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Regulador de voltaje automático a 120 V AC - 500 VA.

La potencia base de 50 VA que se ha tomado para el prototipo está relacionada con la capacidad de la fuente reguladora de voltaje, que forma parte del sistema de distribución a escala. En cuanto al voltaje base de lado de medio voltaje, será el voltaje de la red estabilizado a 120 V de corriente alterna.

El voltaje base en el secundario del transformador tiene un valor de 60 V de corriente alterna, mismo valor que se obtiene mediante la acción de un transformador reductor. Se considera estos niveles de voltaje para que el usuario que haga uso del prototipo tenga cierto grado de seguridad y, además, con el fin de que los elementos del prototipo no lleguen a ser muy robustos y costosos.

El sistema de distribución a emular tiene un voltaje base de 13.8 kV y una potencia base de 50 kVA. Se desea que el fenómeno que causa la caída de voltaje en el sistema de

distribución real se pueda apreciar de manera similar en el modelo a escala, obviamente las mediciones de los parámetros eléctricos obtenidos en el modelo a escala serán diferentes a las reales, para resolver este problema se iguala los valores del sistema real con los valores del prototipo, aplicando en cada uno de ellos el sistema en por unidad, como se indica en la Ecuación 2.13 [15].

$$Z_{p.u. real 13.8 kV} = Z_{p.u. modelo prototipo}$$

$$\frac{Z_{real}}{Z_{base real}} = \frac{Z_{modelo}}{Z_{base modelo}} \quad (2.13)$$

Con esto queda en evidencia que ambos valores coinciden y será la base de la construcción del prototipo. A continuación, se indica el proceso para el cálculo de los valores en por unidad.

Los valores base para el sistema de distribución de 13.8 kV, se muestran a continuación:

$$S_{base real} = 50 \text{ kVA}$$

$$V_{base real medio voltaje} = 13.8 \text{ kV} \quad ; \quad V_{base real bajo voltaje} = 220 \text{ V}$$

$$Z_{base real medio voltaje} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{50 \text{ kVA}} = 3808.8 \Omega$$

$$Z_{base real bajo voltaje} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{50 \text{ kVA}} = 0.968 \Omega$$

Valores base para el modelo del prototipo:

$$S_{base modelo prototipo} = 50 \text{ VA}$$

$$V_{base prototipo medio voltaje} = 120 \text{ V} \quad ; \quad V_{base real bajo voltaje} = 60 \text{ V}$$

$$Z_{base prototipo medio voltaje} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(120 \text{ V})^2}{50 \text{ VA}} = 288 \Omega$$

$$Z_{base prototipo bajo voltaje} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(60 \text{ V})^2}{50 \text{ VA}} = 72 \Omega$$

De esta manera, las ecuaciones que se usan para obtener los factores de escalamiento para las impedancias del modelo son:

$$Z_{modelo prototipo medio voltaje} = \frac{Z_{base prototipo medio voltaje}}{Z_{base real medio voltaje}} \cdot Z_{real medio voltaje}$$

y,

$$Z_{\text{modelo prototipo bajo voltaje}} = \frac{Z_{\text{base prototipo bajo voltaje}}}{Z_{\text{base real bajo voltaje}}} \cdot Z_{\text{real bajo voltaje}}$$

Los valores numéricos de escalamiento para la impedancia del prototipo, tanto para el lado de medio voltaje como para el lado de bajo voltaje se muestran a continuación en la Ecuación 2.14 y la Ecuación 2.15 respectivamente.

$$Z_{\text{modelo prototipo medio voltaje}} = 0.075614 \cdot Z_{\text{real medio voltaje}} \Omega \quad (2.14)$$

$$Z_{\text{modelo prototipo bajo voltaje}} = 74.38017 \cdot Z_{\text{real bajo voltaje}} \Omega \quad (2.15)$$

2.4. DESARROLLO DE UN CASO ESPECÍFICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA EL DEBIDO ESCALAMIENTO

Partiendo de las matrices de impedancias simuladas en CYMDIST y que se muestran en la Figura 2.7 y Figura 2.8, que han sido corroboradas mediante cálculos con los debidos valores de escalamiento, se propone un escenario específico, en el cual se determina los valores de impedancia para el prototipo en un sistema cuyo alimentador primario es el 2 AWG ACSR y 15 km, que se muestra en la Ecuación 2.16; mientras que para el lado de bajo voltaje o circuito secundario el conductor es el 4/0 AWG ACSR y 200 m, que se muestra en la Ecuación 2.17.

Impedancias equivalentes		A	B	C	
Z [ABC] =		1.877 + j1.401	0.2314 + j0.5711	0.2314 + j0.5711	Ohmios/mi
		0.2314 + j0.5711	1.883 + j1.394	0.2314 + j0.5711	
		0.2314 + j0.5711	0.2314 + j0.5711	1.884 + j1.394	

Figura 2.7. Matriz de impedancia para el alimentador primario obtenida en CYME.

Impedancias equivalentes		A	B	C	
Z [ABC] =		0.767 + j1.135	0.1601 + j0.4868	0.1601 + j0.4868	Ohmios/mi
		0.1601 + j0.4868	0.7511 + j1.186	0.1601 + j0.4868	
		0.1601 + j0.4868	0.1601 + j0.4868	0.7401 + j1.223	

Figura 2.8. Matriz de impedancia para el circuito secundario obtenida en CYME.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.87732 + j1.4010 & 0.2302 + j0.5988 & 0.2302 + j0.5196 \\ 0.2302 + j0.5988 & 1.8833 + j1.3940 & 0.2332 + j0.5953 \\ 0.2304 + j0.5193 & 0.2334 + j0.5951 & 1.8833 + j1.3939 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.16)$$

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.7669 + j1.1351 & 0.1666 + j0.4936 & 0.1603 + j0.4295 \\ 0.1666 + j0.4937 & 0.7511 + j1.1863 & 0.1533 + j0.5371 \\ 0.1603 + j0.4295 & 0.1533 + j0.5371 & 0.7400 + j1.2227 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.17)$$

2.4.1. CÁLCULO DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PROPIA DE CADA CONDUCTOR

Para determinar el valor de resistencia e inductancia se toma un valor representativo de la matriz de impedancias, en este caso el valor perteneciente a la primera fila y columna de la diagonal principal (impedancia propia), tanto para el caso de la matriz de la Ecuación 2.16 y la Ecuación 2.17.

$$Z_{\text{medio voltaje real}} = [1.877 + j1.401] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right)$$

$$Z_{\text{bajo voltaje real}} = [0.7670 + j1.135] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right)$$

De estos valores se obtienen su equivalente en ohmios para la resistencia y en henrios para la inductancia, haciendo uso de las distancias asignadas tanto en bajo como en medio voltaje, se obtiene la Impedancia del conductor 2 AWG ACSR en ohmios y que se muestran en la Ecuación 2.18.

$$Z_{\text{medio voltaje real}} = [1.877 + j1.401] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right)$$

$$Z_{\text{medio voltaje real}} = [1.877 + j1.401] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \cdot \frac{1 \text{ milla}}{1609.34 \text{ m}} \cdot 15000 \text{ m}$$

$$Z_{\text{medio voltaje real}} = [17.4947 + j13.0581] \Omega \quad (2.18)$$

Del valor de reactancia inductiva se obtiene el valor de inductancia L en milihenrios (mH), como se muestra en la Ecuación 2.19.

$$jXL = j2\pi fL$$

$$j13.0581 = j2\pi fL$$

$$j13.0581 = j2\pi fL$$

$$L = 34.6378 \text{ mH} \quad (2.19)$$

De esta manera se determina el valor de la resistencia $R=17.4947 \Omega$ y de inductancia $L=34.6378 \text{ mH}$ perteneciente al calibre del conductor que se está analizando.

De igual forma para el conductor perteneciente al lado de bajo voltaje se hace uso de las ecuaciones antes mencionadas y se obtiene la Impedancia del conductor 4/0 AWG ACSR en ohmios, mostrados en la Ecuación 2.20.

$$\begin{aligned} Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} &= [0.7670 + j1.135] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \\ Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} &= [0.7670 + j1.135] \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \cdot \frac{1 \text{ milla}}{1609.34 \text{ m}} \cdot 200 \text{ m} \\ Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} &= [0.095319 + j0.1410516] \Omega \end{aligned} \quad (2.20)$$

Del valor de reactancia inductiva se obtiene el valor de inductancia L en milihenrios (mH) para un conductor 4/0 AWG ACSR a 200 m, mostrado en la Ecuación 2.21.

$$jXL = j2\pi fL$$

$$j0.1410516 = j2\pi fL$$

$$L = 0.37415 \text{ mH} \quad (2.21)$$

Es así que, se determina el valor de la resistencia $R=0.095319 \Omega$ y de inductancia $L=0.37415 \text{ mH}$ perteneciente al calibre de conductor y distancia en cuestión.

2.4.2. ESCALAMIENTO DE VALORES DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PARA SU POSTERIOR IMPLEMENTACIÓN EN EL PROTOTIPO USANDO EL SISTEMA EN POR UNIDAD

Los valores base para medio voltaje y bajo voltaje para el sistema real de 13.8 kV, se muestran a continuación:

$$S_{\text{Base real}} = 50 \text{ kVA}$$

$$V_{\text{Base medio voltaje real}} = 13800 \text{ V}$$

$$V_{\text{Base bajo voltaje real}} = 220 \text{ V}$$

Una vez asignado los valores base en potencia y voltaje, se procede a determinar los valores base de impedancia en medio voltaje y bajo voltaje del sistema real de 13.8 kV, aplicando la impedancia base del sistema real mostrada en la Ecuación 2.22.

$$Z_{Base\ real} = \frac{V_{Base\ real}^2}{S_{Base\ real}} \quad (2.22)$$

De esta forma se muestra la impedancia base del sistema real en medio voltaje calculada en la Ecuación 2.23, y de manera similar la impedancia base del sistema real en bajo voltaje mostrado en la Ecuación 2.24.

$$Z_{Base\ medio\ voltaje\ real} = \frac{13800^2}{50000} = 3808.8\ \Omega \quad (2.23)$$

$$Z_{Base\ bajo\ voltaje\ real} = \frac{220^2}{50000} = 0.968\ \Omega \quad (2.24)$$

De forma similar se asigna valores base tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje para el sistema prototipo de 120 V, estos valores se muestran a continuación:

$$S_{Base\ prototipo} = 50\ VA$$

$$V_{Base\ medio\ voltaje\ prototipo} = 120\ V$$

$$V_{Base\ bajo\ voltaje\ prototipo} = 60\ V$$

Una vez asignado los valores base en potencia y voltaje, se procede a determinar los valores base de impedancia en medio y bajo voltaje en el sistema prototipo de 120 V, aplicando la Ecuación 2.25 que describe la impedancia base del sistema a escala.

$$Z_{Base\ prototipo} = \frac{V_{Base\ real}^2}{S_{Base\ real}} \quad (2.25)$$

De esta forma se obtiene:

$$Z_{Base\ medio\ voltaje\ prototipo} = \frac{120^2}{50} = 288\ \Omega$$

$$Z_{Base\ bajo\ voltaje\ prototipo} = \frac{60^2}{50} = 72\ \Omega$$

De manera que, las expresiones matemáticas que sirven para determinar el escalamiento de los valores de impedancia para medio y bajo voltaje en el prototipo se muestran a

continuación en la Ecuación 2.26 y que define el factor de escalamiento en la impedancia para medio voltaje.

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = \frac{Z_{\text{Base medio voltaje prototipo}}}{Z_{\text{Base medio voltaje real}}} \cdot Z_{\text{medio voltaje real}} \quad (2.26)$$

Así se obtiene:

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = \frac{288}{3808.8} \cdot Z_{\text{medio voltaje real}}$$

y,

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = \frac{Z_{\text{Base bajo voltaje prototipo}}}{Z_{\text{Base bajo voltaje real}}} \cdot Z_{\text{bajo voltaje real}}$$

La Ecuación 2.27, muestra el factor de escalamiento en la impedancia para bajo voltaje.

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = \frac{72}{0.968} \cdot Z_{\text{bajo voltaje real}} \quad (2.27)$$

Para el caso particular de los conductores en análisis los valores de impedancia del prototipo en el lado de medio voltaje serán:

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = \frac{288}{3808.8} \cdot [17.4947 + j13.0581] \Omega$$

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = [1.3227 + j0.9873] \Omega$$

y, la impedancia del prototipo en el lado de bajo voltaje será:

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = \frac{72}{0.968} \cdot [0.095319 + j0.1410516] \Omega$$

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = [7.0899 + j10.49141] \Omega$$

Finalmente, se determina el valor de resistencia e inductancia a implementar en el prototipo, partiendo de los valores de impedancia de medio voltaje y bajo voltaje del prototipo respectivamente.

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = [1.3227 + j0.9873] \Omega$$

$$R = 1.3227 \Omega \quad y \quad L = 2.6188 \text{ mH}$$

y,

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = [7.0899 + j10.49141] \Omega$$

$$R = 7.0899 \Omega \quad y \quad L = 27.8293 \text{ mH}$$

Las cantidades anteriores de resistencia e inductancia, son los valores equivalentes que se deben implementar en el prototipo físico, en cuanto a características de los conductores y cuya construcción se mostrará más adelante.

2.4.3. ESCALAMIENTO DEL VALOR DE POTENCIA A IMPLEMENTAR EN BASE AL VALOR DE POTENCIA DEL SISTEMA DE 13.8 kV

Para determinar el valor de potencia que debe tener la carga del prototipo, hay que tomar en cuenta la relación de potencias base y la potencia de la carga establecida en el modelo real simulado en CYMDIST, obteniendo el factor de escalamiento para determinar la potencia del prototipo, y cuyo resultado se muestra en la Ecuación 2.28.

$$\begin{aligned}
 S_{prototipo} &= \frac{S_{Base\ prototipo}}{S_{Base\ real}} \cdot S_{real} \\
 P_{prototipo} &= \frac{P_{Base\ prototipo}}{P_{Base\ real}} \cdot P_{real} \\
 P_{prototipo} &= \frac{S_{Base\ prototipo} \cdot \cos \Phi}{S_{Base\ real} \cdot \cos \Phi} \cdot P_{real} \\
 P_{prototipo} &= \frac{50}{50000} \cdot P_{real} \tag{2.28}
 \end{aligned}$$

Donde:

S_{real} : Es el valor de potencia aparente asignada en la simulación del modelo de 13.8 kV

P_{real} : Es el valor de potencia activa asignada en la simulación del modelo de 13.8 kV cuyo valor es 2 kW

$\cos \Phi$: tiene un valor de 0.95 en todos los escenarios

Finalmente, para hallar el valor de potencia activa que se debe implementar en el prototipo se parte de la Ecuación 2.28, y se obtiene la potencia a escalar en el prototipo, mostrada en la Ecuación 2.29.

$$\begin{aligned}
 P_{prototipo} &= \frac{S_b \cdot \cos \Phi}{S_B \cdot \cos \Phi} \cdot P_{real} \\
 P_{prototipo} &= \frac{50}{50000} \cdot 2000 = 2\ W \tag{2.29}
 \end{aligned}$$

2.4.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN POR UNIDAD PARA EL SISTEMA DE 13.8 kV Y EL SISTEMA PROTOTIPO PARA UN CASO PARTICULAR

Para comprobar que los valores de caída de voltaje sean los mismos tanto en el modelo real de 13.8 kV como en el prototipo a escala, se hace uso del software de simulación MATLAB cuyas variables de entrada son los valores de impedancia tanto en el modelo a escala como en el sistema real.

2.4.4.1. Obtención de las caídas de voltaje en el modelo de 13.8 kV

Para obtener los valores de caídas de voltaje en p.u. se parte del valor de impedancia que ofrece CYMDIST mismo que se especifica en las Ecuaciones 2.18 y 2.20 en medio voltaje y bajo voltaje respectivamente, y que se muestran a continuación:

$$Z_{\text{medio voltaje real}} = [17.4947 + j13.0581] \Omega$$

y,

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = [0.095319 + j0.1410516] \Omega$$

Los valores de resistencia e inductancia, que se obtienen de estas ecuaciones serán las variables de entrada para simular el sistema de 13.8 kV, dichas variables se pueden obtener de manera directa a través de un programa que se especifica en el ANEXO D.

Haciendo uso del software de MATLAB, se obtiene las caídas de voltaje en el A/P y C/S. Esto se muestra de forma detallada en la subrutina del ANEXO F.

De esta forma se obtiene los valores de caídas de voltaje en por unidad.

$$\Delta V_{\text{medio voltaje real p.u}} = 0.0002688 \text{ p.u.}$$

y,

$$\Delta V_{\text{bajo voltaje real p.u}} = 0.00765 \text{ p.u.}$$

2.4.4.2. Obtención de las caídas de voltaje en el modelo de prototipo a 120 V

Para obtener los valores de caídas de voltaje en por unidad se parte de los valores de impedancia obtenidos en el escalamiento, dichos valores se muestran en las siguientes ecuaciones analizadas anteriormente, que corresponden a la impedancia de medio y bajo voltaje del prototipo respectivamente, y que se muestran a continuación:

$$Z_{\text{medio voltaje prototipo}} = [1.3227 + j0.9873] \Omega$$

$$Z_{\text{bajo voltaje prototipo}} = [7.0899 + 10.49141j] \Omega$$

Los valores de resistencia e inductancia, que se obtienen de estas ecuaciones serán las variables de entrada para simular el sistema de 120 V en el software MATLAB, y obtener las caídas de voltaje. Estos valores de resistencia e inductancia se muestran de forma detallada en la subrutina del ANEXO D. Obteniendo los valores de caídas de voltaje en por unidad p.u.

$$\Delta V_{\text{medio voltaje prototipo p.u}} = 0.0002611 \text{ p.u}$$

y,

$$\Delta V_{\text{bajo voltaje prototipo en p.u}} = 0.007725 \text{ p.u}$$

De esta forma al comparar las caídas de voltaje en p.u. se puede observar que tienen un valor similar tanto el sistema real como el sistema a escala. Este procedimiento será replicado para cada uno de los calibres y distancias en el prototipo.

2.4.5. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS VALORES DE CORRIENTE EN POR UNIDAD TANTO EN EL SISTEMA SIMULADO DE 13.8 kV COMO EN EL PROTOTIPO

Además de los valores de voltaje analizados, también se considera los valores de corriente presentes en el sistema real de 13.8 kV y en el sistema a escala.

2.4.5.1. Obtención de los valores de corriente en por unidad en el sistema real de 13.8 kV simulado en CYMDIST

Para determinar los valores de corriente en p.u. en el sistema simulado en CYMDIST, el análisis hace uso de la subrutina que se indica en el ANEXO G y se parte de los valores de corriente por fase y los valores base ya establecidos en los cálculos de voltaje.

La Ecuación 2.30 mostrada a continuación define el valor de corriente en por unidad.

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}} \quad (2.30)$$

Los valores de corriente real se adquieren de las tablas de corriente obtenidas mediante el flujo de carga en la simulación de CYMDIST, para el caso se ha tomado la configuración de alimentador primario con una longitud de 10 km y conductor 2 AWG ACSR, mientras que para el circuito secundario se utiliza un conductor 4/0 AWG ACSR y una longitud de 150 m. Para dicho escenario los valores de corriente son:

$$I_{\text{medio voltaje real}} = 0.3216 \text{ A}$$

$$I_{\text{bajo voltaje real}} = 16.7886 \text{ A}$$

Los valores base que se utiliza para este cálculo son:

$$S_{base} = 50 \text{ kVA} ; V_{Base \text{ medio voltaje real}} = 13800 \text{ V} ; V_{Base \text{ bajo voltaje real}} = 220 \text{ V}$$

El valor de la corriente base tanto para medio voltaje como para bajo voltaje se obtiene a partir de la Ecuación 2.31.

$$I_{Base \text{ primario}} = \frac{S_{Base}}{\sqrt{3}V_{Base \text{ primario}}} \quad (2.31)$$

Utilizando los valores base en la Ecuación 2.31 se obtiene los valores de corriente base para ambos niveles de voltaje.

$$I_{Base \text{ medio voltaje real}} = 2.092 \text{ A}$$

$$I_{Base \text{ bajo voltaje real}} = 131.216 \text{ A}$$

Con los valores de corriente base y haciendo uso de la Ecuación 2.30 se obtiene los valores de corriente en por unidad pertenecientes al modelo real de 13.8 kV simulado.

$$I_{pu \text{ medio voltaje real}} = 0.153875 \text{ p. u.}$$

$$I_{pu \text{ bajo voltaje real}} = 0.1279 \text{ p. u.}$$

2.4.5.2. Obtención de valores de corriente en p.u. para el sistema prototipo

Los valores base que se utiliza para este cálculo son:

$$S_{base} = 50 \text{ VA} ; V_{Base \text{ medio voltaje prototipo}} = 120 \text{ V} ; V_{Base \text{ bajo voltaje prototipo}} = 60 \text{ V}$$

Los valores de corriente real para el prototipo se determinan en base a las caídas de voltaje e impedancia presentes en la simulación en MATLAB que se muestra en el ANEXO F, los valores del prototipo real son:

$$I_{\text{medio voltaje real}} = 0.0567 \text{ A}$$

$$I_{\text{bajo voltaje real}} = 0.091246 \text{ A}$$

Aplicando los valores base en la Ecuación 2.31 se obtiene los valores de corriente base para ambos niveles de voltaje en el prototipo.

$$I_{Base \text{ medio voltaje prototipo}} = 0.4167 \text{ A}$$

$$I_{Base \text{ bajo voltaje prototipo}} = 0.833 \text{ A}$$

Con los valores de corriente base y haciendo uso de la Ecuación 2.30 se obtiene los valores de corriente en por unidad pertenecientes al modelo prototipo.

$$I_{pu \text{ medio voltaje real}} = 0.13598 \text{ p.u.}$$

$$I_{pu \text{ medio voltaje real}} = 0.1095479 \text{ p.u.}$$

De esta forma al utilizar el sistema en p.u., se pone en evidencia que los valores de corriente son similares tanto en el sistema de 13.8 kV como en el sistema prototipo.

2.5. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SIMULADO EN MATLAB

El circuito eléctrico equivalente mostrado en la Figura 2.9, muestra el sistema simple del prototipo para un caso de alimentador, calibre y distancia, que está constituido por un valor de resistencia e inductancia en la parte del alimentador primario, y de igual forma para el circuito secundario.

Tanto la parte del primario como el secundario, se une electromagnéticamente a través de un transformador cuya relación de transformación es de 13800/220 V AC; para emular la carga del sistema, se dispone de un arreglo de resistencia e inductancia el cual mediante aproximaciones nos permite ajustar dicha carga para que consuma un valor cercano a los 2 kW y un factor de potencia cercano a 0.95, la subrutina para obtener de manera detallada cada uno de los parámetros de este sistema, se muestran en el ANEXO F.

Las variables que se ingresan en el programa fueron obtenidas en base a cálculos matemáticos, pero de forma general para todos los escenarios se obtienen mediante el programa en MATLAB que se indica en la subrutina del ANEXO D.

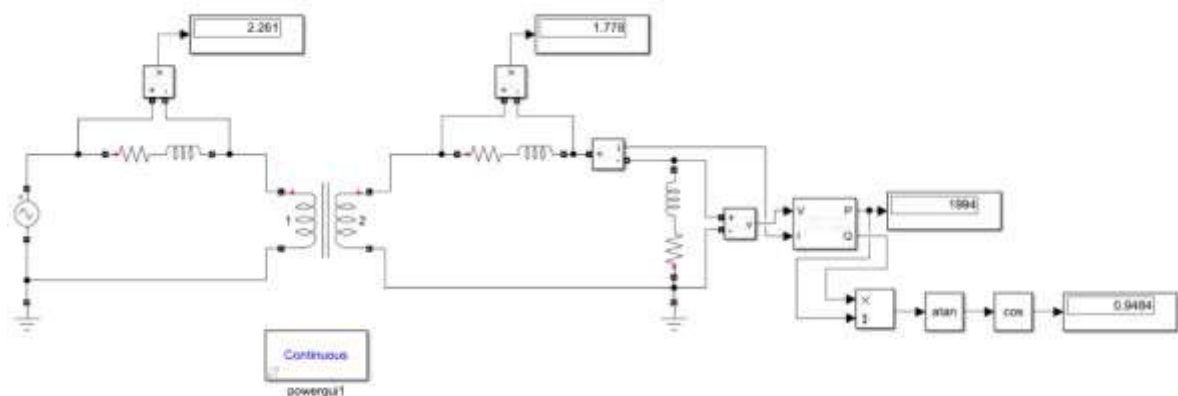


Figura 2.9. Sistema de distribución de 13.8 kV simulado con la herramienta Simulink de MATLAB.

De esta forma se obtienen las caídas de voltaje para los conductores del alimentador primario y circuito secundario en un sistema de 13.8 kV, y así compararlos con los obtenidos en el circuito del prototipo cuyo nivel de voltaje es 120V y que se puede observar en la Figura 2.10.

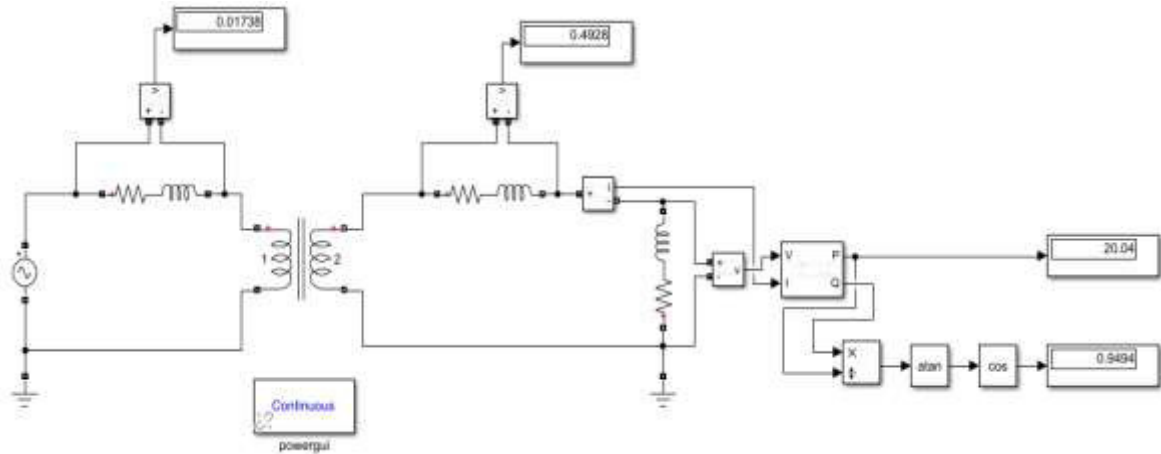


Figura 2.10. Sistema del prototipo a 120 V simulado con la herramienta Simulink de Matlab.

Con ambos circuitos simulados en Simulink de MATLAB, se obtienen los valores de caída de voltaje, como también los valores de corriente. Estos valores llevados a su equivalente en por unidad coinciden tanto en medio voltaje como en bajo voltaje, dichos valores de voltaje y corriente en por unidad se muestran de manera más detallada para cada uno de los escenarios, en el ANEXO H y ANEXO I respectivamente.

Una vez que los valores en por unidad coinciden, se procede a implementar los parámetros que conforman a cada uno de los circuitos según sea el caso, con las debidas consideraciones de escalamiento, factores constructivos y niveles de voltaje apropiados.

2.6. ECUACIONES QUE INTERVIENEN EN LOS CÁLCULOS DEL DEVANADO PRIMARIO Y SECUNDARIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR REAL

Para la construcción del transformador utilizado en el prototipo, se toma como referencia que los transformadores ideales no pueden ser construidos de manera física, de esta forma transformador utilizado en el prototipo será un transformador real y cuyo diagrama de operación se puede mostrar en la Figura 2.11.

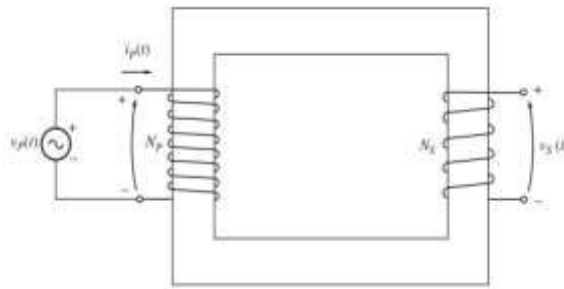


Figura 2.11. Diagrama de un transformador real sin carga en el secundario.

Las características principales de un transformador ideal y las de un transformador real son muy parecidas, sin embargo, para la elaboración de la emulación se hace uso del transformador real, el cual está compuesto por dos bobinas de conductor debidamente enrolladas alrededor del núcleo de material ferromagnético del transformador [16].

El bobinado primario está conectado a una fuente de voltaje alterno mientras que el devanado secundario se encuentra abierto. La Figura 2.12 representa la curva de histéresis de un transformador.

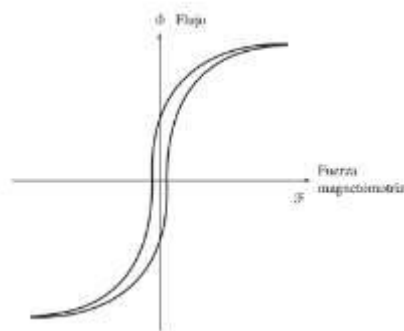


Figura 2.12. Curva de histéresis del transformador.

La operación de un transformador puede basarse en la ley de Faraday, que se describe en la Ecuación 2.32.

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.32)$$

En la Ecuación 2.33, (λ) representa a el flujo concatenado en la bobina mediante el cual se induce el voltaje. De esta manera se describe el flujo concatenado (λ) como la suma del flujo que pasa alrededor de cada vuelta en todas las espiras de la bobina.

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (2.33)$$

Se puede evidenciar que el flujo total concatenado en una bobina no es exactamente $N\Phi$, donde N representa al número de vueltas de la bobina, esto es debido a que el flujo que pasa a través de cada vuelta es diferente una con otra, dado la posición de cada bobina dentro del bobinado total.

Por otra parte, es posible definir el flujo promedio en una bobina y esto se da en función de sus vueltas, si consideramos al flujo total ligado en todas las vueltas de la bobina como (λ) y si existen N vueltas, tenemos que el flujo medio por vuelta está definido por la Ecuación 2.34.

$$\Phi_{promedio} = \frac{\lambda}{N} \quad (2.34)$$

De esta forma la ley de Faraday se puede escribir según la Ecuación 2.35.

$$e_{ind} = N \frac{d\Phi_{promedio}}{dt} \quad (2.35)$$

2.6.1. CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR REAL, PARA LA REDUCCIÓN DEL NIVEL DE VOLTAJE EN EL PROTOTIPO

Para realizar la construcción del transformador real, se toma como referencia algunos conceptos básicos ya conocidos, como por ejemplo la potencia, dimensiones, niveles de voltaje, número alambre a utilizar, entre otros parámetros que se mencionarán a continuación. En la Ecuación 2.36 se puede observar de manera general la igualdad de potencias existente en el transformador y que formarán parte fundamental de su construcción, así también en la Figura 2.13 se observa su principio de funcionamiento.

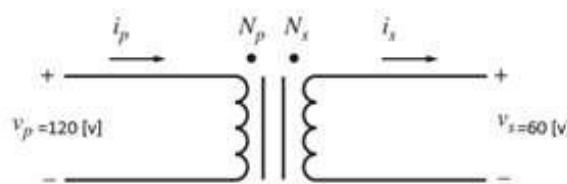


Figura 2.13. Esquema de funcionamiento del transformador real.

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} \\ P_{out} &= V_{out} \cdot I_{out} \\ P_{out} &= 60 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} \\ P_{out} &= 120 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.36)$$

2.6.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO ACORAZADO

Para encontrar de manera aproximada las dimensiones del núcleo acorazado, se realiza un cálculo básico en base al área del transformador y que se describe más adelante, en la Figura 2.14 se puede observar el núcleo acorazado en base a chapas tipo E.

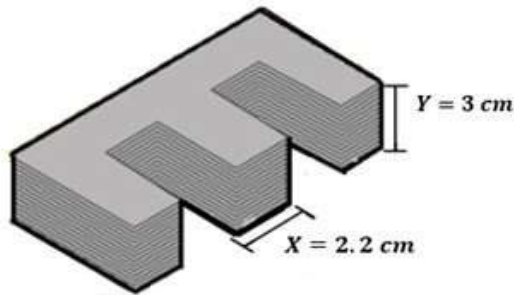


Figura 2.14. Núcleo acorazado en base a chapas tipo E.

En primera instancia se ha tomado las dimensiones del núcleo constituido por chapas de hierro, donde:

Y= Cantidad de chapas E.

X= Ancho del centro de las chapas.

2.6.2.1. Cálculo de la potencia y área del transformador

Para calcular el área aproximada del transformador, se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= X \cdot Y & \text{Potencia} &= \text{Área del núcleo al cuadrado} \\ \text{Área} &= 2.2 \cdot 3 & \text{Potencia} &= 6.6 \text{ cm}^2 \\ \text{Área} &= 6.6 \text{ cm}^2 & \text{Potencia} &= 43.56 \text{ w} \end{aligned}$$

Para determinar el cálculo de la potencia del transformador, se utiliza el método del área al cuadrado, el cual consiste en determinar el área del núcleo del transformador a utilizar y elevar este valor al cuadrado, el resultado de esta operación nos da el valor de la potencia en vatios.

Existen también valores estandarizados de potencia mismos que vienen en función de las dimensiones del núcleo del transformador estos valores se pueden apreciar en la tabla del ANEXO J. En la tabla se presenta también la cantidad de vueltas por voltio que se requiere para cada uno de los núcleos.

2.6.2.2. Calibre de alambre a utilizar

Se hace uso de la Ecuación 2.37 en la cual se asume que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida.

Tomando como referencia los datos de voltaje y corriente, tanto en la entrada como en la salida y considerando que el valor de las potencias de entrada y salida son las mismas, se encuentra el valor de corriente de entrada la cual es la principal incógnita [9].

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} \\ P_{out} &= V_{out} \cdot I_{out} & P_{in} &= V_{in} \cdot I_{in} \\ P_{out} &= 60 V \cdot 2 A & P_{in} &= 120 V \cdot I_{in} \\ P_{out} &= 120 W & 120 W &= 120 V \cdot I_{in} \\ I_{in} &= \frac{120 W}{120 V} \\ I_{in} &= 1 A \end{aligned} \tag{2.37}$$

De esta forma se puede saber el calibre de alambre a utilizar en el bobinado, en el lado del primario se tiene una corriente de 1 A y en el secundario una corriente de 2 A, por lo que se utiliza el calibre 23 y 20 respectivamente, tomando como referencia la tabla del ANEXO K.

El transformador a implementar será monofásico, cuyo nivel de voltaje a la entrada del primario es 120 V y el nivel de voltaje a la salida en el secundario será 60 V, el núcleo es de tipo acorazado en base a chapas tipo E y tipo I de hierro, como se puede apreciar en la Figura 2.15.



Figura 2.15. Núcleo acorazado en base a chapas tipo E utilizado en el prototipo.

2.7. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES DE BOBINAS NÚCLEO TOROIDAL

Para realizar la emulación del sistema de distribución a escala, uno de los elementos más importantes es la inductancia que posee un conductor, misma que se obtiene haciendo uso de núcleos de ferrita, y realizando el bobinado pertinente, permitiendo obtener valores de inductancia en el orden de los milihenrios (mH) y cuyo estudio se muestra de forma detallada a continuación.

2.7.1. INDUCTANCIA APROXIMADA DE UN TOROIDE

Para realizar las inductancias del prototipo, se toma como referencia el uso de toroides que se pueden obtener de manera sencilla en el mercado, para esto se hace uso de la Ley de Ampere que permite obtener el campo magnético en el interior de un toroide, dicha ley describe que la corriente que se aprecia en la línea punteada de la Figura 2.16 es igual a el número de vueltas multiplicado por la intensidad de corriente en cada bucle [17].

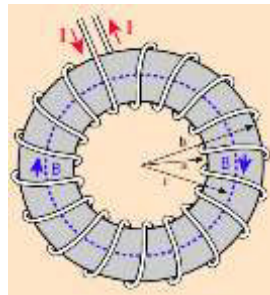


Figura 2.16. Campo magnético en la línea central del núcleo toroidal [17].

Seguido de esto, la ley de Ampere indica que se proporciona el campo magnético en un toroide y de forma específica en su línea central, la Ecuación 2.38 muestra la interacción del campo magnético en un toroide.

$$B2\pi r = \mu NI$$

$$B = \frac{\mu NI}{2\pi r} \quad (2.38)$$

Donde:

B : campo magnético

μ : constante de permeabilidad magnética

N : número de espiras

I : intensidad de la corriente

r : radio a la línea punteada

De esta forma la inductancia se puede obtener de manera similar con la que se calcula cualquier bobina de cable. La manera de aplicar la ley de Faraday para el cálculo del voltaje inducido en el toroide se muestra en la Ecuación 2.39.

$$\begin{aligned}Fem &= -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\Fem &= -NA \frac{\Delta B}{\Delta t}\end{aligned}\tag{2.39}$$

De la ley de Faraday surge que la inductancia L se puede definir en función de la fuerza electromotriz misma que se opone a un cambio determinado en la corriente, como se puede observar en la Ecuación 2.40 que muestra la fuerza electromotriz en función de la inductancia.

$$Fem = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}\tag{2.40}$$

En base a las ecuaciones antes mencionadas se logra determinar una expresión simplificada para determinar el valor de la inductancia en un núcleo toroidal que se indica en la Ecuación 2.41.

$$L = \frac{\Delta\mu N^2 A}{2\pi r}\tag{2.41}$$

Donde:

L : inductancia en el núcleo toroidal

μ : es la permeabilidad

N : número de vueltas del conductor alrededor del toroide

A : área de la sección transversal

r : radio del toroide a la línea central

En base a la teoría y ecuaciones antes mencionadas, se logra fabricar inductancias con núcleos toroidales para los valores requeridos en medio voltaje y que se muestran en la Figura 2.17, en cada uno de los conductores utilizados en el prototipo.



Figura 2.17. Inductancia construida en base a un núcleo toroidal.

2.7.2. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES DE BOBINAS CON NÚCLEO ACORAZADO DE HIERRO

En las bobinas con núcleo de hierro a diferencia de las bobinas núcleo de aire, existe una serie de pérdidas en el circuito magnético, esto hace que el factor de potencia sea nulo. Haciendo que las bobinas con núcleo de hierro sean representadas como un arreglo en paralelo de resistencia e inductancia como se indica en la Figura 2.18 [18].

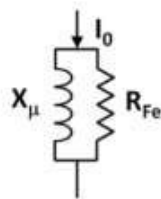


Figura 2.18. Circuito equivalente de una bobina con núcleo de hierro.

La resistencia del circuito equivalente se obtiene a partir de la potencia activa consumida cuando se aplica voltaje a la bobina y que se muestran en la Ecuación 2.42.

$$R_{equivalente} = \frac{V_{aplicado}^2}{P_{activa}} \quad (2.42)$$

Para el cálculo del factor de potencia en la bobina se usa el cociente entre potencia activa y potencia aparente, como se muestra en la Ecuación 2.43.

$$\cos \phi = \frac{P_{activa}}{V_{aplicado} \cdot I_{aplicada}} \quad (2.43)$$

Para obtener la inductancia del circuito equivalente se divide el voltaje aplicado para la corriente que circula por dicha inductancia, como se puede observar en la Ecuación 2.44 que muestra la reactancia inductiva del circuito equivalente.

$$X_L = \frac{V_{aplicado}}{I_{aplicada} \cdot \text{sen } \Phi}$$
$$X_L = 2\pi fL \quad (2.44)$$

Donde:

Φ : desfase existente entre el voltaje aplicado y la corriente que circula por la bobina.

2.7.2.1. Flujo magnético creado al aplicar voltaje en una bobina

De acuerdo con la teoría de transformadores y circuitos magnéticos, cuando se alimenta con un voltaje a la bobina, la ley de Faraday establece que se crea un flujo magnético, como se precia en la Ecuación 2.45.

$$V_{aplicado} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.45)$$

En el caso de aplicar un voltaje de corriente alterna de forma sinusoidal, si se toma en cuenta la relación existente entre el flujo y la inducción magnética en cuanto a un circuito ferromagnético, se puede calcular según la Ecuación 2.46 el voltaje aplicado en función del flujo magnético.

$$V_{aplicado} = 4.44fN\Phi \quad (2.46)$$

2.7.2.2. Inductancia de la bobina de núcleo acorazado

El valor de inductancia o también llamado coeficiente de autoinducción en una bobina de núcleo acorazado se determina según la Ecuación 2.47 [18].

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (2.47)$$

Donde:

R es el valor de la reluctancia del circuito magnético, que depende de las dimensiones geométricas del circuito y de la permeabilidad μ del material del cual está constituido.

La reluctancia se describe según la Ecuación 2.48.

$$R_{reluctancia} = \frac{L}{\mu * S} \quad (2.48)$$

En las bobinas de núcleo de hierro el valor de la permeabilidad resulta del grado de saturación del circuito magnético, por ende, de la cantidad de inducción en dicho circuito.

En base a la teoría y ecuaciones antes mencionadas, se logra fabricar inductancias con núcleos acorazados para los valores requeridos en cada uno de los conductores utilizados en el prototipo en la parte de bajo voltaje, el núcleo que forma parte del prototipo se muestra en la Figura 2.19.



Figura 2.19. Inductancia construida en base a un núcleo acorazado de hierro.

2.8. ANÁLISIS DE LAS RESISTENCIAS DEL CONDUCTOR UTILIZADAS EN LA EMULACIÓN

Para realizar el modelo a escala del sistema de 13.8 kV es bien conocido que los factores que intervienen en la impedancia serán, la resistencia (R) y reactancia Inductiva (XL) como se mencionó en el capítulo anterior, dado que el conductor une eléctricamente varias secciones de un circuito y en el caso de la emulación del sistema de 13.8 kV es el que conforma el alimentador primario y el circuito secundario, dicho conductor estará compuesto por la parte resistiva y que será determinada a partir de varias mediciones, las cuales permitieron comprobar que para trabajar en corriente alterna la cantidad de calor disipada por las resistencias en el prototipo podría ser muy elevada, es por esto que a continuación se describe el fenómeno de aumento de la resistencia con el aumento de la temperatura.

En la ecuación general de la resistencia del conductor mostrada en la Ecuación 2.49 se observa que dependerá de la longitud que posea, su sección transversal, su temperatura y el material del cual esté constituido dentro de un ambiente controlado a 20°C [19].

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.49)$$

Donde:

R : resistencia del conductor

ρ : resistividad del material

l : longitud del conductor.

S : sección del conductor en m^2

Los valores de resistividad del material se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resistividad de los diversos materiales [19].

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Cobre	1.70×10^{-8}
Plata	1.55×10^{-8}
Aluminio	2.82×10^{-8}
Oro	2.22×10^{-8}
Wolframio	5.65×10^{-8}
Níquel	6.40×10^{-8}
Hierro	8.90×10^{-8}
Platino	10.60×10^{-8}
Estaño	11.50×10^{-8}
Acero inoxidable	72×10^{-8}
Grafito	60×10^{-8}

2.8.1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTENCIA

Para realizar la implementación de las resistencias en el modelo a escala del sistema de distribución de 13.8 kV, se toma en cuenta la influencia de la temperatura a través de las resistencias, dado el fenómeno que poseen la mayoría de los metales, el cual es aumentar su resistencia al aumentar su temperatura, dicha relación se describe en la Ecuación 2.50 que muestra la variación de la resistencia con la temperatura [19].

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (2.50)$$

Donde:

R_T : resistencia a la temperatura final T

R_0 : resistencia a la temperatura inicial T_0

α : coeficiente de temperatura

T : temperatura final

T_0 : temperatura inicial

2.8.2. POTENCIA DISIPADA POR LA RESISTENCIA

Dado que la potencia disipada por la resistencia es proporcional a la corriente y el voltaje que atraviesa por sus terminales, se puede establecer una relación mostrada en la Ecuación 2.51 y la Ecuación 2.52 que demuestra la aplicación de la ley de Joule en la potencia disipada en función de su resistencia [19].

$$P = V \cdot I \quad (2.51)$$

$$P = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R} \quad (2.52)$$

La ley de Joule establece que existe un calor generado por la corriente al pasar por cierta resistencia debido a su oposición natural, de manera más general se puede decir que dicho aumento de resistencia y disipación de calor se deben a las fuerzas del rozamiento que impiden que los electrones se muevan libremente en el conductor.

2.8.3. RESISTENCIAS UTILIZADAS EN EL SISTEMA A ESCALA DE 13.8 KV

En el sistema a escala de 13.8 kV se utilizará como alimentación una fuente de 120 V de corriente alterna, dicho voltaje será obtenido a partir de un regulador de voltaje, la potencia que disiparán las resistencias del sistema a escala serán acorde al valor de corriente de 1 amperio o menores a este valor de acuerdo con la carga que se dispone en el sistema a escala, es por esto que las resistencias tendrán valores de entre 100 y 1000 ohm, y aplicando la Ecuación 2.51 se puede observar que la potencia que disiparán se acercará a los 50 W, en la Figura 2.20 se puede observar resistencias de diversas potencias.

Estas resistencias serán parte fundamental de la construcción del sistema a escala, y formarán parte tanto del alimentador primario como del circuito secundario, y están debidamente escaladas al sistema de 13.8 kV.



Figura 2.20. Resistencias de diversas potencias.

2.9. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO

Para la construcción del módulo o prototipo que emula el sistema de distribución de 13.8 kV se lleva a cabo la implementación de distintos elementos que conforman el sistema a escala como tal, la construcción de estos elementos se efectúa de manera sistemática y en algunas ocasiones de manera empírica para facilitar su implementación, la obtención del prototipo final se hizo en base a varios ensayos, simulaciones, realización de circuitos en software especializado y sobre todo planteando un objetivo en específico, en el cual se sustenta el presente trabajo de titulación.

A continuación, se muestra la construcción de los elementos principales que forman parte del sistema a escala.

2.9.1. CONSTRUCCIÓN DEL INDUCTÓMETRO Y RESISTÓMETRO

Debido a que el prototipo a escala posee como parámetros principales los valores de resistencia e inductancia, y estos forman parte de la impedancia característica del alimentador primario y circuito secundario, donde influye directamente el calibre de conductor y distancia. Es adecuado construir un equipo de medición permita obtener el valor de resistencia e inductancia de manera rápida y sobre todo se acople al tamaño del prototipo [20].

Como se puede observar en la Figura 2.21, se tiene el esquema básico de un sistema inductómetro-resistómetro obtenido de las librerías y circuitos de Arduino que están disponibles en internet.

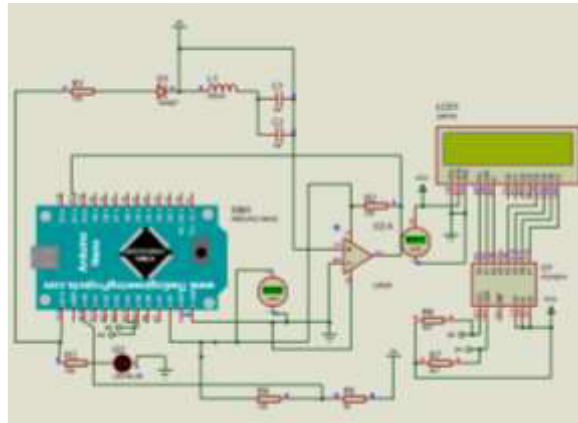


Figura 2.21. Esquema en proteus del inductómetro y resistómetro.

Dicho sistema será la base para la construcción del proyecto, este medidor realizará las principales mediciones de los elementos que componen las diversas impedancias del circuito, aun así, es necesario comprobar dichos valores de resistencia e inductancia con un medidor real, es por esto que se utiliza un inductómetro y resistómetro comercial para comparar ambas mediciones como se especificó en el capítulo anterior.

2.9.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL INDUCTÓMETRO Y RESISTÓMETRO

Para realizar la implementación del inductómetro y resistómetro se hace uso de un microcontrolador Arduino Nano, dicho inductómetro permitirá medir un valor de inductancia entre $80 \mu H$ y $30000 \mu H$.

Para llevar a cabo la medición de la inductancia, el circuito debe estar compuesto de un inductor en paralelo con un capacitor formando un circuito LC, de esta forma se encontrará la frecuencia resonante a la cual oscila el circuito, dicho dato es comparado por medio de un LM339 el cual actúa a manera de resistencias en “pull up” para los pines lógicos de entrada de Arduino, dicho microcontrolador asimila el voltaje cuando el circuito entra en resonancia, permitiendo obtener la frecuencia de resonancia y mediante las siguientes ecuaciones obtener el valor de la inductancia correspondiente al circuito, el valor de inductancia en función de su frecuencia de resonancia se muestra en la Ecuación 2.53 [20].

$$F_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F_R^2 C} \quad (2.53)$$

Para la elaboración del resistómetro, básicamente se construye un divisor de voltaje que, en base a una resistencia tomada como referencia, permite obtener el valor de resistencia acorde al voltaje sentido por el microcontrolador Arduino por medio de una de sus entradas lógicas, y que posteriormente transformará a valores de ohmios para determinar la resistencia, el código en Arduino correspondiente a este medidor se encuentra disponible digitalmente en el ANEXO L.

El inductómetro - resistómetro podrá obtener los valores de resistencia en ohmios y el valor de la inductancia en microhenrios (μH), al obtener las mediciones por medio de borneras localizadas en los extremos, se puede determinar estos valores de manera eficaz.

2.9.3. CONSTRUCCIÓN DE PLACAS Y CABLEADO

Para la construcción de las placas que representan el alimentar primario y el circuito secundario, se procede a hacer un esquemático con la ayuda del software PROTEUS haciendo uso de las herramientas ISIS y ARES, se elabora el esquemático y el modelado en 3D de las placas finales y cuyas capturas y fotografías se observan en el ANEXO M. El diseño de las placas en ARES muestra el circuito de manera reducida, cada una de estas placas llevará borneras que permitirá la fácil extracción tanto de resistencias e inductancias que permitirá colocar cada uno de los casos de alimentadores según sea el caso tanto en el alimentador primario y circuito secundario.

Las placas del prototipo utilizan borneras para cada uno de los casos del alimentador primario que se requieran, en dichas borneras se podrá poner valores variables de resistencia e inductancia según sea el caso, el calibre y la distancia correspondiente. En la Figura 2.22 se puede observar el resultado final de las placas.



Figura 2.22. Modelo físico de la placa del alimentador primario del sistema de distribución

Para la elaboración del cableado tomamos como referencia cable numero 14 AWG sólido de cobre, que estará situado a una distancia aproximada de 50 cm de la placa para de esta forma poder manipular el cable dentro del prototipo y así no resulte difícil su movimiento por medio de cables de conexión.

2.9.4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE INDUCTANCIAS Y RESISTENCIAS

En la Figura 2.20 se mostró los diversos elementos resistivos utilizados en el prototipo, dichas resistencias debido a su naturaleza y debido a que serán utilizadas directamente con el voltaje de la red, deberán soportar una gran cantidad de potencia disipada, debido a que las resistencias utilizadas en el prototipo serán de 100W para el lado del alimentador primario, y resistencias de hasta 10W el lado del circuito secundario con una precisión $\pm 5\%$.

2.9.5. CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO

Debido a que el modelo a escala del sistema de 13.8 kV está distribuido de acuerdo con sus principales componentes como el alimentador primario, transformador y circuito secundario, resulta pertinente realizar un tablero en el que la forma de manipulación sea fácil, versátil y cómoda para la persona que haga uso del mismo.

Para la elaboración, se utilizó un bosquejo en 3D para implementar el modelo en madera como se puede observar en la Figura 2.23, el cual permite tomar en consideración las medidas necesarias para hacer del módulo una herramienta útil y ergonómica para el uso en el laboratorio.



Figura 2.23. Modelo en 3D de la mesa que conforma el prototipo.

Es así como se procede a elaborar el módulo físico utilizando en su mayoría madera de ciprés, colorado y tríplex, para finalmente obtener el tablero de conexionado principal y el soporte que albergará todos los elementos eléctricos, es así que en la Figura 2.23 en dónde se puede apreciar el módulo de madera que será utilizado como base para el uso en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica.

2.9.6. SISTEMA DE IDENTIFICADOR DE CASOS

La emulación del sistema de distribución a 13.8 kV es construido de tal forma que puede asemejarse a un sistema de distribución real, sus componentes resistivos e inductivos estarán debidamente escalados para emular la caída de voltaje en cada una de sus impedancias, tanto alimentador primario como en el circuito secundario al variar la distancia y calibre del conductor. Sin embargo, la caída de voltaje en el circuito a escala es muy pequeña en relación con el sistema de distribución real, esto puede ser un gran problema al momento de detectar en que caso y en que calibre en específico se encuentra conectado el sistema a escala. A continuación, se muestra de manera resumida el sistema utilizado para detectar el caso de A/P y C/S en el que se encontrará conectado el sistema a escala de 13.8 kV.

2.9.6.1. Diseño del circuito de detección de casos

La diferencia de caída de voltaje que existe entre un caso y otro es mínimo, en el orden de algunos voltios, es así, que se diseña un circuito que tiene dos principales objetivos, el primero obtener un circuito que detecte en que línea del prototipo a escala se encuentra conectado; y, el segundo objetivo es hacer una demostración visual, a través de un led, del esquema de este circuito como se puede observar en la Figura 2.24.

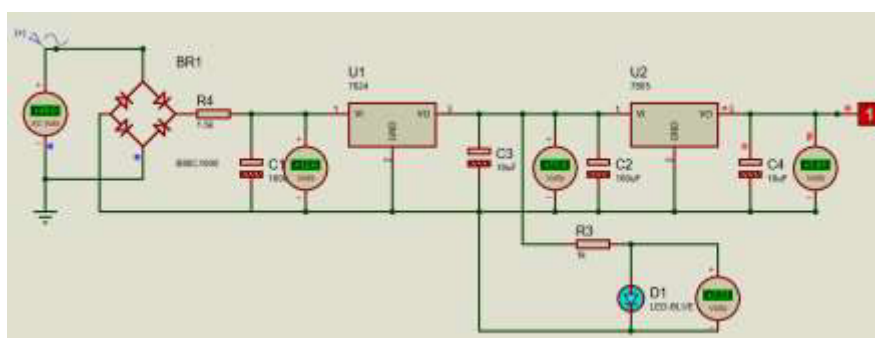


Figura 2.24. Circuito esquemático de detección de casos en PROTEUS.

Dicho esquema muestra las siguientes etapas que se detallan de una mejor manera a continuación:

Rectificación de voltaje: Esta etapa recibe el voltaje AC de la impedancia del A/P o C/S, este voltaje y en base a pruebas se determinó que no superará los 40 V, pasando a través

de un rectificador comercial, el Datasheet del mismo se menciona en el ANEXO N, la rectificación será primordial dado que en posteriores etapas se utilizará voltaje DC.

Regulación de voltaje DC: Se toma el voltaje DC rectificado, que ingresará a un regulador de voltaje LM7824 y cuyo voltaje de entrada “Vin” estará en el rango de 22 a 40 VDC, como se puede verificar en el ANEXO N, este regulador permite tener un voltaje DC estable en su salida “Vout” de 24 VDC.

Detección del circuito mediante un led: Por medio de un divisor de voltaje realizado con resistencias, se energiza un led que se encenderá cuando detecte una línea en funcionamiento en el sistema de distribución a escala. Los leds serán de color rojo para el lado del alimentador primario y de color azul para la parte del circuito secundario. En el caso de que el circuito se encuentre sin energía, dicha rectificación y demás etapas no entrarán en funcionamiento por lo que el led permanecerá apagado.

Envío de un bit lógico al circuito de control: Finalmente, se reduce el voltaje a 5 VDC por medio de un LM7805 y cuyas características se muestran en el ANEXO N, para de esta forma enviar un 1 o 0 lógico a un microprocesador, de esta forma se puede diferenciar con precisión entre cada caso construido, y que será direccionado inalámbricamente a su respectivo valor de corriente y voltaje en por unidad, y a su caída de voltaje en CYMDIST.

2.9.7. CONSTRUCCIÓN FÍSICA DEL CIRCUITO DETECTOR DE CASOS

Para realizar la construcción de la placa, se utiliza el circuito esquemático realizado en el software PROTEUS, adicionalmente se hace uso de la herramienta incorporada llamada Ares, la que permitirá interactuar de manera tridimensional con la placa como se puede observar en la Figura 2.25.

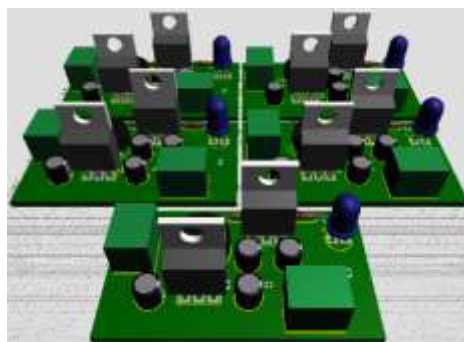


Figura 2.25. Modelo de la placa en 3D del circuito detector de casos

Una vez realizado el diseño tridimensional de la placa que formará parte del circuito detector de casos de la emulación del sistema de distribución de 13.8 kV, se procede a realizar el ensamblado de la misma que consiste en poner cada uno de los elementos como

capacitores, terminales, resistencias, leds y reguladores de voltaje LM78XX de tal forma que puedan ser ubicadas sin inconveniente en la parte interna del módulo. El led indicador estará unido al tablero principal del modelo mediante cable de timbre extenso, las pistas serán reforzadas con estaño líquido para evitar su corrosión o deterioro con el pasar de los años.

Las resistencias al ser de potencia y por el efecto Joule que se genera en las mismas, están ubicadas estratégicamente sobre la placa para así evitar el contacto con elementos que puedan ser inflamables o que causen algún cortocircuito. En la Figura 2.26 se puede observar el resultado final de la placa que formará parte del circuito de detección de casos en la emulación del sistema de 13.8 kV.

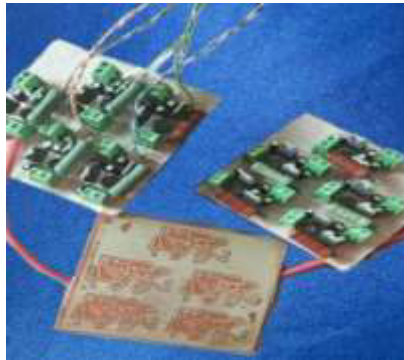


Figura 2.26. Placa utilizada en el sistema de distribución a escala de 13.8 kV.

2.9.8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VOLTÍMETRO INALÁMBRICO

Un sistema inalámbrico desarrollado para medir voltaje consiste en integrar varios subsistemas tales como: un conversor análogo digital, un módulo de transmisión serial, un módulo de transmisión Wi-Fi y un microprocesador. Todos estos están integrados a una placa de desarrollo ESP32, misma que se muestra en la Figura 2.27.

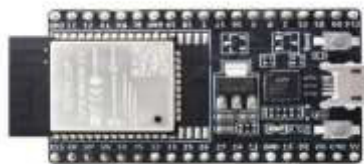


Figura 2.27. Placa de desarrollo ESP32 [21].

Además, se tiene elementos físicos externos a la placa de desarrollo tales como: conversor de nivel lógico, un transformador reductor de corriente alterna, un coprocesador lógico, leds, resistencias, reguladores de voltaje, cables de conexión, y que se mostrarán más adelante.

Toda esta circuitería combinada y funcional nos permite la medición y trasmisión de voltaje desde el prototipo hacia un computador, mismo que posee el programa que procesa los datos recopilados y los muestra en pantalla a través de una interfaz gráfica.

2.9.8.1. Implementación de la circuitería que conforma la placa de desarrollo

Se interconectan dos módulos ESP32 a través de sus puertos seriales, el módulo uno se conectará al transformador reductor ZMPT101B, el segundo módulo a la red inalámbrica en la que se encuentra vinculado el computador, además este módulo se conecta al microcontrolador ATMEGA 164P por medio de comunicación serial, el elemento mencionado censa cada uno de los bits transmitidos desde el circuito de control e identifica el caso que se encuentra energizado en el módulo de emulación de 13.8 kV. La placa que integra estos elementos se muestra en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Placa de desarrollo completa

2.9.8.2. Conexión de la placa de desarrollo al computador para la debida codificación y programación

Se conecta el puerto MICRO USB del módulo ESP32 al puerto USB del computador, con el fin de que tanto la placa de desarrollo como el computador se encuentren interconectados, y de este modo se pueda realizar la programación.

En cuanto a la codificación se refiere se inicia por escribir la parte del código referente a la lectura de voltaje, utilizando el puerto análogo número cero, esta medida será enviada a través del puerto serial al módulo dos.

Posteriormente se codificará la función del microcontrolador ATMEGA164P, la cual consiste en examinar el estado lógico de los leds piloto conectados a las borneras del tablero, la función de los leds es identificar el estado de conexión de cada escenario tanto en medio voltaje como en bajo voltaje, misma información que se transmitirá a través del puerto serial conectado al módulo dos.

Finalmente se codificará el módulo dos, cuya función es la de levantar un servidor web, el cual tienen la función de recibir peticiones de tipo GET, iniciando así un servicio web con una API REST, mismo que recibirá las peticiones y devolverá los datos de voltaje. Estos estados serán devueltos como respuestas a las peticiones GET, y estas a su vez son procesadas por el programa almacenado en el computador.

El programa almacenado en el computador se encargará de procesar los datos solicitados al módulo dos, esto a través peticiones GET, con esto se consigue obtener los valores de medida y estado, mismos que sirven para procesar y mostrar los valores de medición y características del conductor en cada escenario mediante una interfaz gráfica amigable con el usuario.

La programación y el esquemático de la placa de desarrollo ESP32 se muestra de manera detallada en la subrutina del ANEXO O y la programación de este se muestra digitalmente en el ANEXO P.

2.9.8.3. Pruebas de medición inalámbrica de voltaje, y recepción en el computador

Se procede a abrir la interfaz web para obtener los resultados de medición del módulo que está enviando los datos de voltaje constantemente, y luego se compara los valores que se muestran en el computador con los valores medidos por un voltímetro externo. Esto con el fin de comparar ambas mediciones y posteriormente realizar una corrección.

2.9.8.4. Ajuste de error de medición con respecto al voltaje de referencia en el conversor análogo digital

Entre los valores que mide el voltímetro inalámbrico y el voltímetro externo existe un pequeño margen de error debido a la precisión de voltaje de referencia en el conversor análogo digital del módulo de lectura de voltaje.

Dicho error se compensa a través de un ajuste en el tiempo de muestreo de la medida de voltaje en el módulo dos y con esto se llega a valores más precisos.

2.9.8.5. Visualización de resultados en uno o más computadores

Para la visualización de resultados, abrimos una ventana del navegador de un computador e introducimos la dirección en la que se encuentra trabajando la interfaz web de visualización. Misma que nos mostrará los parámetros del conductor, distancia, voltaje y corriente tanto en el lado del alimentador primario como en el circuito secundario, todos estos resultados se pueden visualizar en la interfaz de la Figura 2.29.

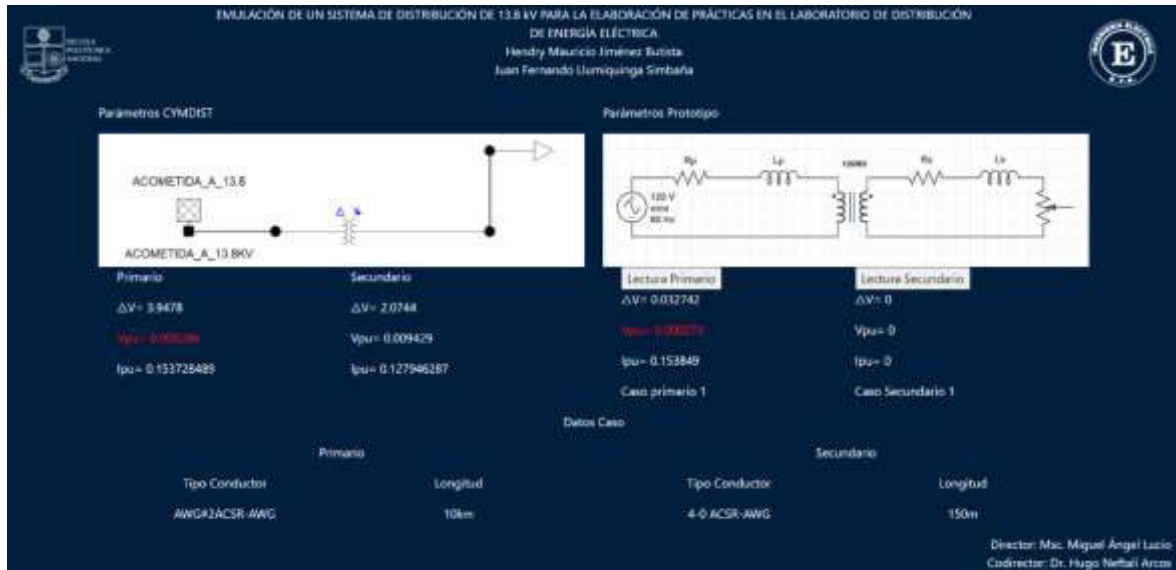


Figura 2.29. Interfaz de resultados del sistema de 13.8kV a escala

2.9.9. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Debido a que la potencia disipada por las resistencias en forma de calor es alta, surge un problema en la elaboración de las placas que conforman el A/P y el C/S, dicha potencia disipada en forma de calor puede generar altas temperaturas en elementos cercanos a las mismas, como se detalló anteriormente el armazón del módulo es casi en su totalidad de madera por lo que se debe mitigar las altas temperaturas de algún modo.

Es así, que se procede a diseñar un sistema de refrigeración, básicamente el elemento principal de dicho sistema es un ventilador, que direccionará aire frío hacia las diversas resistencias que conforman las placas y por convección se enfriará el sistema a escala de distribución, el sistema se muestra en la Figura 2.30.



Figura 2.30. Sistema de refrigeración utilizado en el sistema a escala

La forma en que opera el sistema de enfriamiento es en principio debido a la convección de aire existente entre la resistencia y el medio ambiente, es decir la función principal del sistema es enfriar el aire y a través de ductos llegar a un punto en específico (resistencias),

y de esta forma extraer el calor producido por la disipación de potencia y enviarlo fuera del módulo a través de un orificio para que esté en constante refrigeración, el enfriamiento de manera general se basa en la ley de enfriamiento de Newton.

La ley de enfriamiento de Newton establece que si existe una diferencia de temperaturas en un cuerpo (para el caso del prototipo serán las resistencias cerámicas) y el medio ambiente que en este caso estará constantemente enfriando (mediante un ventilador) y dicha diferencia de temperatura no es tan grande, el calor transferido desde la resistencia al medio ambiente por medio de convección de aire, es cercano o proporcional a la diferencia de temperatura existente entre ambos, dicha relación se muestra en la Ecuación 2.54 que describe la ecuación de enfriamiento de Newton.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S(T - T_a) \quad (2.54)$$

Donde:

$\frac{dQ}{dt}$: variación del calor dQ en un intervalo de tiempo dt

α : coeficiente de intercambio de calor

S: área o Superficie de trabajo

T: temperatura del cuerpo

T_a : temperatura del medio ambiente

2.10. CONEXIÓN DE LOS DIFERENTES CASOS EN EL TABLERO DE CONEXIÓN

Para detallar de una mejor manera el módulo final, se realiza un gráfico de la interfaz física a escala que se puede observar en la Figura 2.31, dicha interfaz servirá para que el usuario pueda hacer libre uso del sistema a escala.

El módulo está compuesto por una fuente de voltaje, borneras de interconexión de alimentador primario y circuito secundario, transformador, multímetro inalámbrico, foco que representa la carga y una toma de corriente.

El proceso de energización del módulo, la caracterización de cada uno de los elementos y la lógica interconexión de cada uno de ellos se encuentra detallado en el MANUAL DE USUARIO presentado digitalmente en el ANEXO W.

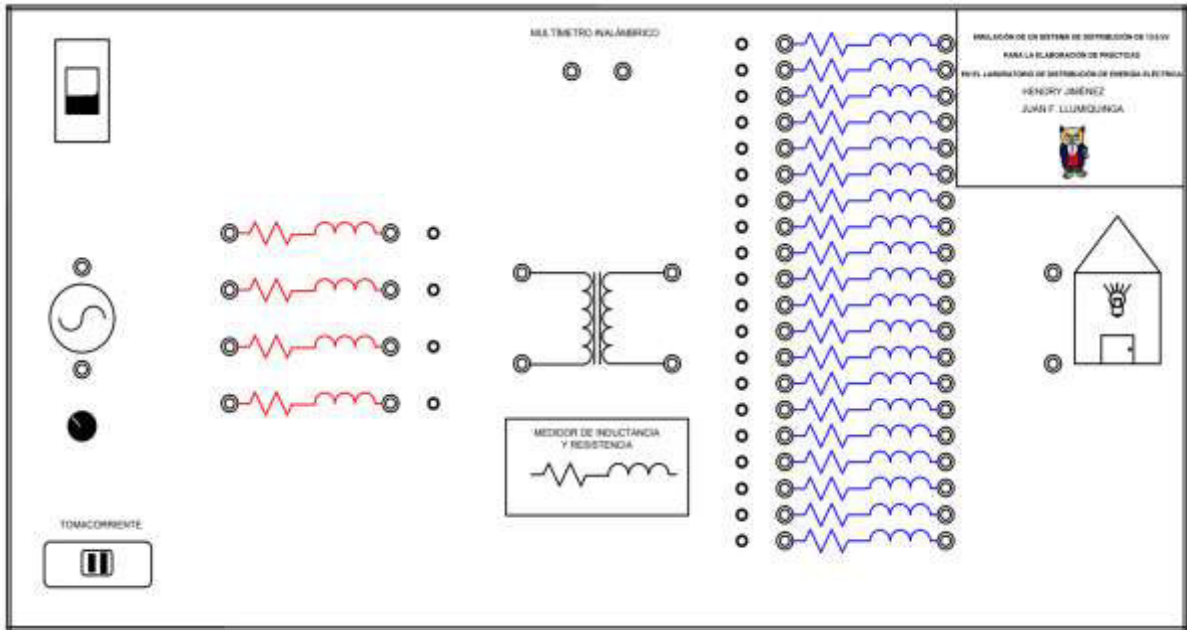


Figura 2.31. Representación gráfica del tablero de conexión del sistema a escala de 13.8 kV.

Los elementos físicos que se mencionaron en este capítulo se aprecian consolidados en el módulo físico culminado, como se puede apreciar en el ANEXO V y que emulará el Sistema de Distribución de 13.8 kV para el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA IMPEDANCIA DE LOS CONDUCTORES

A continuación, se da a conocer las mediciones de los valores realizados en las resistencias e inductancias para las impedancias construidas en el modelo a escala, con el fin de comprobar que los elementos representen de manera aproximada los valores de impedancia que se tienen en un sistema de distribución real de 13.8 kV.

Las mediciones de resistencia se realizaron haciendo uso de un equipo FLUKE 87 V TRUE RMS MULTIMETER que se evidencia en la Figura 3.1 y que permite realizar la medición de: resistencia, capacitancia, frecuencia, voltaje, corriente, entre otros.

Los valores de resistencia que se van a implementar son en su mayoría valores comerciales y arreglos serie-paralelo, que permitirán obtener los valores de resistencia utilizados en el prototipo.



Figura 3.1. Voltímetro FLUKE 87 V TRUE RMS MULTIMETER.

Por otro lado, las mediciones de inductancia se realizarán haciendo uso de un inductómetro construido, detallado en el capítulo anterior, las mediciones de inductancia se comprueban haciendo uso de un inductómetro comercial, como se aprecia en la Figura 3.2 y la Figura 3.3. respectivamente. Estas inductancias tienen dos formas de construcción diferentes:

La primera forma de construcción hace referencia al uso de bobinado de núcleo toroidal, donde el valor de la inductancia viene en función de las dimensiones del núcleo circular y

del número de vueltas; es así, que se puede afinar el valor deseado según el número de vueltas que se necesite, el inductómetro se conecta directamente a los terminales de la bobina.

La segunda forma de obtener los valores de inductancia es en base a núcleos acorazados propios de los transformadores monofásicos. Se enrolla en la parte central del transformador de manera uniforme y ordenada, hasta llegar al valor de inductancia requerida, el valor se comprueba conectando el inductómetro a los terminales del bobinado.



Figura 3.2. Inductómetro construido



Figura 3.3. Inductómetro comercial

Para medir la resistencia e inductancia se utilizó los dos equipos de medición antes mencionados, con el fin de realizar un promedio, comprobar los valores y así aumentar la exactitud al momento de implementar los elementos en el sistema de distribución a escala.

3.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA

A manera de obtener los parámetros serie que conforman la impedancia del sistema de distribución a escala, se realiza la simulación tanto del alimentador primario como del circuito secundario haciendo uso del software de análisis de sistemas de distribución CYMDIST, con cada uno de los casos, calibres y distancias utilizados en el sistema cuyos parámetros se detallan más adelante. En el ANEXO D se muestra la subrutina en MATLAB que permite obtener los valores de resistencia e inductancia de manera rápida.

Para la construcción de los diversos valores de resistencia e inductancia, se sigue el procedimiento indicado en el capítulo anterior y luego se procede a la implementación física de las mismas. En las Figuras 3.4 y 3.5 se aprecia las mediciones antes indicadas.



Figura 3.4. Medición de resistencia en medio voltaje a escala utilizando el multímetro Fluke 87V.

Estas mediciones de comprobación se realizan para los parámetros del A/P y el C/S y se corrobora con los valores obtenidos con la simulación en CYMDIST. Los valores obtenidos para desarrollar el sistema de distribución de 13.8 kV a escala, poseen un error porcentual bajo en comparación a los valores teóricos, estos se detallan en la Tabla 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3, y la Tabla 3.4 para fines pertinentes.

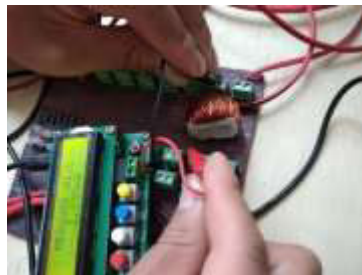


Figura 3.5. Medición de inductancia en bajo voltaje

Tabla 3.1. Resultados de medición de resistencia en el alimentador primario.

Resistencia y configuración del conductor	Alimentador Primario		
	Teórico	Experimental	Error
	[Ω]		[%]
R1 (2 AWG ACSR, L=10 km)	88.18	88	0.2
R2 (2 AWG ACSR, L=15 km)	132.28	131.8	0.36
R3 (2 AWG ACSR, L=20 km)	176.37	175.7	0.37
R4 (2 AWG ACSR, L=25 km)	220.46	219.6	0.39

Tabla 3.2. Resultados de medición de inductancia en el alimentador primario.

Inductancia y configuración del conductor	Alimentador Primario		
	Teórico	Experimental	Error
	[mH]		[%]
L1 (2 AWG ACSR, L=10 km)	1.746	1.77	1.37
L2 (2 AWG ACSR, L=15 km)	2.619	2.52	3.78
L3 (2 AWG ACSR, L=20 km)	3.492	3.55	1.66
L4 (2 AWG ACSR, L=25 km)	4.364	4.22	3.29

Tabla 3.3. Resultados de medición de resistencia en el circuito secundario.

Resistencia y configuración del conductor	Circuito Secundario		
	Teórico	Experimental	Error
	[Ω]		[%]
R1 (4/0 AWG ACSR, L=150 m)	531.74	535.6	0.73
R2 (4/0 AWG ACSR, L=200 m)	708.98	716	0.99
R3 (4/0 AWG ACSR, L=250 m)	886.23	881	0.59
R4 (4/0 AWG ACSR, L=300 m)	1063.47	1030	3.15
R5 (3/0 AWG ACSR, L=150 m)	635.52	621	2.28
R6 (3/0 AWG ACSR, L=200 m)	847.36	845	0.28
R7 (3/0 AWG ACSR, L=250 m)	1059.2	1031	2.66
R8 (3/0 AWG ACSR, L=300 m)	1271.03	1305	2.67
R9 (2/0 AWG ACSR, L=150 m)	770.22	771	0.10
R10 (2/0 AWG ACSR, L=200 m)	1026.96	1025	0.19
R11 (2/0 AWG ACSR, L=250 m)	1283.7	1256	2.16
R12 (2/0 AWG ACSR, L=300 m)	1540.44	1541	0.04
R13 (2 AWG ACSR, L=150 m)	1326.91	1328	0.08
R14 (2 AWG ACSR, L=200 m)	1769.2	1755	0.80
R15 (2 AWG ACSR, L=250 m)	2211.52	2180	1.43
R16 (2 AWG ACSR, L=300 m)	2653.82	2634	0.75

Tabla 3.4. Resultados de medición de inductancia en el circuito secundario.

Inductancia y configuración del conductor	Circuito Secundario		
	Teórico	Experimental	Error
	[mH]		[%]

L1 (4/0 AWG ACSR, L=150 m)	20.782	20.86	0.38
L2 (4/0 AWG ACSR, L=200 m)	27.829	27.82	0.03
L3 (4/0 AWG ACSR, L=250 m)	34.786	34.73	0.16
L4 (4/0 AWG ACSR, L=300 m)	41.744	42.61	2.07
L5 (3/0 AWG ACSR, L=150 m)	22.030	22.11	0.36
L6 (3/0 AWG ACSR, L=200 m)	29.374	29.33	0.15
L7 (3/0 AWG ACSR, L=250 m)	36.717	36.72	0.01
L8 (3/0 AWG ACSR, L=300 m)	44.061	43.62	1.00
L9 (2/0 AWG ACSR, L=150 m)	22.931	22.91	0.09
L10 (2/0 AWG ACSR, L=200 m)	30.575	30.54	0.11
L11 (2/0 AWG ACSR, L=250 m)	38.219	38.31	0.24
L12 (2/0 AWG ACSR, L=300 m)	45.863	45.54	0.70
L13 (2 AWG ACSR, L=150 m)	24.972	24.9	0.29
L14 (2 AWG ACSR, L=200 m)	33.297	33.19	0.32
L15 (2 AWG ACSR, L=250 m)	41.621	41.77	0.36
L16 (2 AWG ACSR, L=300 m)	49.945	49.58	0.73

Usando valores obtenidos a partir de la matriz de impedancia, se comparan los valores construidos con los valores simulados, mostrando de manera general que el porcentaje de error es bajo, siendo el valor más alto el de 3.78 %, obtenido en la inductancia del primario del caso L2, y que demuestra que la construcción del modelo a escala tanto en la parte resistiva como inductiva representa de manera acertada a la construcción a escala del sistema de distribución de 13.8 kV.

3.3. CÁLCULOS DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA EN BASE A LA MATRIZ DE IMPEDANCIA

Para realizar el análisis completo de las impedancias que conforman los conductores del sistema de distribución de 13.8 kV, y como se detalló en el capítulo anterior, se hace uso de la matriz de impedancia, dicha matriz determina los valores calculados de resistencia e inductancia propia del conductor, para obtener los valores construibles de R y L en cada uno de los casos de estudio. La matriz de impedancia por fase se muestra en la Ecuación 3.1 y cuyo desarrollo fue obtenido a través de la ecuación de reducción de Kron.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (3.1)$$

De la matriz de impedancia mencionada, se puede mostrar únicamente el valor de la impedancia por fase Z_{aa} para estudios pertinentes, y teniendo en cuenta que el valor de impedancia será idéntico para las demás fases, es así, que se tomará únicamente el valor de la fila uno y columna uno, como se puede observar en la Ecuación 3.2.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (3.2)$$

Se obtiene la impedancia propia de fase Z_{aa} y que puede ser usada para determinar la caída de voltaje en el alimentador. Los demás componentes de la matriz serán puestos en cero obteniendo la impedancia únicamente de la fase A, y al aplicar las ecuaciones de Carson permite obtener un modelado más exacto del segmento de la línea en estudio y que será replicado de ser necesario para las fases B y C.

Dichas matrices son calculadas en base a las características propias del conductor, y serán comprobadas mediante el cálculo respectivo, y posteriormente haciendo uso del software de simulación CYMDIST.

Con las impedancias ya calculadas y corroboradas, se hace uso de la Ecuación 3.3 y Ecuación 3.4 para determinar algunos de los parámetros que serán de suma importancia en la elaboración del modelo a escala, como es el caso de la caída de voltaje, corriente y sus equivalentes en por unidad.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \quad (3.4)$$

En las cuales y reemplazando los valores se obtiene la Ecuación 3.5.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.87732 + j1.4010 & 0.2302 + j0.5988 & 0.2302 + j0.5196 \\ 0.2302 + j0.5988 & 1.8833 + j1.3940 & 0.2332 + j0.5953 \\ 0.2304 + j0.5193 & 0.2334 + j0.5951 & 1.8833 + j1.3939 \end{bmatrix} \left(\frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (3.5)$$

Como resultado de esta matriz se puede hacer uso del valor de impedancia de fase Z_{aa} mostrado en la Ecuación 3.6, para obtener los valores de impedancia en ohmios, tomando en cuenta que en las demás fases se tendrá una impedancia similar en toda la diagonal de la matriz.

$$Z_{aa} = 1.87732 + j1.4010 \quad (3.6)$$

Para una longitud de 15000 m se puede obtener el valor de la resistencia de la siguiente manera, acorde a la Ecuación 3.7.

$$Z_{medio\ voltaje\ real} = [1.877 + j1.401] \left(\frac{\Omega}{milla} \right) \cdot \frac{1\ milla}{1609.34\ m} \cdot 15000\ m$$

$$R = 17.4947\ \Omega \quad (3.7)$$

De igual forma para la inductancia, y que se muestra en la Ecuación 3.8.

$$jXL = j2\pi fL$$

$$L = \frac{XL}{2\pi f}$$

$$L = \frac{1.401 \cdot \frac{15000}{1609.34}}{2\pi \cdot 60} \quad (3.8)$$

$$L = 34.6378\ mH$$

3.4. EFECTO JOULE DEL CONDUCTOR

La potencia disipada en forma de calor se puede escribir como se aprecia en la Ecuación 3.9 y que representa las pérdidas técnicas disipadas propias del efecto Joule [22].

$$P = R \cdot I^2 \quad (3.9)$$

Donde:

P : potencia en vatios

R : resistencia en ohmios

I : corriente en amperios

Las pérdidas técnicas (térmicas) por efecto Joule responden a la Ecuación 3.10.

$$E_p = n \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (3.10)$$

E_p : energía de perdidas W*h

n : número de conductores cargados en la línea (2 para monofásica o continua y 3 para trifásica)

R : resistencia en ohmios de la línea

I : corriente en amperios

t : tiempo en horas

Dado que el prototipo está conformado por elementos resistivos, el efecto Joule está presente constantemente en la representación a escala, para contrarrestar el calor que disipan las resistencias se ha instalado el sistema de refrigeración detallado en el capítulo anterior.

En la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6, se muestran los resultados de caídas de voltaje con y sin el sistema de refrigeración, adicionalmente se hace un análisis del error existente entre ambos escenarios.

Tabla 3.5. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para medio voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=10 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Con refrigeración	Sin refrigeración	% Error
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.03432	0.03652	6.41025641
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.03456	0.03698	7.00231481
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.03468	0.03701	6.71856978
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.03481	0.03712	6.63602413
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.03444	0.03633	5.48780488
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.03456	0.03664	6.01851852
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.03481	0.03690	6.00402183
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.03504	0.03708	5.82191781
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.03456	0.03658	5.84490741
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.03468	0.03679	6.08419839
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.03492	0.03702	6.0137457
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.03516	0.03726	5.97269625
2 AWG ACSR, L=150 m	0.03492	0.03698	5.89919817
2 AWG ACSR, L=200 m	0.03528	0.03733	5.8106576
2 AWG ACSR, L=250 m	0.03576	0.03756	5.03355705
2 AWG ACSR, L=300 m	0.03612	0.03802	5.26024363

El porcentaje de error existente entre un sistema prototipo que consta con refrigeración y un sistema que carece del mismo, llega en el caso más crítico al 6.7% en un intervalo de tiempo de 45 minutos aproximadamente. Si el sistema prototipo quedase conectado por un tiempo mayor y sin un sistema de refrigeración, el porcentaje de error puede seguir incrementado y esto se refleja como un sobrecalentamiento en los elementos y posteriormente fallas en los mismos.

Tabla 3.6. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para bajo voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=10 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Con refrigeración	Sin refrigeración	% Error
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.56574	0.59523	5.21264185
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.75546	0.82741	9.52399862
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.9501	1.0221	7.57814967
4/0 AWG ACSR, L=300 m	1.1445	1.2925	12.9314111
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.669	0.7587	13.4080717
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.8958	1.1153	24.5032373
3/0 AWG ACSR, L=250 m	1.12452	1.2845	14.2265144
3/0 AWG ACSR, L=300 m	1.3566	1.5566	14.7427392
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.79788	0.87781	10.0177972
2/0 AWG ACSR, L=200 m	1.06902	1.16911	9.36278086
2/0 AWG ACSR, L=250 m	1.3428	1.4932	11.2004766
2/0 AWG ACSR, L=300 m	1.6212	1.8812	16.0375031
2 AWG ACSR, L=150 m	1.3473	1.5473	14.8445038
2 AWG ACSR, L=200 m	1.8124	2.0923	15.4436107
2 AWG ACSR, L=250 m	2.2845	2.5821	13.0269206
2 AWG ACSR, L=300 m	2.76492	2.9648	7.22914225

En cuanto a las caídas de voltaje con refrigeración y sin refrigeración en el lado de medio voltaje en el prototipo, existe un caso muy particular donde el porcentaje de error llega a ser casi del 25%, esto es debido a que el valor de resistencia que necesita la impedancia de este caso, se logró en base a un arreglo serie paralelo de resistencias de baja potencia en comparación con el resto de los casos.

Para las longitudes de: 15 km, 20 km y 25 km en los conductores referidos a medio voltaje, las tablas con los valores de caída de voltaje se encuentran en el ANEXO Q.

3.5. CONDUCTOR Y CALIBRE DE MÍNIMA CAIDA DE VOLTAJE

El objetivo del estudio para determinar el calibre óptimo para un tramo de conductor es el de obtener la menor caída de voltaje, resultando en una reducción de costos a largo plazo, una reducción considerable de pérdidas de potencia, y en general un sistema de distribución más eficiente.

Para determinar el mejor calibre de conductor dentro de un sistema de distribución, se puede hacer uso de la caída de voltaje que se presenta en un tramo a una distancia específica, en relación con los demás casos de calibre y distancia para un tipo de conductor. Es así, que se obtiene los resultados de medición de caída de voltaje que se presentan en la Tabla 3.7 para una distancia de 10 km en el alimentador primario, y para las distancias (15, 20 y 25 km) se muestran de manera detallada en el ANEXO R.

Cabe resaltar que los valores presentados en las tablas corresponden a las caídas de voltaje para el tramo de medio voltaje cuyo calibre será único y correspondiente al 2 AWG ACSR en distancias de: 10 km, 15 km, 20 km y 25 km, mientras que para el tramo de bajo voltaje los calibres variarán entre: 4/0 AWG ACSR, 3/0 AWG ACSR, 2/0 AWG ACSR y 2 AWG ACSR; de manera similar las distancias variarán entre: 150 m, 200 m, 250 m y 300 m respectivamente, esto con el objetivo de acercarse a distancias y calibres más utilizados por las empresas eléctricas a nivel nacional.

Tabla 3.7. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST y por unidad para una distancia de 10 km en el alimentador primario.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PA10km_S4-0_150m	3.9478	2.0744	0.000286	0.009429
2	PA10km_S4-0_200m	3.9701	2.7701	0.000288	0.012591
3	PA10km_S4-0_250m	3.9837	3.4838	0.000289	0.015835
4	PA10km_S4-0_300m	4.0017	4.1966	0.00029	0.019075
5	PA10km_S3-0_150m	3.9567	2.4529	0.000287	0.01115
6	PA10km_S3-0_200m	3.9777	3.2845	0.000288	0.01493
7	PA10km_S3-0_250m	3.9988	4.1233	0.00029	0.018742
8	PA10km_S3-0_300m	4.0255	4.9743	0.000292	0.02261
9	PA10km_S2-0_150m	3.9677	2.9255	0.000288	0.013298
10	PA10km_S2-0_200m	3.9925	3.9197	0.000289	0.017817
11	PA10km_S2-0_250m	4.0174	4.9237	0.000291	0.02238
12	PA10km_S2-0_300m	4.0493	5.9447	0.000293	0.027021
13	PA10km_S#2_150m	4.0136	4.9402	0.000291	0.022455
14	PA10km_S#2_200m	4.0613	6.6455	0.000294	0.030207
15	PA10km_S#2_250m	4.1063	8.3765	0.000298	0.038075
16	PA10km_S#2_300m	4.1531	10.1381	0.000301	0.046082

Es así que se puede determinar la caída de voltaje en voltios como en valores en p.u. en varias combinaciones de conductor para el circuito secundario y manteniendo el conductor del alimentador primario en 2 AWG ACSR, sin embargo, para reconocer de manera acertada la diferencia entre tener un calibre y la mejor distancia al comparar varios conductores, se realizará un estudio detallado de varios escenarios que podrían ser aplicados a la vida real, o a un caso en específico y que permiten sacar varios resultados al momento de utilizar el sistema de distribución de 13.8 kV a escala.

3.5.1. CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A UNA DISTANCIA FIJA CON CALIBRE 2 AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A VARIAS DISTANCIAS CON UN SOLO CALIBRE DE CONDUCTOR.

Para explicar de una manera más detallada esta comparación se hace uso de la Tabla 3.8, que es una versión detallada de las tablas de caída de voltaje mostradas en los resultados anteriores, y muestra el caso en el cual la distancia del alimentador primario se mantiene a un calibre de 2 AWG ACSR y la distancia del mismo será de 15 km, por otro lado para el circuito secundario y con el objetivo de mostrar la diferencia de caída de voltaje existente al comparar las caídas de voltaje en varios calibres, se toma al azar un calibre de conductor en el circuito secundario (4/0, 3/0, 2/0 o 2 AWG ACSR) , que para el caso pertinente se hará uso del calibre 3/0 AWG ACSR, y con el cual se realizarán las comparaciones respectivas para varias distancias del circuito secundario (150 m, 200 m, 250 m, 300 m).

Tabla 3.8. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para el estudio del caso A.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PB15Km_S3-0_150m	4.9439	2.4531	0.000358	0.01115
2	PB15Km_S3-0_200m	4.9754	3.2847	0.000361	0.01493
3	PB15Km_S3-0_250m	5.0071	4.1236	0.000363	0.018744
4	PB15Km_S3-0_300m	5.0472	4.9747	0.000366	0.022612

En la Tabla 3.8 se muestra la configuración del sistema de distribución cuyo A/P posee un calibre de 2 AWG ACSR a una distancia de 15 km, mientras que, para el conductor del C/S posee un calibre de 3/0 AWG ACSR y cuyos tramos de conductor varían en cuatro distancias posibles (150 m, 200 m, 250 m y 300 m).

Al tener esta configuración en específico, se puede concluir que al obtener los valores en por unidad, y como se puede apreciar en la columna de caída de voltaje de CYMDIST, la menor caída de voltaje se obtiene en la menor distancia, debido a que la impedancia del

conductor aumenta acorde a la distancia del mismo, es así que para un calibre 3/0 AWG ACSR la distancia de 150 m es la mejor, y se obtiene la menor caída de voltaje del grupo de caídas de voltaje en color amarillo de la Tabla 3.8, de igual forma la señalada en color verde pertenece a la mínima caída de voltaje $\Delta V = 2.4531 V$ y $V_{p.u.} = 0.01115$, respectivamente.

3.5.2. CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A UNA DISTANCIA FIJA CON CALIBRE 2AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A LA MISMA DISTANCIA CON VARIOS CALIBRES DEL CONDUCTOR

Para explicar de manera más detallada esta comparación se hace uso de la Tabla 3.9, en la cual se muestra el caso del conductor del alimentador primario es de 25 km y posee un calibre de 2 AWG ACSR, y en el cual el conductor del circuito secundario mantiene su distancia en 300 m, pero se cambia de calibre de conductor en este caso (4/0, 3/0, 2/0 o 2 AWG ACSR), es así como con estos parámetros establecidos se procede a comparar las caídas de voltaje.

Cabe resaltar que las caídas de voltaje obtenidas en el A/P , varían muy poco en relación con la variación de caída de voltaje existente en el circuito secundario, esto en gran medida debido a que en el alimentador primario posee un solo calibre de conductor, mientras que en el secundario se tiene cuatro variaciones posibles del conductor.

Tabla 3.9. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para el estudio del caso B.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PD25km_S4-0_150m	4.9161	2.0751	0.000356	0.009432
2	PD25km_S4-0_200m	4.9608	2.7767	0.000359	0.012621
3	PD25km_S4-0_250m	5.006	3.484	0.000363	0.015836
4	PD25km_S4-0_300m	5.051	4.197	0.000366	0.019077
5	PD25km_S3-0_150m	4.9384	2.453	0.000358	0.01115
6	PD25km_S3-0_200m	4.9908	3.2847	0.000362	0.01493
7	PD25km_S3-0_250m	5.044	4.123	0.000366	0.018741
8	PD25km_S3-0_300m	5.111	4.975	0.00037	0.022614
9	PD25km_S2-0_150m	4.966	2.9261	0.00036	0.0133
10	PD25km_S2-0_200m	5.0278	3.9209	0.000364	0.017822
11	PD25km_S2-0_250m	5.0901	4.924	0.000369	0.022382
12	PD25km_S2-0_300m	5.1704	5.9443	0.000375	0.02702
13	PD25km_S#2_150m	5.0809	4.9406	0.000368	0.022457
14	PD25km_S#2_200m	5.2006	6.6469	0.000377	0.030213
15	PD25km_S#2_250m	5.3131	8.3774	0.000385	0.038079
16	PD25km_S#2_300m	5.4292	10.1388	0.000393	0.024678

Es así como en la Tabla 3.9 se puede observar en la columna color amarillo, las caídas de voltaje en por unidad para diversos calibres y a varias distancias, se hace énfasis en que el objetivo del estudio de este caso, es el de mantener la misma distancia en el circuito secundario de 300 m y que se muestra en las filas de color verde, cambiando entre los cuatro distintos tipos de conductores (4/0, 3/0, 2/0 o 2 AWG ACSR).

Se puede observar que la menor caída de voltaje al comparar las cuatro filas en color verde se obtiene con el mayor calibre, en este caso la configuración perteneciente al calibre 2 AWG ACSR a una distancia de 25 km, y en el conductor del circuito secundario cuyo calibre es 4/0 AWG ACSR a la distancia establecida de 300 m. De esta forma se puede determinar que, en un conjunto de conductores del circuito secundario, la menor caída de voltaje se tiene con el conductor de mayor calibre, en este caso 4/0 AWG ACSR.

Los valores obtenidos con este conductor son de una caída de voltaje en CYMDIST de $\Delta V = 4.197 V$ y $V_{p.u.} = 0.019077$, demostrando así que con esta comparación en la configuración mencionada se tiene la menor caída de voltaje.

3.5.3. CASO DE CONDUCTOR DEL A/P A VARIAS DISTANCIAS CON CALIBRE 2AWG ACSR, Y VARIACIÓN DEL CONDUCTOR DEL C/S A LA MISMA DISTANCIA CON UN SOLO CALIBRE DEL CONDUCTOR

Para explicar de manera más detallada la comparación existente al variar la distancia del alimentador primario, se hace uso de la Tabla 3.10, la cual muestra de manera detallada el uso de un conductor fijo en el circuito secundario, el cual será de calibre 4/0 AWG ACSR y a una distancia de 150 m, mientras que, en el primario, si bien es cierto el calibre se mantiene en 2 AWG ACSR la distancia varía en cuatro escenarios posibles (10 km, 15 km, 20 km, 25 km). De esta manera se puede diferenciar entre caídas de voltaje, y que se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 3.10. Caídas de voltaje obtenidas en CYME y en por unidad para el estudio del caso C.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
A	PA10km_S4-0_150m	3.9478	2.0744	0.000286	0.009429
B	PB15km_S4-0_150m	4.9305	2.0745	0.000357	0.00943
C	PC20km_S4-0_150m	5.2261	2.0746	0.000379	0.00943
D	PD25km_S4-0_150m	4.9161	2.0751	0.000356	0.009432

En la Tabla 3.10 se puede observar en la columna de color amarillo el valor de la caída de voltaje en por unidad, y en contraste al observar las caídas de voltaje en CYMDIST, se

puede observar que la menor caída de voltaje se obtiene con la menor distancia de alimentador primario.

Se deduce que la menor caída de voltaje se tiene con un conductor del A/P cuyo calibre será 2AWG ACSR, y cuya distancia es la menor posible es decir de 10 km, mientras que para el C/S se mantiene el calibre de 4/0 AWG ACSR y una distancia de 150 m, de esta manera se obtiene en la fila resaltada en color verde la menor de las caídas de voltaje, con un valor aproximado en CYMDIST de $\Delta V = 3.9478 V$ y $V_{p.u.} = 0.000286$, dando como conclusión que a pesar de mantener las mismas condiciones en el circuito secundario se puede determinar la caída de voltaje mínima en el alimentador primario, en base a la distancia del tramo de conductor.

3.5.4. COMPARACIÓN DE VALORES EN TIEMPO REAL OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO

A manera de realizar la comparación existente en los valores en tiempo real obtenidos por el prototipo, se hace una comparación similar a la realizada en los puntos anteriores, pero tomando en cuenta el error existente por la conversión de voltaje análogo a digital y cuya interfaz se muestra en la Figura 3.6, el resultado de algunas de estas mediciones al azar se muestra en el ANEXO S.

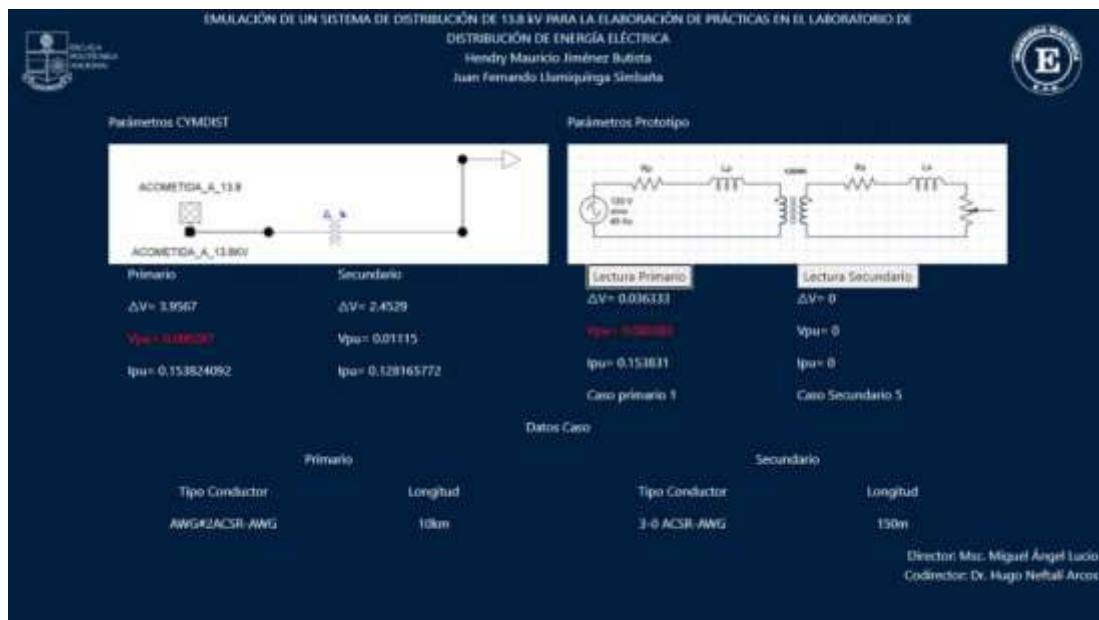


Figura 3.6. Interfaz del sistema de distribución a escala de 13.8 kV.

Es así, y a manera resumida que se muestra algunos de los voltajes en por unidad en la comparación de ciertos casos al azar, para determinar el porcentaje de error en la caída

de voltaje, y que se detallan de una mejor manera en la Tabla 3.11 para el alimentador primario y para el circuito secundario en la Tabla 3.12.

Para observar las mediciones en tiempo real, basta con realizar el estudio para el caso del primario con calibre 2 AWG ACSR a una distancia de 10 km, y variando los parámetros del circuito secundario a una distancia fija de 150 m, cuyo calibre irá cambiando a fin de obtener su caída de voltaje.

Tabla 3.11. Lectura en el primario, utilizando mediciones del módulo.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Primario Inalámbrico	Porcentaje de error %
A	PA10km_S4-0_150m	3.9478	0.000286	0.000273	4.55
B	PB10km_S3-0_150m	3.9567	0.000287	0.000303	5.57
C	PC10km_S2-0_150m	3.9677	0.000288	0.000289	0.35
D	PD10km_S#2_150m	4.0136	0.000291	0.000305	4.81

Tabla 3.12. Lectura en el secundario, utilizando mediciones del módulo.

No	Caso	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Secundario	Voltaje p.u. Secundario Inalámbrico	Porcentaje de error %
1	PA10km_S4-0_150m	2.0744	0.009429	0.009690	2.77
2	PB10km_S3-0_150m	2.4529	0.011115	0.011438	2.58
3	PC10km_S2-0_150m	2.9255	0.013298	0.013808	3.84
4	PD10km_S#2_150m	4.9402	0.022455	0.023087	2.81
5	PA15km_S4-0_200m	2.7761	0.012619	0.0128383	1.74
6	PB15km_S3-0_200m	3.2847	0.01493	0.015827	6.01
7	PC15km_S2-0_200m	3.9211	0.017823	0.018182	2.01
8	PD15km_S#2_200m	6.6474	0.030214	0.031131	3.04
9	PA20km_S4-0_250m	3.4842	0.015837	0.016052	1.36
10	PB20km_S3-0_250m	4.1236	0.018744	0.019535	4.22
11	PC20km_S2-0_250m	4.9241	0.022382	0.023366	4.40
12	PD20km_S#2_250m	8.3775	0.03808	0.039276	3.14
13	PA25km_S4-0_300m	4.197	0.019077	0.019987	4.77
14	PB25km_S3-0_300m	4.975	0.022614	0.023737	4.97
15	PC25km_S2-0_300m	5.9443	0.02702	0.028431	5.22
16	PD25km_S#2_300m	10.1388	0.024678	0.024617	0.25

Se puede concluir que hay algunas caídas de voltaje que superan el 3%, y las cuales están marcadas en color rojo y que no cumplirían las caídas de voltaje que se estipula en las normas de las diversas empresas eléctricas a nivel nacional, en estas mediciones obtenidas y que se muestran en la Tabla 3.12 coinciden con los casos en los cuales el calibre del conductor es el más delgado en cualquier distancia del C/S seleccionada; tomando como ejemplo el caso más desfavorable en el cual el alimentador primario se

mantiene en un calibre de 2 AWG ACSR y el secundario tiene un calibre de igual forma 2 AWG ACSR y cuya distancia corresponde a la mayor y es de 300 m.

Además, se puede concluir de la Tabla 3.11 y Tabla 3.12, en las columnas pintadas de color amarillo la menor caída de voltaje en todos los casos pertenece a aquella combinación que tiene la menor distancia y cuyo calibre es el mayor.

Cabe resaltar que también influye el parámetro del costo y en el cual la mayoría de las empresas eléctricas toman en consideración, por ejemplo, para el caso del circuito secundario se puede observar que no es conveniente utilizar un calibre 4/0 AWG ACSR, debido a su alto costo y difícil manipulación, sino que se puede utilizar un calibre menor tratando siempre de estar en una caída de voltaje menor al 3%.

3.6. ESTUDIO DEL CASO EN EL QUE SE UTILICE CABLE PREENSAMBLADO PARA EL CIRCUITO SECUNDARIO

El uso de cable preensamblado en redes aéreas de bajo voltaje y transformadores tipo pedestal (padmounted) en sistemas de distribución, ha sido cada vez más utilizado en la actualidad. Es así, que se pretende establecer características técnicas, constructivas y de instalación para un futuro sistema de distribución, y que se acople al sistema a escala elaborado en el presente trabajo de titulación.

Se tiene en cuenta la descripción de los materiales y equipos utilizados por la Empresa Eléctrica Quito, para un apropiado diseño e instalación, se hace un análisis de estos nuevos materiales y equipos, comparando el uso de cable preensamblado con el uso de cableado tradicional, la disposición de los conductores dentro del recubrimiento del cable preensamblado se indica claramente en la Figura 3.7.

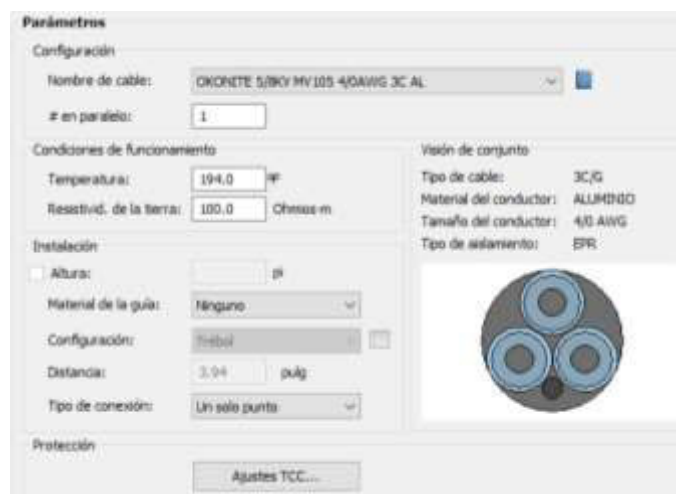


Figura 3.7. Configuración de cable preensamblado utilizando CYMDIST de CYME.

El aislamiento del cable preensamblado está constituido para todos los casos, por una envoltura de polietileno reticulado (XLPE), al que se le ha agregado negro de humo, con alta resistencia a la radiación solar y a la intemperie. Este cable está constituido por la reunión de hasta tres conductores de fase, elaborados en aluminio, y con un conductor neutro portante elaborado en aleación de aluminio, todos aislados individualmente con una capa de polietileno reticulado (XLPE) y cableados entre sí, a ser utilizados en líneas aéreas de distribución de energía, con voltaje nominal de hasta 1,1 kV [23].

3.6.1. CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR POR FASE Y CONDUCTOR DEL NEUTRO EN CABLE PREENSAMBLADO

Para detallar de manera más acertada la configuración existente en un cable preensamblado, se hace un desglose mostrando que el conductor de fase está constituido, según su sección, por varios alambres de aluminio puro (ASCR), formando una sección circular. Los calibres más usados son: 50mm² (apx. 1/0 AWG), 70mm² (apx. 2/0) y 95mm² (apx. 3/0 AWG).

De manera similar para el conductor neutro portante, está constituido por varios alambres de aleación de aluminio (AAAC), formando una sección circular. Los calibres más usados son: 50 mm² (apx. 1/0 AWG) y 70mm² (apx. 2/0 AWG).

La implementación de elementos que emulen el cable preensamblado como conductor en el circuito secundario, el prototipo realizado requiere de una previa simulación en el software CYMDIST, esto con el fin de determinar los valores de caída de voltaje y compararlos con los valores obtenidos en circuitos con conductor desnudo.

Cabe resaltar que la implementación de los elementos resistivos e inductivos perteneciente al caso de preensamblado, se deja como un caso particular para una futura implementación; sin embargo, los resultados de la simulación se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Caída de voltaje utilizando cable preensamblado.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ASCR, L=10 km	
Calibre y conductor en bajo voltaje	Caída de voltaje en el conductor preensamblado (V)
107mm ² (apx. 4/0 AWG ASCR), L=150 m	1.619
107mm ² (apx. 4/0 AWG ASCR), L=200 m	2.163
107mm ² (apx. 4/0 AWG ASCR), L=250 m	2.711
107mm ² (apx. 4/0 AWG ASCR), L=300 m	3.261

85mm ² (apx.3/0 AWG ACSR), L=150 m	2.001
85mm ² (apx.3/0 AWG ACSR), L=200 m	2.672
85mm ² (apx.3/0 AWG ACSR), L=250 m	3.361
85mm ² (apx.3/0 AWG ACSR), L=300 m	4.033
67mm ² (apx.2/0 AWG ACSR), L=150 m	2.479
67mm ² (apx.2/0 AWG ACSR), L=200 m	3.321
67mm ² (apx.2/0 AWG ACSR), L=250 m	4.161
67mm ² (apx.2/0 AWG ACSR), L=300 m	5.001
33mm ² (apx 2 AWG ACSR), L=150 m	4.830
33mm ² (apx 2 AWG ACSR), L=200 m	6.508
33mm ² (apx AWG ACSR), L=250 m	8.201
33mm ² (apx AWG ACSR), L=300 m	9,921

En la subrutina del ANEXO T se indica de forma detallada los cambios pertinentes que se realizan para simular un circuito secundario, en el cual los conductores son cables preensamblados.

Los resultados de caída de voltaje obtenidos haciendo uso del cable preensamblado, se compara con los valores de caídas de voltaje que resultan al usar conductor desnudo, la diferencia de voltaje se presenta en la Tabla 3.14; los diámetros para la respectiva comparación son aproximados a los calibres existentes para conductor desnudo ya que en el caso de cable preensamblado vienen en milímetros cuadrados.

Tabla 3.14. Diferencia en caída de voltaje entre cable preensamblado y desnudo.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=10 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Caída de voltaje preensamblado (V)	Caída de voltaje conductor desnudo (V)	Diferencia entre caídas de voltaje (V)
107mm ² aprox. 4/0 AWG ACSR, L=150 m	2.0744	1.619	0.4554
107mm ² aprox. 4/0 AWG ACSR, L=200 m	2.7701	2.163	0.6071
107mm ² aprox. 4/0 AWG ACSR, L=250 m	3.4838	2.711	0.7728
107mm ² aprox. 4/0 AWG ACSR, L=300 m	4.1966	3.261	0.9356
85mm ² aprox. 3/0 AWG ACSR, L=150 m	2.4925	2.001	0.4915

85mm ² aprox. 3/0 AWG ACSR, L=200 m	3.2845	2.672	0.6125
85mm ² aprox. 3/0 AWG ACSR, L=250 m	4.1233	3.361	0.7623
85mm ² aprox. 3/0 AWG ACSR, L=300 m	4.9743	4.033	0.9413
67mm ² aprox. 2/0 AWG ACSR, L=150 m	2.9255	2.479	0.4465
67mm ² aprox. 2/0 AWG ACSR, L=200 m	3.9197	3.321	0.5987
67mm ² aprox. 2/0 AWG ACSR, L=250 m	4.9237	4.161	0.7627
67mm ² aprox. 2/0 AWG ACSR, L=300 m	5.9447	5.001	0.9437
33mm ² aprox. 2 AWG ACSR, L=150 m	4.9402	4.8301	0.1101
33mm ² aprox. 2 AWG ACSR, L=200 m	6.6455	6.508	0.1375
33mm ² aprox. 2 AWG ACSR, L=250 m	8.3765	8.201	0.1755
33mm ² aprox. 2 AWG ACSR, L=300 m	10.1381	9,921	0.2171

3.7. RESULTADOS DE FLUJOS DE CARGA PARA LA OBTENCIÓN DE CORRIENTE

Se obtiene los valores de caída de voltaje del análisis en CYMDIST y se los compara con los valores de caída de voltaje existentes en la emulación, de igual manera se logra obtener los valores de corriente por fase en el caso de 13.8 kV que se obtiene de las tablas a partir del flujo de carga de la simulación de CYMDIST, como se evidencia en el ANEXO G.

Los valores de corriente existentes en el prototipo se determinan haciendo uso de los parámetros de voltaje e impedancia ya medidos y determinados en la Tabla 3.15 para valores en medio voltaje y la Tabla 3.16 para los valores en bajo voltaje. Se comparan los valores en por unidad tanto del sistema de 13.8 kV con los del sistema prototipo y se pone en evidencia el porcentaje de error existente en los valores de corriente. Es importante resaltar que, en este caso, se toma un escenario específico donde se comparan las corrientes tanto en los conductores del sistema real como del prototipo ya sea en medio voltaje o bajo voltaje como se indica respectivamente en las siguientes tablas.

Tabla 3.15. Corrientes en por unidad para el lado de medio voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=10 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV (p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.153728489	0.13598	11.545348

4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.153728489	0.13577	11.6819525
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.153728489	0.13565	11.7600122
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.153728489	0.14298	6.99186538
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.153824092	0.14112	8.25884413
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.153871893	0.13987	9.09970803
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.153967495	0.14584	5.27870834
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.154349904	0.14112	8.57137171
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.154254302	0.13991	9.29912606
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.154254302	0.14011	9.16947004
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.154349904	0.13987	9.38121996
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.154445507	0.14001	9.34666685
2 AWG ACSR, L=150 m	0.154971319	0.13891	10.364059
2 AWG ACSR, L=200 m	0.155497132	0.15113	2.80849682
2 AWG ACSR, L=250 m	0.155544933	0.14882	4.32346645
2 AWG ACSR, L=300 m	0.155592734	0.14789	4.95057436

Tabla 3.16. Corrientes en por unidad (p.u.) para el lado de bajo voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=10 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.127946287	0.1095479	14.3797741
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128354012	0.112342	12.4748824
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.128763261	0.109987	14.5820018
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129175558	0.110121	14.7509005
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128165772	0.112341	12.3471125
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128648183	0.109782	14.6649432
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129134404	0.112479	12.8977279
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129753231	0.109342	15.7308075
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128440129	0.111987	12.8099599
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.129321881	0.11112	14.0748656
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129599287	0.10994	15.1692864
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.130347671	0.109787	15.7737157

2 AWG ACSR, L=150 m	0.129608432	0.110547	14.7069382
2 AWG ACSR, L=200 m	0.130757682	0.102312	21.7545016
2 AWG ACSR, L=250 m	0.131841391	0.110981	15.8223384
2 AWG ACSR, L=300 m	0.132961682	0.10913	17.9237218

El valor de corriente en por unidad para los demás escenarios se muestra en las tablas del ANEXO I.

3.8. ESTUDIO DE SUBVOLTAJE EN EL CIRCUITO SECUNDARIO

Para realizar el estudio de subvoltaje se realiza la simulación en CYME de ciertos casos en específico, que permiten obtener las caídas de voltaje y cuyos resultados se muestran a continuación.

3.8.1. CAÍDA DE VOLTAJE EN EL CIRCUITO SECUNDARIO

Se realiza la comparación de caída de voltaje existente entre un conductor que compone el circuito secundario, cuyo calibre será de 4/0 AWG ACSR en comparación a un conductor de calibre 2 AWG ACSR; es así que para el calibre 4/0 AWG ACSR se hace uso de una distancia de 150 m, siendo así la menor distancia al mayor calibre; por otro lado, se toma el caso del otro extremo, que pertenece al calibre más delgado, el cual es 2 AWG ACSR con la mayor distancia es decir 300 metros.

Para realizar la comparación, se procede a obtener las caídas de voltaje haciendo uso de la simulación en CYMDIST que se muestran en la Figura 3.8. y la Figura 3.9. respectivamente.

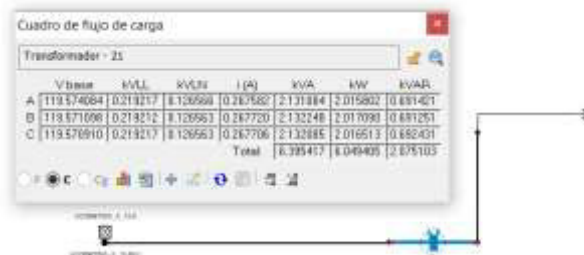


Figura 3.8. Voltaje en las borneras del transformador del C/S 4/0 AWG ACSR 150 m.

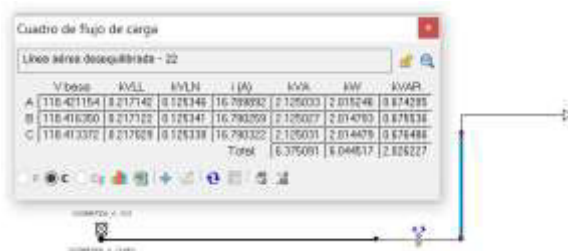


Figura 3.9. Voltaje en el conductor para un circuito secundario 4/0 AWG ACSR 150 m.

En el primer caso, se realiza la resta del voltaje obtenido en los terminales del secundario del transformador y cuya medición es $V = 219.217 V$, y el voltaje en el conductor que se tiene una medición de $V = 217.142 V$ para la fase A, de esta forma se hace la resta para obtener una caída de voltaje de $\Delta V = 2.075 V$, que es menor al 3% recomendado por las empresas eléctricas a nivel nacional.

En contraste, se muestra las caídas de voltaje en el caso extremo inferior en el cual el conductor es más delgado, cuyo calibre es 2 AWG ACSR con una longitud de 300 m y que se muestra en la Figura 3.10 y Figura 3.11 respectivamente.

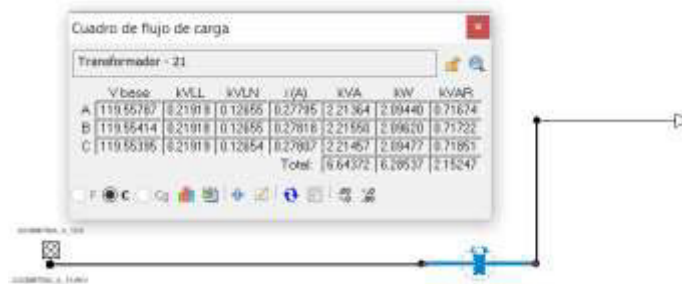


Figura 3.10. Voltaje en las borneras del transformador para C/S 2 AWG ACSR 300 m.

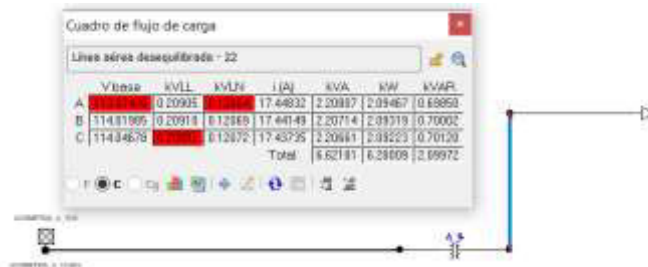


Figura 3.11. Caída de voltaje en el conductor para un C/S 2 AWG ACSR 300 m.

Es así, que en este segundo caso se realiza la resta del voltaje obtenido en los terminales del secundario del transformador y cuya medición es $V = 219.19 V$, y el voltaje en el conductor cuya medición es de $V = 209.05 V$ para la fase A, de esta forma se hace la resta para obtener una caída de voltaje de $\Delta V = 10.14 V$, que en contraste supera al 3% de caída de voltaje recomendado por las empresas eléctricas a nivel nacional, y que se marca en color rojo en la simulación en CYMDIST demostrando así que existe un subvoltaje en las acometidas de los consumidores ya que se resta aproximadamente $10.14 V$ del voltaje total y esto llega al consumidor final.

3.9. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN INALÁMBRICA, Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN P.U DE CORRIENTE Y CAÍDA DE VOLTAJE

Finalmente, los resultados obtenidos en tiempo real, al hacer uso del modelo a escala, se muestran en la interfaz del sistema (ver Figura 3.12) permitiéndose visualizar las mediciones del sistema conectado mediante Wi-Fi a uno o varios computadores.

Los valores que se visualizan corresponden a cada uno de los casos y posibles combinaciones tanto de alimentador primario como del circuito secundario, dichos valores obtenidos muestran de manera aproximada las caídas de voltaje en p.u., el voltaje que se obtiene en CYMDIST, corrientes en por unidad, calibre y distancia para cada uno de los casos.

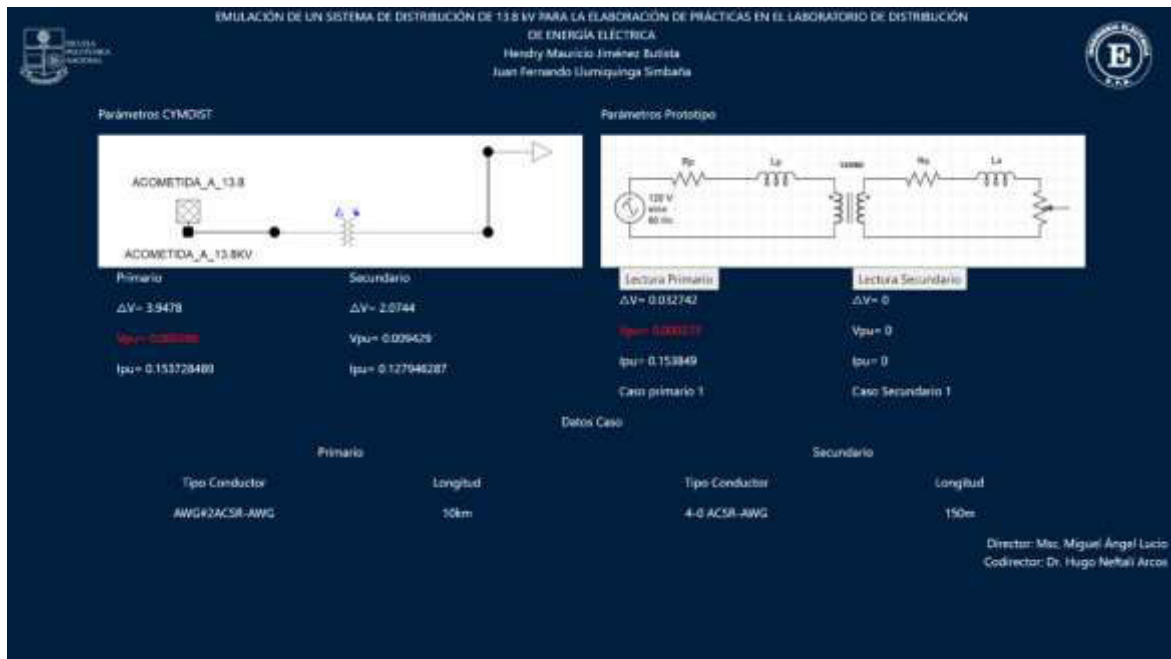


Figura 3.12. Interfaz del sistema de distribución a escala.

Los valores obtenidos para el escenario donde el A/P es un conductor 2AWG y la longitud en análisis es 10 km, se visualizan en la Tabla 3.17, se muestran tanto las mediciones en el alimentador primario, como en el circuito secundario, estas mediciones muestran los valores de voltaje y corriente en por unidad, que al ser comparadas con CYME en cada una de las mediciones, permite encontrar su porcentaje de error. Las tablas que contienen los valores para el resto de las longitudes se direccionan al ANEXO U.

Tabla 3.17. Alimentador primario 2AWG, L=10 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el alimentador primario caso 1						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.000286	0.000273	4.55	0.153728	0.153849	0.08
2	0.000288	0.000295	2.43	0.153728	0.153574	0.10
3	0.000289	0.000299	3.46	0.153728	0.153407	0.21
4	0.000292	0.000274	6.16	0.153728	0.153503	0.15
5	0.000287	0.000269	6.27	0.153824	0.153773	0.03
6	0.000288	0.000278	3.47	0.153871	0.153694	0.12
7	0.000292	0.000313	7.19	0.153967	0.153692	0.18
8	0.000292	0.000312	6.85	0.154349	0.154723	0.24
9	0.000288	0.000294	2.08	0.154254	0.154220	0.02
10	0.000289	0.000294	1.73	0.154254	0.154069	0.12
11	0.000291	0.000321	10.31	0.154349	0.154165	0.12
12	0.000293	0.000319	8.87	0.154445	0.154649	0.13
13	0.000291	0.000290	0.34	0.154971	0.154899	0.05
14	0.000294	0.000308	4.76	0.155497	0.155635	0.09
15	0.000298	0.000327	9.73	0.155544	0.155261	0.18
16	0.000301	0.000326	8.31	0.155592	0.155334	0.17

Es así, que el porcentaje de error existente en las mediciones de corriente y voltaje en por unidad, tiene como resultados porcentajes de error por debajo del 0.25% lo que demuestra que el error existente entre la medición práctica y la medición teórica no difiere demasiado, los valores obtenidos se encuentran dentro de un margen tolerable y que permiten demostrar la efectividad del sistema de distribución a escala.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- El diseño y construcción del sistema de distribución de 13.8 kV a escala para la elaboración de prácticas en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica, permite tener una representación física de las impedancias que conforman los principales calibres y distancias utilizados en distribución de energía eléctrica a nivel nacional, mostrando de manera visual e inalámbrica, caídas de voltaje, corriente y otros parámetros.
- La matriz de impedancia por fase del conductor del sistema de distribución de 13.8 kV tanto en medio como bajo voltaje, se define a través de las matrices reducidas obtenidas en el software de distribución CYMDIST de CYME de la simulación de un sistema de 13.8 kV con varios calibres y a varias distancias de conductor.
- Dado que el software CYMDIST de CYME realiza una simulación de un flujo de distribución en un sistema determinado, al obtener la matriz de impedancia por fase de la línea, puede diferir en algunos decimales con los obtenidos de manera matemática, esto debido a que el software de simulación toma en cuenta otros parámetros como: la conexión del transformador, distancia exacta entre fases, naturaleza del conductor, entre otros.
- El planteamiento y construcción del sistema de distribución de 13.8 kV, existente a nivel nacional, permite tener una emulación monofásica de un sistema de distribución, mediante el escalamiento en por unidad (p.u.) con sus respectivos parámetros eléctricos, a ser utilizada en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica para estudios de caídas de voltaje y corriente, para diferentes escenarios.
- La implementación de un sistema de refrigeración, direccionado específicamente a las resistencias que representan a los conductores del alimentador primario y a los conductores del circuito secundario, permite evitar un error considerable en las mediciones de caída de voltaje, debido al efecto Joule. La temperatura alcanzada y disipada puede llegar a ser grande, es así que el uso de un sistema de refrigeración permite tener una temperatura casi constante.
- La caída de voltaje en los conductores depende directamente de la impedancia que se genera, que en parte depende del material que se utilice. En las simulaciones

realizadas en este proyecto de titulación se evidencia que, al utilizar aluminio como conductor, las caídas de voltaje se incrementan considerablemente en comparación al cobre, lo ideal sería hacer uso del cobre en el conductor pero no es posible debido a su alto costo.

- Debido a que existe una remanencia de voltaje o inducción residual en el material ferromagnético que conforma el núcleo de las bobinas del modelo a escala, tanto en medio voltaje como bajo voltaje, se genera un voltaje alterno que interfiere en las mediciones de las placas en corriente continua encargadas de la transmisión inalámbrica, ocasionando que las lecturas de voltaje y corriente en por unidad no sean precisas.
- La obtención de la matriz de impedancias por fase, depende en gran medida de la geometría, distancia, configuración de los conductores, tanto en medio voltaje como en bajo voltaje, la variación de esta geometría causará que la matriz se vea modificada, determinando que las caídas de voltaje y corriente en un tramo determinado dependan directamente de estos parámetros.
- Al realizar la modelación del sistema de distribución, se pudo determinar que al utilizar distancias muy largas en un alimentador primario debido a la naturaleza capacitiva que tiene la línea, se produce un sobrevoltaje en el extremo de la línea con un efecto muy similar al efecto Ferranti presente en líneas de transmisión a grandes distancias, debido al modelo de línea corta que si bien es cierto desprecia el valor de la capacitancia, en altos voltajes y altas distancias es necesario tomarlas en consideración.
- De manera general se puede concluir que la menor caída de voltaje se puede obtener cuando se tiene el mayor calibre de conductor a una menor distancia, tanto para el alimentador primario como para el circuito secundario. Sin embargo, es necesario considerar el costo que tendría dicho calibre en una instalación real en cuanto a un conductor bien dimensionado y que cumpla con las caídas de voltaje estandarizadas.
- Haciendo uso de software dedicado a sistemas de distribución CYMDIST de CYME, se considera que la caída de voltaje en el sistema a escala no supere el 3%, para determinar el calibre óptimo en una comparación de varios calibres y varias distancias, encontrando de manera eficaz el mejor de los casos.

- Para el escalamiento en el sistema de distribución, se toma en consideración que se tendrán los mismos valores en por unidad, tanto en el sistema a escala como en el sistema real. Las bases del sistema de distribución real en voltaje serán 13.8 kV/220V y 50 kVA, y para el sistema a escala 120V/60V y 50 VA respectivamente.
- Los valores de resistencia que se han obtenido al realizar los arreglos serie y paralelo tienen un porcentaje de error por debajo de 3.15%, debido en gran parte que los valores de resistencia existentes en el mercado son estandarizados e impiden llegar al valor exacto que necesita la impedancia, por otro lado, el porcentaje de error obtenido de las inductancias está por debajo del 3.78% y es debido a que existe una variación de medición entre un inductómetro construido y uno comercial.
- La implementación de una API REST como medio de interacción, entre el voltímetro inalámbrico y el software de visualización que es accesible a través de un navegador web en el computador del usuario, nos permite establecer una comunicación eficiente sin la necesidad de un proceso de instalación complejo.
- En los sistemas de distribución el efecto capacitivo presente es muy pequeño, por lo que llega a ser despreciable, esto se pone en evidencia en este proyecto de titulación cuando al simular circuitos secundarios con conductor preensamblado dicho efecto es prácticamente nulo y esto se evidencia en la simulación al tener como resultado un valor de admitancia cercano a cero.
- El valor de corriente presente en los conductores permanece relativamente constante, para las diferentes longitudes y calibres de conductores presentes en este proyecto de titulación, esto es debido a que la carga empleada tanto en la simulación como en la implementada en el prototipo es la misma para todos y cada uno de los casos.
- Al comparar los valores de corrientes que nos brinda el software de simulación CYMDIST de CYME con los valores de corrientes obtenidos del sistema prototipo, el porcentaje de error bordea en muchos de los casos el 14 %, esto es debido a que los valores de corriente son muy pequeños y esto hace que los elementos de medición empleados tengan menor exactitud y por lo tanto incrementa el error.
- El uso de un sistema de medición inalámbrico dentro de los sistemas de distribución principalmente en los conductores de bajo voltaje llega a ser de gran utilidad, ya

que permite que el personal técnico no tenga un contacto cercano con el cableado y más bien logre obtener las mediciones desde una distancia prudente y segura.

- Los resultados de caída de voltaje en la simulación del sistema a 13.8 kV tiene como valores 3.9478 V y 2.0744 V para medio voltaje y bajo voltaje respectivamente, mientras que los valores obtenidos en el prototipo son 0.03432 V y 0.56574 V. El sistema real y el sistema prototipo no conlleva una misma relación ya que en el sistema real la relación de voltaje es de 13800 V a 220 V, mientras que en el sistema prototipo la relación es de 120 V a 60 V.
- La incorporación de un módulo ZMPT101B nos permite convertir valores de voltaje AC a voltaje DC, esto es de vital importancia, ya que el conversor análogo a digital del módulo ESP32 es capaz de trabajar únicamente con mediciones de voltaje DC, es por esto la utilidad de este módulo en cuanto a las caídas de voltaje, tomando como punto de partida que el módulo prototipo trabaja con corriente alterna.

4.2. RECOMENDACIONES

- En la implementación de las resistencias que emulan la impedancia del alimentador primario (A/P) y del circuito secundario (C/S), la potencia disipada por las resistencias está en el rango de los 20 W, se recomienda la utilización de un sistema de refrigeración que permita disipar el calor generado debido al efecto Joule en las mismas, evitando posibles sobrecalentamientos, cortocircuitos y mal funcionamiento del sistema a escala.
- Se recomienda utilizar elementos de buena calidad en la construcción del sistema a escala, como cableado, borneras, protecciones, con el fin de que se tenga una larga durabilidad y confiabilidad en el sistema a escala.
- Para obtener los componentes tanto resistivo como inductivo de la impedancia que conforman los diversos conductores del sistema de distribución, se recomienda utilizar el software CYMDIST de CYME que además es utilizado en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica, para la obtención de las matrices de impedancia de manera más precisa, y que se corroboran mediante los cálculos necesarios.
- Se recomienda utilizar el sistema en por unidad (p.u.) para proyectos en los que se vea involucrado el escalamiento de parámetros eléctricos, esto facilita los cálculos cuando haya que trabajar a partir de un sistema trifásico y obtener un equivalente monofásico, utilizando una base en común.

- Se recomienda diseñar un sistema de medición inalámbrica, cuyos datos sean enviados por medio de tecnología Wi-Fi, esto debido a que la utilización de otras tecnologías como Bluetooth pueden generar errores en las lecturas, interferencias con dispositivos cercanos al módulo, entre otros fallos propios de este tipo de redes inalámbricas.
- Al trabajar con componentes electrónicos de corriente continua DC y elementos alimentados con corriente alterna AC, es necesario tener un sistema de aislamiento que permite acoplar los elementos de corriente alterna con los elementos de corriente continua, con el fin de evitar corrientes remanentes o parasitas que provoquen fallas en los sistemas microprocesados.
- Para tener mejor estabilidad en las mediciones tanto de voltaje como de corriente en los elementos de un prototipo a escala, es esencial utilizar un regulador de voltaje como fuente de alimentación con el fin de disminuir cambios considerables o variaciones de voltaje, mitigando el error en cada una de las mediciones.
- Para realizar la conexión de los diversos casos en el módulo, se recomienda desenergizar el sistema a través del breaker presente en el tablero de conexión, de esta forma y sin energía se evita hacer falsos contactos, cortocircuito o electrocuciones que podría sufrir el usuario al manipular en caliente.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. A. Vergara Murillo, "ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA PRIMARIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA S/E 16, RÍO COCA DE LA EEQ S.A", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2010. Accedido: feb. 25, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2016/1/CD-2842.pdf>
- [2] S. Ramírez Castaño, *Redes de Distribución de Energía*, 3.^a ed., vol. 1. Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Manizales, 2004.
- [3] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, "PLAN MAESTRO DE ELECTRICIDAD 2016-2025", 2016, Accedido: jun. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/plan-maestro-de-electricidad-2016-2025>
- [4] M. A. Lucio Castro, "Folleto de Construcciones Eléctricas", vol. 1, 2015.
- [5] Empresa Eléctrica Quito, "NORMAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARTE A", vol. 1, Accedido: jun. 30, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.eeq.com.ec:8443/documents/10180/921866/Gu%C3%ADa+para+dise%C3%B1o+de+redes+para+distribuci%C3%B3n/b681b238-2c70-4ee6-b737-ecca4ca8b55c>
- [6] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, vol. 1. Las Cruces, New Mexico: CRC Press, 2001.
- [7] "¿Qué es la red de distribución y qué elementos la componen?", Accedido: jul. 01, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-red-de-distribucion.html>
- [8] R. Coral y E. Santacruz, "MODELACIÓN DE UN SISTEMA DIGITAL ADECUADO PARA LA FISCALIZACIÓN Y LIQUIDACIÓN AUTOMÁTICA DE OBRAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2008. Accedido: feb. 25, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/904/1/CD-1783%282008-11-19-09-45-09%29.pdf>
- [9] A. E. Fitzgerald, *Electric Machinery*, 6.^a ed., vol. 1. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [10] J. R. Carson, "Electric Circuit Theory and the Operation Calculus", pp. 50-65.
- [11] "ESP32-WROOM-32SE DATASHEET", vol. 1, Accedido: mar. 08, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32se_datasheet_en.pdf
- [12] "Servidor Web", oct. 2019, Accedido: mar. 09, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.webebre.net/que-es-un-servidor-web/>
- [13] "API Rest: ¿Qué es y cómo funciona ese recurso?", 2020, Accedido: mar. 09, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rockcontent.com/es/blog/api-rest/>
- [14] "Servidor web", *Wikipedia, la enciclopedia libre*. ene. 24, 2021. Accedido: mar. 09, 2021. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Servidor_web&oldid=132652156
- [15] M. C. Ramos Chávez y S. R. Tupiza Tupiza, "Diseño y construcción de un modelo a escala de la línea de transmisión de 500 kV coca codo sinliar- el inga para el laboratorio de sistemas eléctrico de potencia", Escuela Politécnica Nacional, 2018. Accedido: feb. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19454/1/CD-8850.pdf>
- [16] Bhag S. Guru, *Maquinas Eléctricas y Transformadores*, 5.^a ed., vol. 1. New York: Universidad de Oxford, 2003. Accedido: mar. 11, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/27018835/Maquinas_Electricas_y_transformadores_Bhag_S_Guru_pdf
- [17] M. Olmo y R. Nave, *Inductance of a Toroid*, 1.^a ed., vol. 1. United States, 2017. Accedido: feb. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/indtor.html>
- [18] A. R. Gómez, "LA BOBINA REAL CON NÚCLEO DE HIERRO", vol. 1, p. 17.

- [19] J. L. Galán García, *Sistemas de Unidades Físicas*, 1.^a ed., vol. 1. Colombia: Reverté, 1987.
- [20] "Arduino Inductance Basic", 2016, Accedido: nov. 25, 2020. [En línea]. Disponible en: http://electronoobs.com/eng_arduino_tut10_3.php
- [21] "ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation", Accedido: may 16, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>
- [22] G. F. di Mauro, J. A. Suárez, D. O. Anaut, R. R. di Mauro, y C. A. Agüero, "Pérdidas Joule en alimentadores que transportan corrientes armónicas en baja tensión", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 21, n.º 3, pp. 372-379, dic. 2013.
- [23] L. R. Pino y R. X. Valencia Moya, *APLICACIÓN DE CABLE PREENSAMBLADO Y TRANSFORMADORES TIPO PEDESTAL EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN*, vol. 1. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/390>

ANEXOS

ANEXO A. Datos de los conductores de fase y neutro más utilizados en sistemas de distribución

ANEXO B. Datos de los conductores en medio y bajo voltaje obtenidos en CYMDIST

ANEXO C. Subrutina para encontrar la matriz de impedancia Z_{abc} , caídas de voltaje y corriente en CYMDIST de CYME

ANEXO D. Subrutina para determinar los valores de R y L de forma directa usando un programa de MATLAB, partiendo de la matriz de impedancias brindada por CYMDIST de CYME

ANEXO E. Impedancia $R+jX$ para distintos casos de calibre y distancia

ANEXO F. Subrutina para la obtención de las caídas de voltaje en Simulink de MATLAB del sistema de 13.8kV, así como en el modelo a escala de 120 V

ANEXO G. Subrutina para la obtención de valores de corriente en las simulaciones de CYMDIST de CYME

ANEXO H. Caídas de voltaje en por unidad para los distintos casos de conductor

ANEXO I. Valores de corrientes para longitudes de 15 km, 20 km y 25 km referidos a los conductores en medio voltaje y todas las combinaciones de calibre y longitud en bajo voltaje

ANEXO J. Cantidad de vueltas por voltio para núcleo de un transformador

ANEXO K. Tabla de calibres de conductor

ANEXO L. Código en Arduino para el resistómetro e inductómetro

ANEXO M. Fotografías de las placas utilizadas en el prototipo y elementos utilizados en la emulación

ANEXO N. Datasheets de los dispositivos electrónicos utilizados en el prototipo

ANEXO O. Subrutina para la programación de la placa de desarrollo ESP32 a través de USB y programación de ATMEGA 164P

ANEXO P. Código que dicta el funcionamiento del multímetro inalámbrico

ANEXO Q. Caídas de voltaje para longitudes de 15 km, 20 km y 25 km referidos a los conductores en medio voltaje

ANEXO R. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para una distancia de 15,20 y 25 km en el alimentador primario

ANEXO S. Capturas de la interfaz del sistema de distribución a escala

ANEXO T. Subrutina para simular el circuito secundario utilizando cable preensamblado

ANEXO U. Valores de voltaje y corriente en por unidad sensadas por el prototipo

ANEXO V. Fotos de varios ángulos del prototipo culminado y funcional con varios casos interconectados

ANEXO W. Manual de usuario del módulo a escala

ANEXO A. Datos de los conductores de fase y neutro más utilizados en sistemas de distribución

Tabla A1. Datos de conductores de fase y neutro

Calibre AWG	Clase	Material	DIÁMETRO Pulgadas	GMR Pies	RES Ω/milla	CAPACIDAD Amperios
1		ACSR	0.355	0.00418	1.38	200
1	7 STRD	COBRE	0.328	0.00992	0.765	270
1	CLASE A	AA	0.328	0.00991	1.224	177
2	6/1	ACSR	0.316	0.00418	1.69	180
2	7 STRD	COBRE	0.292	0.00883	0.964	230
2	7/1	ACSR	0.325	0.00504	1.65	180
2	AWG SLD	COBRE	0.258	0.00836	0.945	220
2	CLASS A	AA	0.292	0.00883	1.541	156
3	6/1	ACSR	0.281	0.0043	2.07	160
3	AWG SLD	COBRE	0.229	0.00745	1.192	190
4	6/1	ACSR	0.25	0.00437	2.57	140
4	7/1	ACSR	0.257	0.00452	2.55	140
4	AWG SLD	COBRE	0.204	0.00663	1.503	170
4	CLASE A	AA	0.232	0.007	2.453	90
5	6/1	ACSR	0.223	0.00416	3.18	120
5	AWG SLD	COBRE	0.1819	0.0059	1.895	140
6	6/1	ACSR	0.198	0.00394	3.98	100
6	AWG SLD	COBRE	0.162	0.00526	2.39	120
6	CLASE A	AA	0.184	0.00555	3.903	65
7	AWG SLD	COBRE	0.1443	0.00468	3.01	110
8	AWG SLD	COBRE	0.1285	0.00416	3.8	90
9	AWG SLD	COBRE	0.1144	0.00371	4.6758	80
10	AWG SLD	COBRE	0.1019	0.00330	5.9026	75
12	AWG SLD	COBRE	0.0808	0.00262	9.3747	40
14	AWG SLD	COBRE	0.0641	0.00208	14.8722	20
16	AWG SLD	COBRE	0.0508	0.00164	23.7262	10
18	AWG SLD	COBRE	0.0403	0.00130	37.6726	5
19	AWG SLD	COBRE	0.0359	0.00116	47.5103	4
20	AWG SLD	COBRE	0.032	0.00103	59.684	3
22	AWG SLD	COBRE	0.0253	0.00082	95.4835	2
24	AWG SLD	COBRE	0.0201	0.00065	151.616	1
1/0		ACSR	0.398	0.00446	1.12	230

1/0	7 STRD	COBRE	0.368	0.01113	0.607	310
1/0	CLASE A	AA	0.368	0.0111	0.97	202
2/0		ACSR	0.447	0.0051	0.895	270
2/0	7 STRD	COBRE	0.414	0.01252	0.481	360
2/0	CLASE A	AA	0.414	0.0125	0.769	230
3/0	12 STRD	COBRE	0.492	0.01559	0.382	420
3/0	6/1	ACSR	0.502	0.006	0.723	300
3/0	7 STRD	COBRE	0.464	0.01404	0.382	420
3/0	CLASE A	AA	0.464	0.014	0.611	263
3/8	STE	ACERO	0.375	0.00001	4.3	150
4/0	12 STRD	COBRE	0.552	0.0175	0.303	490
4/0	19 STRD	COBRE	0.528	0.01668	0.303	480
4/0	6/1	ACSR	0.563	0.00814	0.592	340
4/0	7 STRD	COBRE	0.522	0.01579	0.303	480
4/0	CLASE A	AA	0.522	0.0158	0.484	299
250,000	12 STRD	COBRE	0.6	0.01902	0.257	540
250,000	19 STRD	COBRE	0.574	0.01813	0.257	540
250,000	CON LAY	AA	0.567	0.0171	0.41	329
266,800	26/7	ACSR	0.642	0.0217	0.385	460
266,800	CLASS A	AA	0.586	0.0177	0.384	320
300,000	12 STRD	COBRE	0.657	0.0208	0.215	610
300,000	19 STRD	COBRE	0.629	0.01987	0.215	610
300,000	26/7	ACSR	0.68	0.023	0.342	490
300,000	30/7	ACSR	0.7	0.0241	0.342	500
300,000	CON LAY	AA	0.629	0.0198	0.342	350
336,400	26/7	ACSR	0.721	0.0244	0.306	530
336,400	30/7	ACSR	0.741	0.0255	0.306	530
336,400	CLASE A	AA	0.666	0.021	0.305	410
350,000	12 STRD	COBRE	0.71	0.0225	0.1845	670
350,000	19 STRD	COBRE	0.679	0.0214	0.1845	670
350,000	CON LAY	AA	0.679	0.0214	0.294	399
397,500	26/7	ACSR	0.783	0.0265	0.259	590
397,500	30/7	ACSR	0.806	0.0278	0.259	600
397,500	CLASE A	AA	0.724	0.0228	0.258	440
400,000	19 STRD	COBRE	0.726	0.0229	0.1619	730
450,000	19 STRD	COBRE	0.77	0.0243	0.1443	780
450,000	CON LAG	AA	0.77	0.0243	0.229	450
477,000	26/7	ACSR	0.858	0.029	0.216	670

477,000	30/7	ACSR	0.883	0.0304	0.216	670
477,000	CLASE A	AA	0.795	0.0254	0.216	510
500,000	19 STRD	COBRE	0.811	0.0256	0.1303	840
500,000	37 STRD	COBRE	0.814	0.026	0.1303	840
500,000	CON LAY	AA	0.813	0.026	0.206	483
565,500	26/7	ACSR	0.927	0.0313	0.1859	730
565,500	30/7	ACSR	0.953	0.0328	0.1859	730
565,500	CLASE A	AA	0.858	0.0275	0.186	560
600,000	37 STRD	COBRE	0.891	0.0285	0.1095	940
600,000	CON LAY	AA	0.891	0.0285	0.172	520
605,000	26/7	ACSR	0.966	0.0327	0.172	760
605,000	54/7	ACSR	0.953	0.0321	0.1775	750
636,000	27/7	ACSR	0.99	0.0335	0.1618	780
636,000	30/19	ACSR	1.019	0.0335	0.1618	780
636,000	54/7	ACSR	0.977	0.0329	0.1688	770
636,000	CLASE A	AA	0.918	0.0294	0.163	620
666,600	54/7	ACSR	1	0.0337	0.1601	800
700,000	37 STRD	COBRE	0.963	0.0308	0.0947	1040
700,000	CON LAY	AA	0.963	0.0308	0.148	580
715,500	26/7	ACSR	1.051	0.0355	0.1442	840
715,500	30/19	ACSR	1.081	0.0372	0.1442	840
715,500	54/7	ACSR	1.036	0.0349	0.1482	830
715,500	CLASE A	AA	0.974	0.0312	0.145	680
750,000	37 STRD	AA	0.997	0.0319	0.0888	1090
750,000	CON LAY	AA	0.997	0.0319	0.139	602
795,000	26/7	ACSR	1.108	0.0375	0.1288	900
795,000	30/19	ACSR	1.14	0.0393	0.1288	910
795,000	54/7	ACSR	1.093	0.0368	0.1378	900
795,000	CLASE A	AA	1.026	0.0328	0.131	720

ANEXO B. Datos de los conductores en medio y bajo voltaje obtenidos en CYMDIST

Tabla B1. Datos del conductor de fase en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE FASE	
4/0 AWG ACSR 6AL1ST PENGUIN AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	340 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	211.17 kcmil
Diámetro interno	0.18779 pulgada
Diámetro externo	0.563 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.09768 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.592 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.592 ohm/milla

Tabla B2. Datos del conductor de neutro en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE NEUTRO	
4/0 AWG ACSR 6AL1ST PENGUIN AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	340 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	211.17 kcmil
Diámetro interno	0.18779 pulgada
Diámetro externo	0.563 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.09768 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.592 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.592 ohm/milla

Tabla B3. Datos del conductor de fase en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE FASE	
3/0 AWG ACSR 6AL1ST PIGEON AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	300 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	167.75 kcmil
Diámetro interno	0.16721 pulgada
Diámetro externo	0.502 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.07201 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.723 ohm/milla

Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.723 ohm/milla
---	-----------------

Tabla B4. Datos del conductor de neutro en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE NEUTRO	
3/0 AWG ACSR 6AL1ST PIGEON AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	300 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	167.75 kcmil
Diámetro interno	0.16721 pulgada
Diámetro externo	0.502 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.07201 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.723 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.723 ohm/milla

Tabla B5. Datos del conductor de fase en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE FASE	
2/0 AWG ACSR 6AL1ST QUAIL AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	270 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	133.02 kcmil
Diámetro interno	0.14902 pulgada
Diámetro externo	0.447 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06118 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla

Tabla B6. Datos del conductor de neutro en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE NEUTRO	
2/0 AWG ACSR 6AL1ST QUAIL AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	270 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	133.02 kcmil
Diámetro interno	0.14902 pulgada
Diámetro externo	0.447 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06118 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla

Tabla B7. Datos del conductor de fase en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE FASE	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	180 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	66.31 kcmil
Diámetro interno	0.12988 pulgada
Diámetro externo	0.325 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06047 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla

Tabla B8. Datos del conductor de neutro en bajo voltaje.

CONDUCTOR DE NEUTRO	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal	13.8 kV
Corriente nominal	180 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	66.31 kcmil
Diámetro interno	0.12988 pulgada
Diámetro externo	0.325 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.06047 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	1.65 ohm/milla

ANEXO C. Subrutina para encontrar la matriz de impedancia Z_{abc} , caídas de voltaje y corrientes en CYMDIST de CYME

A continuación, se describe el procedimiento para obtener las impedancias equivalentes y correspondientes a cada uno de los conductores involucrados en el proyecto de titulación. Se inicia creando el archivo en CYMDIST de CYME y se guardará con el nombre que se considere conveniente, dicho esto se selecciona la pestaña “Nuevo Estudio”, este paso inicial se muestra en la Figura C1.

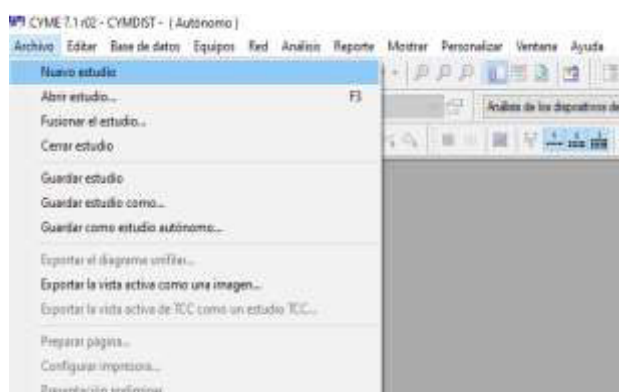


Figura C1. Creación de un nuevo estudio en CYMDIST de CYME

Se selecciona un modelo en blanco, el cual servirá de base para crear el sistema de distribución a 13.8 kV y todos los elementos que lo constituyen, esto se muestra claramente en la Figura C2.



Figura C2. Creación de un archivo en blanco para colocar los elementos

En el bloque de elementos que se encuentra en la parte izquierda, se toman todos los elementos necesarios para armar el sistema de distribución completo. Todos los elementos que constituyen el sistema de distribución interconectados lógicamente se muestran en la Figura C3.

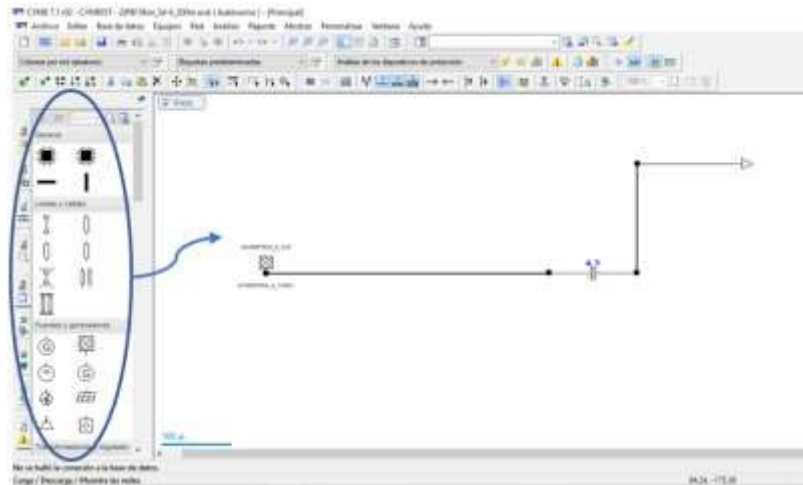


Figura C3. Creación de la subrutina para obtener parámetros del sistema

Una vez armado el sistema por completo, en el entorno de CYMDIST, abrimos la pestaña “Equipos”, la cual despliega un menú que nos permitirá cargar valores en todos los elementos necesarios para armar el sistema a 13.8 kV. La lista de elementos a ser asignados un valor específico se muestra en la Figura C4

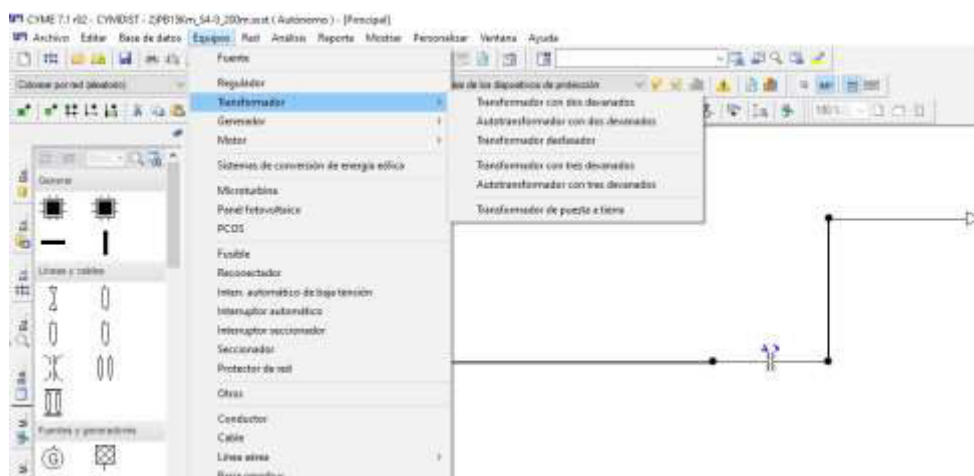


Figura C4. Lista de elementos que conforman el sistema de distribución.

Se asigna los valores específicos a cada uno de los elementos del sistema de distribución como barra de alimentación, líneas, conductores, transformador, carga; para el caso se indica el valor asignado en el transformador. Un ejemplo de asignación de valores se muestra en la Figura C5.

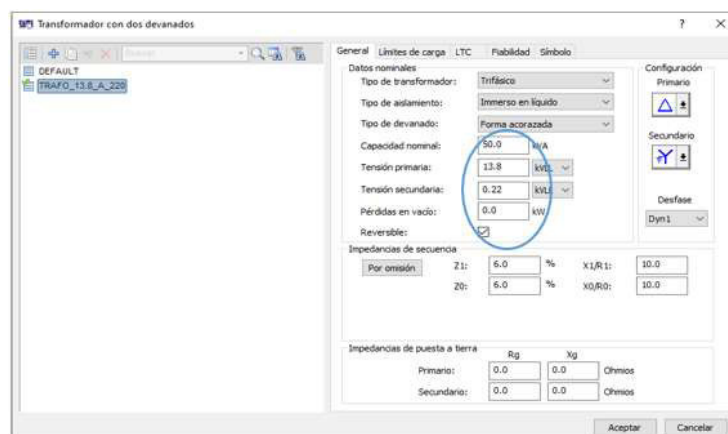


Figura C5. Asignación de valores específicos para cada elemento del sistema.

Una vez ingresado los valores correspondientes a cada uno de los elementos del sistema, podemos obtener la matriz de impedancias tanto en el conductor del lado de medio voltaje como en el conductor en el lado de bajo voltaje, como se aprecia en la Figura C6 y Figura C7 respectivamente.

Impedancias equivalentes		A	B	C	
Z [ABC] =		1.877 + j1.401	0.2314 + j0.5711	0.2314 + j0.5711	Ohmios/mi
		0.2314 + j0.5711	1.883 + j1.394	0.2314 + j0.5711	
		0.2314 + j0.5711	0.2314 + j0.5711	1.884 + j1.394	

Figura C6. Matriz de impedancias en el lado de medio voltaje.

y,

Impedancias equivalentes		A	B	C	
Z [ABC] =		0.767 + j1.135	0.1601 + j0.4868	0.1601 + j0.4868	Ohmios/mi
		0.1601 + j0.4868	0.7511 + j1.186	0.1601 + j0.4868	
		0.1601 + j0.4868	0.1601 + j0.4868	0.7401 + j1.223	

Figura C7. Matriz de impedancias en el lado de bajo voltaje.

El valor de las impedancias obtenidas mediante la simulación es el punto de partida para el escalamiento y posterior construcción de resistencias y reactancias inductivas a implementar en el prototipo.

Con los valores de impedancias en los conductores tanto en medio voltaje como en bajo voltaje, se procede a correr un flujo de carga, con el afán de obtener las caídas de voltaje existente en los conductores. La pestaña que contiene la opción de flujo de carga se indica con detalle en la Figura C8.

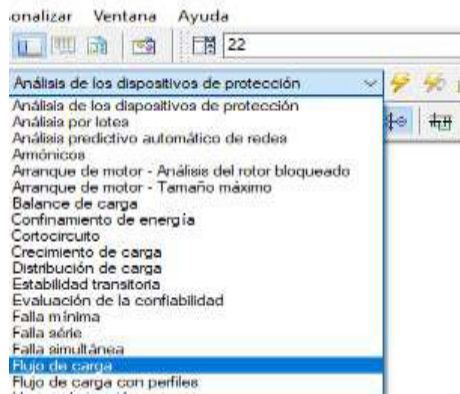


Figura C8. Pestaña donde se encuentra la opción flujo de carga.

Finalmente, para obtener los resultados de caída de voltaje tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje, procedemos a dar clic en las pestañas “Cuadro de Resultados” y luego en “Cuadro de Flujo de Carga”, para de esta forma obtener los valores de caída de voltaje y los valores de corriente de los conductores dentro de la simulación, esto para el lado de medio voltaje y bajo voltaje. Los valores de voltaje y corriente en cualquier punto se despliegan en un cuadro como se puede observar en la Figura C9.

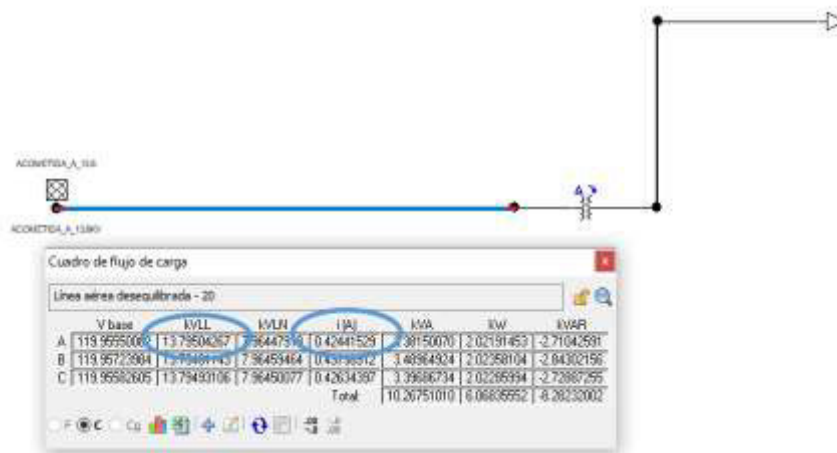


Figura C9. Tabla de valores de voltajes y corrientes.

Los valores obtenidos de voltaje y corriente son los que posteriormente se compararán con los valores obtenidos en el prototipo, siendo prácticamente los mismo en su representación bajo el sistema por unidad (p.u.).

ANEXO D. Subrutina para determinar los valores de R y L de forma directa partiendo de la matriz de impedancias brindada por CYMDIST de CYME

A continuación, se describe el procedimiento para obtener los valores de R y L en ohmios y en mili Henrios respectivamente. Se empieza por crear el archivo en MATLAB previamente programado para el requerimiento, como se indica en la Figura D1.

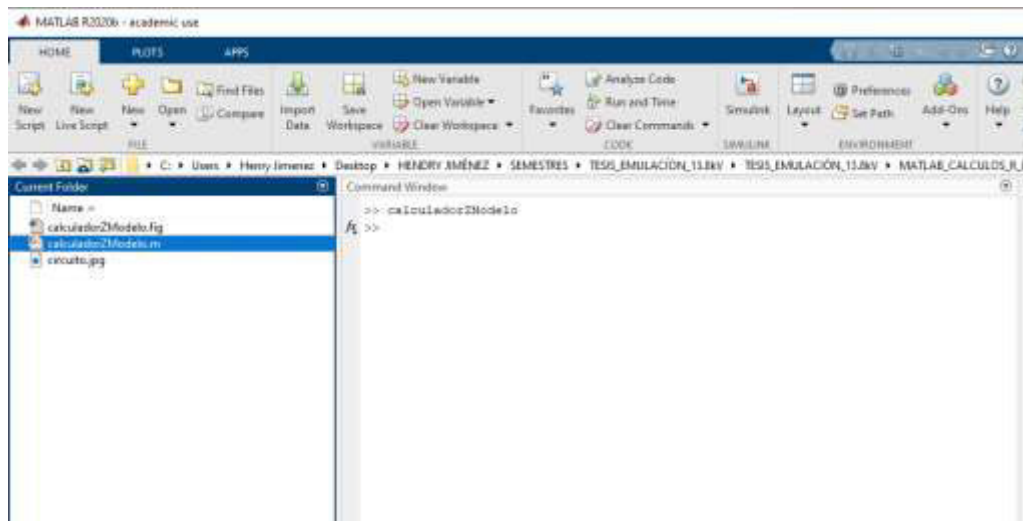


Figura D1. Archivo que contiene la programación.

Se ejecuta el programa, direccionando a una interfaz amigable con el usuario que nos permite ingresar los parámetros de resistencia R y reactancia inductiva jXL que se obtuvo inicialmente en CYMDIST. La interfaz donde se ingresan dichos valores se muestra claramente en la Figura D2.

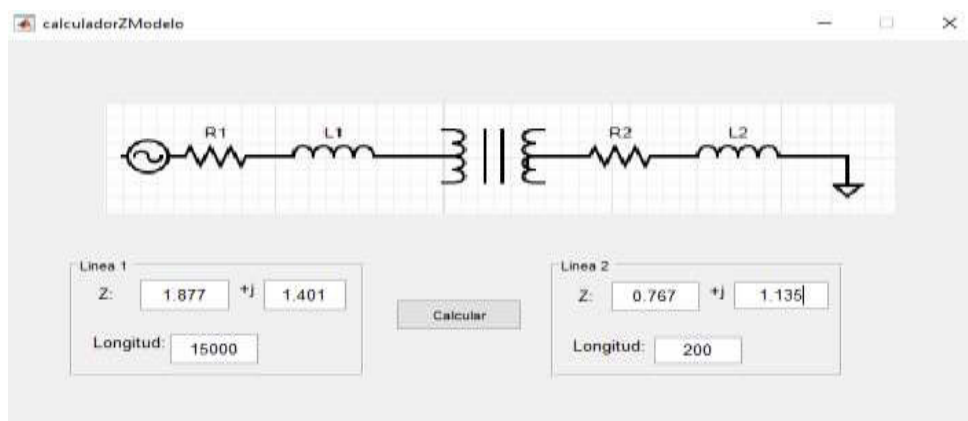


Figura D2. Interfaz donde se ingresa los valores de impedancia

Una vez que se tiene la interfaz gráfica se procede a ingresar los parámetros de impedancia tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje como se indica en la Figura D3.

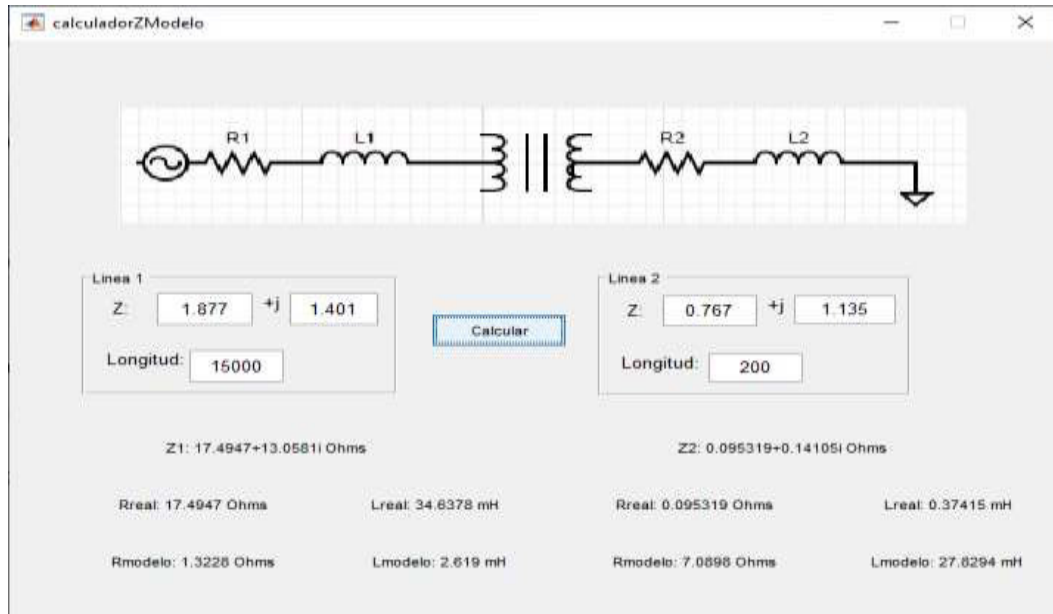


Figura D3. Valores de R y L en ohmios, del sistema real y del prototipo

ANEXO E. Impedancia R+jX para distintos casos de calibre y distancia

Tabla E1. Datos de conductores en medio voltaje

CALIBRE		LONGITUD EN (km)	10	15	20	25
2 AWG ACSR	R (Ω)		11.6632	17.4947	23.3263	29.1579
	L(mH)		23.0919	34.6378	46.1838	57.7297

Tabla E2. Datos de conductores en bajo voltaje

CALIBRE		LONGITUD EN (m)	150	200	250	300
2 AWG ACSR	R (Ω)		0.1784	0.23786	0.2973	0.3567
	L(mh)		0.3357	0.44766	0.5595	0.6714
2/0 AWG ACSR	R (Ω)		0.1035	0.13807	0.17259	0.2071
	L(mH)		0.3083	0.41107	0.51384	0.6166
3/0 AWG ACSR	R (Ω)		0.0854	0.11392	0.1424	0.1708
	L(mH)		0.2961	0.39492	0.4936	0.5923
4/0 AWG ACSR	R (Ω)		0.0714	0.0953	0.1191	0.1429
	L(mH)		0.2806	0.3741	0.4676	0.5612

ANEXO F. Subrutina para la obtención de las caídas de voltaje en Simulink de MATLAB del sistema de 13.8kV, así como en el modelo a escala de 120V.

A continuación, se describe el procedimiento para obtener las caídas de voltaje en el lado de medio voltaje 13.8kV, como en el lado de bajo voltaje 120V (prototipo a escala). Se empieza por crear el archivo en Simulink de MATLAB y se guarda con el nombre que se considere conveniente, dicho esto se selecciona la pestaña “Start Simulink”, como se muestra en la Figura F1 y Figura F2.

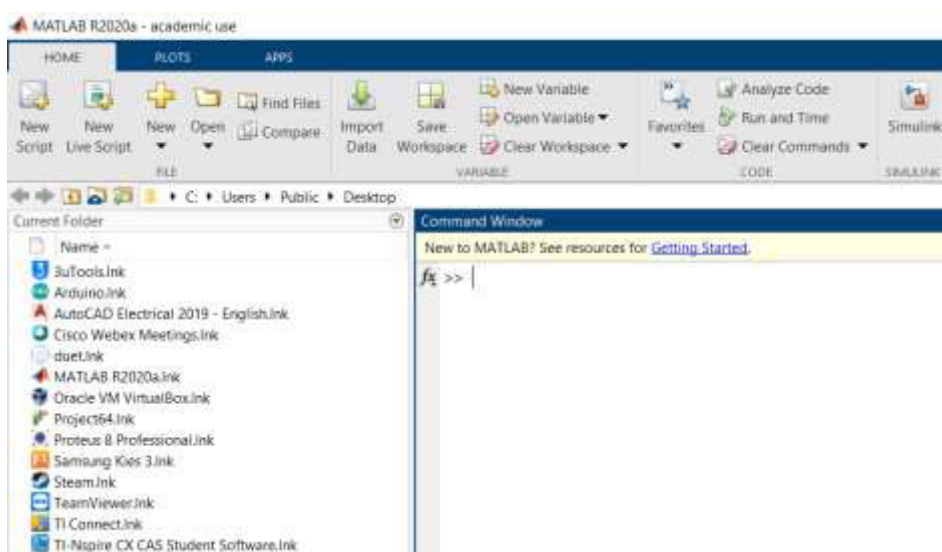


Figura F1. Creación de la subrutina para la obtención de las caídas de voltaje.

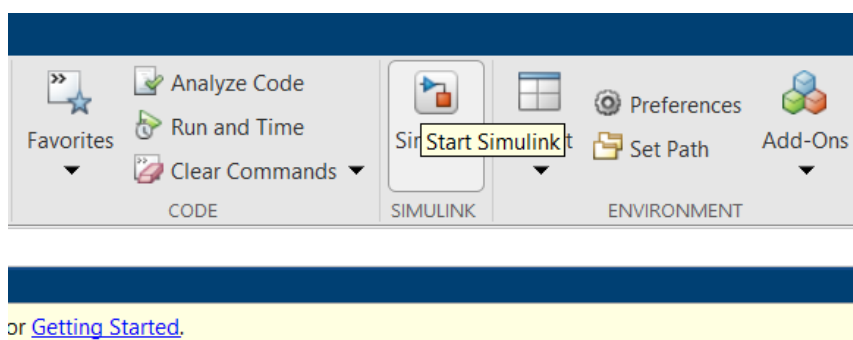


Figura F2. Creación del proyecto en Simulink de Matlab.

Se selecciona un modelo en blanco, el cual servirá de base para crear nuestro esquemático y así obtener las caídas de voltajes, se escoge la pestaña “Create Model”, como se muestra en la Figura F3.

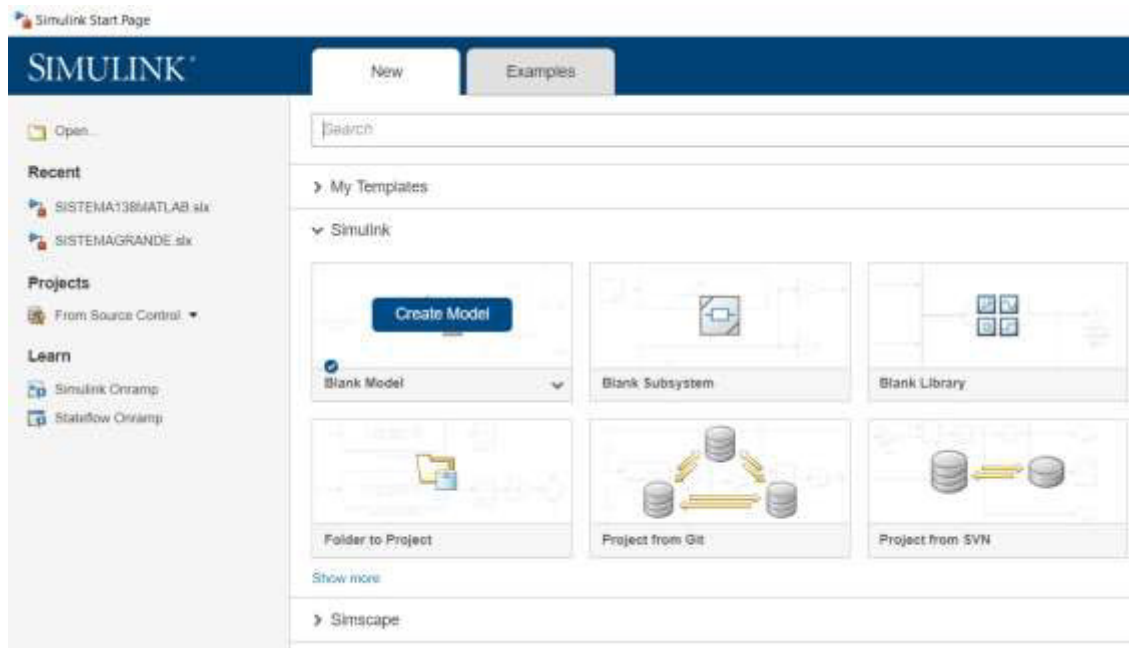


Figura F3. Selección del modelo en blanco.

En el entorno de Simulink, se abre la pestaña “Library Browser”, la cual es la librería que nos permitirá obtener algunos de los elementos del esquemático para proceder a armar el sistema, como se muestra en la Figura F4.

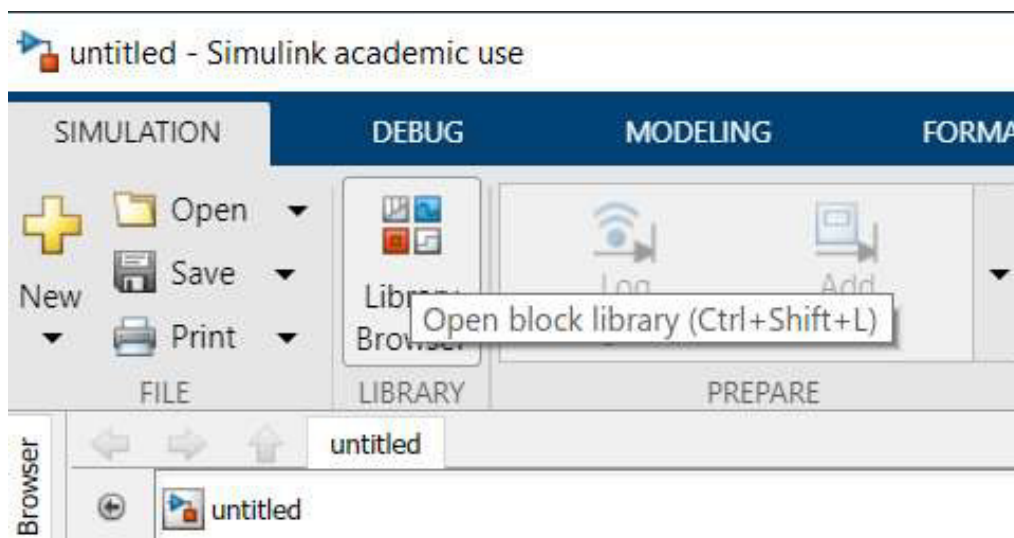


Figura F4. Apertura de la librería de Simulink.

En la librería de Simulink, accedemos al menú de “Simscape” y después se selecciona la pestaña “Electrical” la cual desplegará la mayoría de los elementos que podrán ser usados en el esquema eléctrico del prototipo, como se muestra en la Figura F5

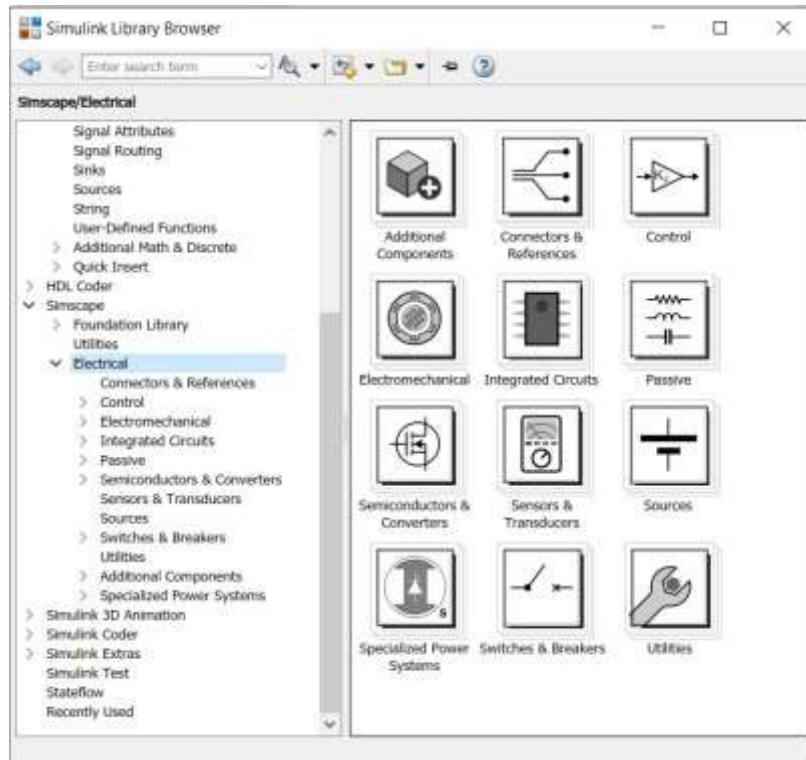


Figura F5. Librería Simscape electrical de Simulink.

Se procede a armar el esquemático del sistema, que básicamente este compuesto por resistencias e inductancias en serie a manera de simular de manera real el comportamiento tanto del alimentador primario como del circuito secundario, en el prototipo a escala, como se muestra en la Figura F6.

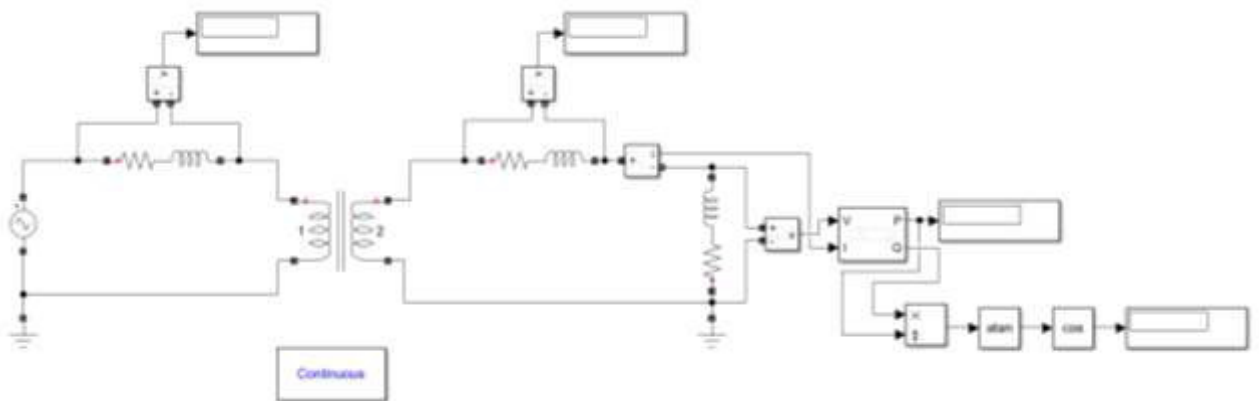


Figura F6. Creación del esquema del circuito en Simulink.

Procedemos a ajustar el voltaje a valor pico, es decir se tiene un voltaje de 13,8kV que será multiplicado por la raíz de dos, y se presiona en “Ok”, como se muestra en la Figura F7.

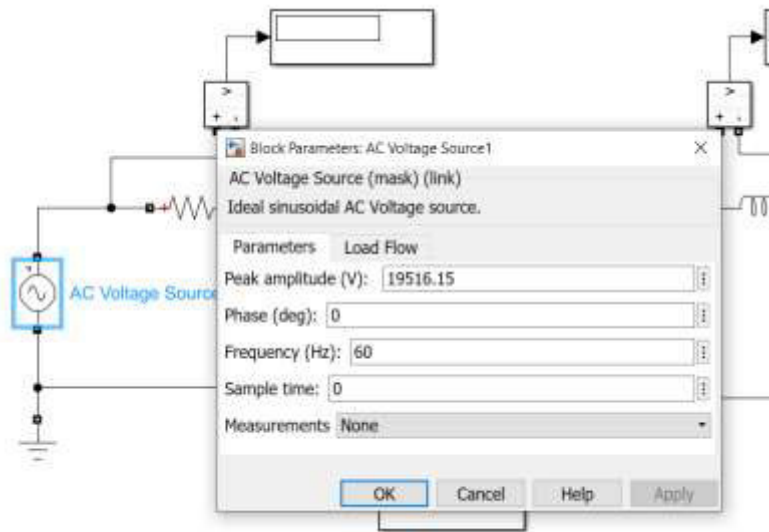


Figura F7. Ajuste de parámetros del circuito.

Se ajusta los valores de la rama serie del alimentador primario, en este caso el valor de la resistencia e inductancia será propio para cada caso de conductor, y se presiona en “Ok”, como se muestra en la Figura F8.

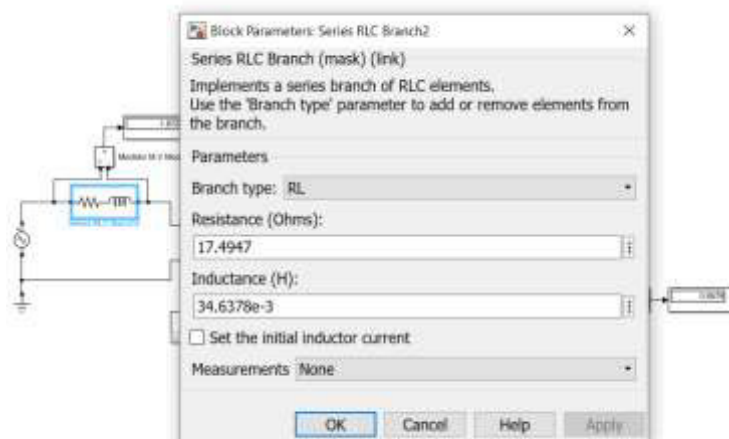


Figura F8. Parámetros serie del alimentador a emular.

Se ajusta los valores del transformador para un voltaje trifásico de 13,8kV en el primario y 220 V a nivel del secundario, y se presiona en “Ok”, como se muestra en la Figura F9.

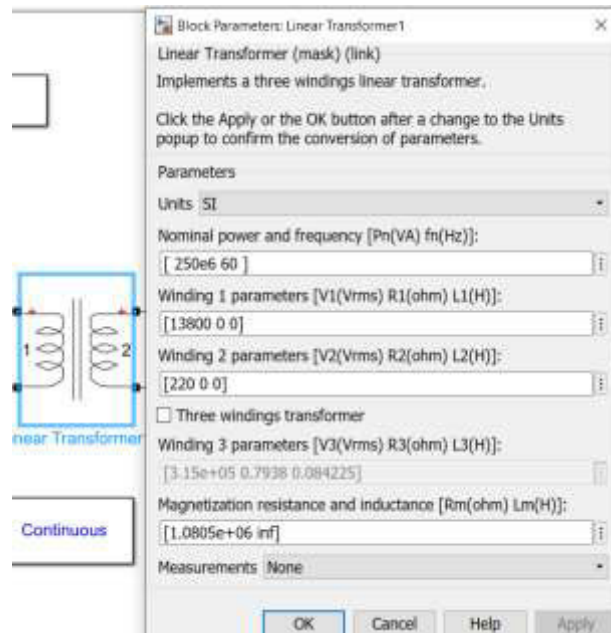


Figura F9. Parámetros del transformador del sistema.

De manera similar, se ajusta los valores de la rama serie del circuito secundario tanto en resistencia como en inductancia, y se presiona en “Ok”, como se muestra en la Figura F10.

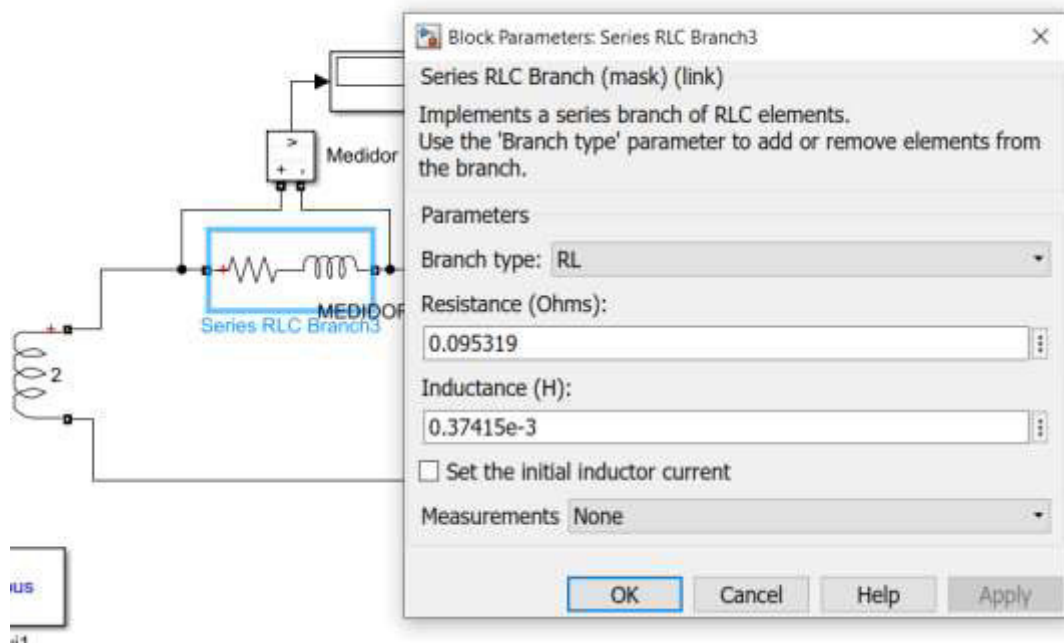


Figura F10. Parámetros serie del circuito secundario.

Se procede a correr el programa con el esquema eléctrico simulado y se presiona en la pestaña “Run”, como se muestra en la Figura F11.

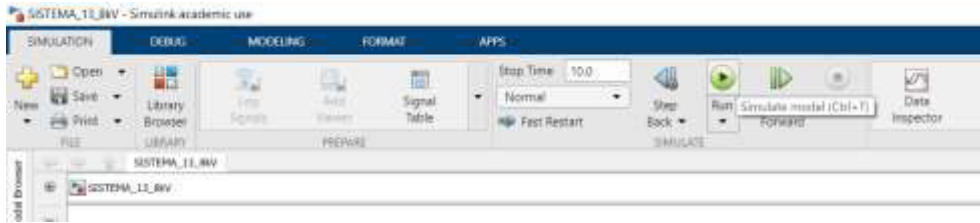


Figura F11. Simulación del esquema en Simulink.

Se procede a ajustar la carga de tal manera que se obtenga un valor en potencia cercano a los 2kW de potencia que se desea emular, y un factor de potencia cercano a 0.95, y se presiona en “Ok”, como se muestra en la Figura F12.

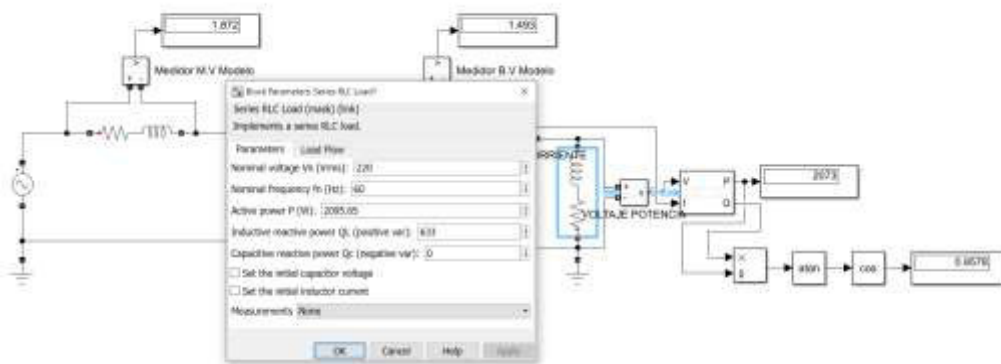


Figura F12. Ajuste de la carga del sistema.

Finalmente, para obtener los resultados de caída de voltaje tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje, se procede a dar click en el bloque “Continuous” de powergui, para de esta forma obtener los valores de voltaje en estado estable, y presionamos “Ok”, como se muestra en la Figura F13.

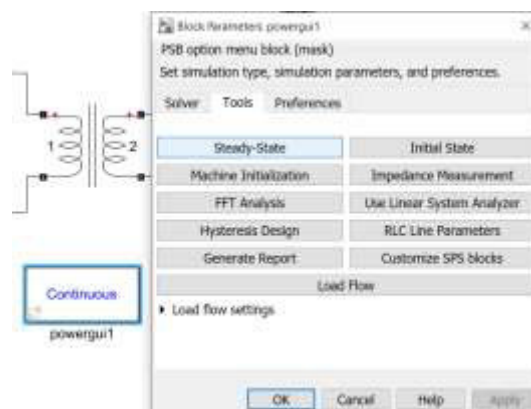


Figura F13. Obtención de los resultados a través del bloque Powergui.

Finalmente se obtiene los voltajes de caída de tensión tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje, denominados en Simulink como 'U_MEDIDOR DE VOLTAJE MV' Y 'U_MEDIDOR DE VOLTAJE BV', que son los valores de voltaje que nos interesan para obtener los valores en por unidad, como se muestra en la Figura F14.

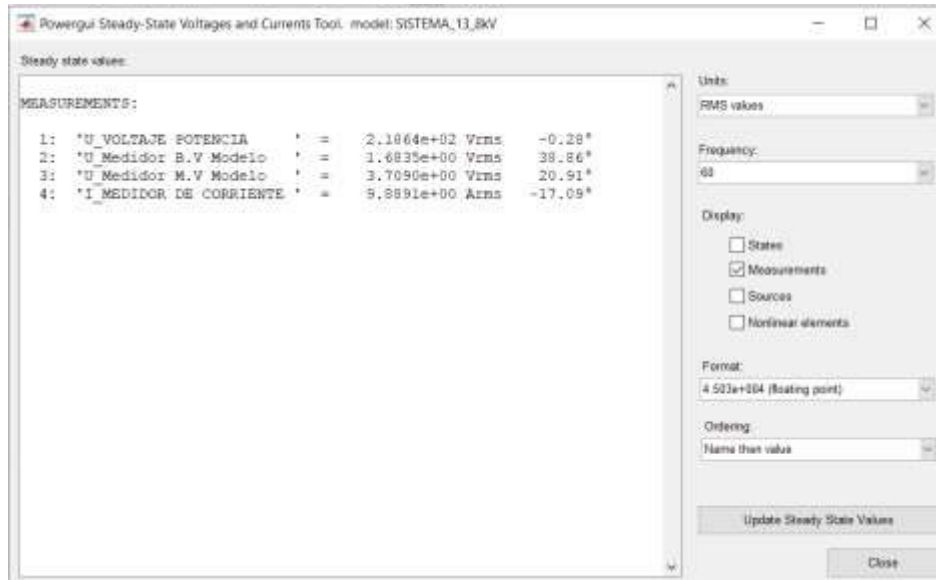


Figura F14. Caídas de voltaje en el lado de bajo voltaje y medio voltaje.

De manera similar se procede en el circuito de 120V en la cual el sistema a elaborar será el siguiente.

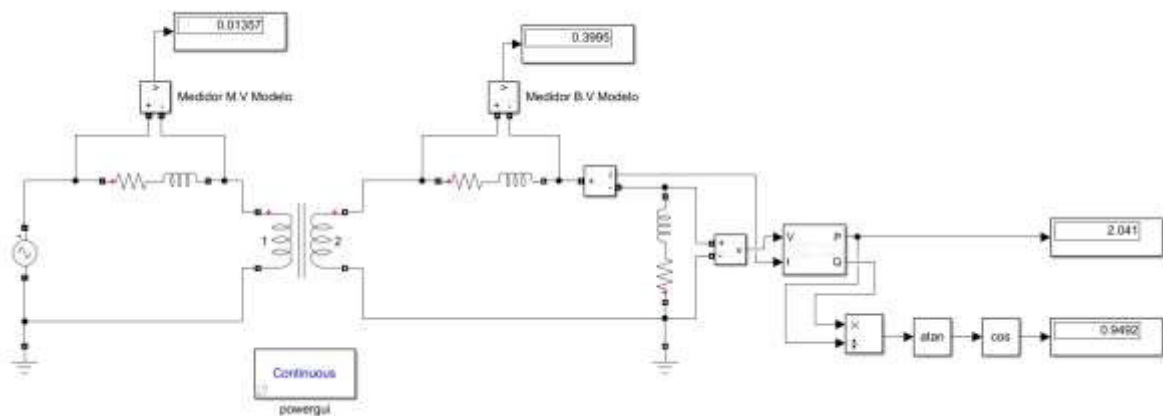


Figura F15. Interfaz del sistema a 120V

Se ajusta los valores de R y L, en el lado de medio voltaje para el modelo, como se muestra en la Figura F16.

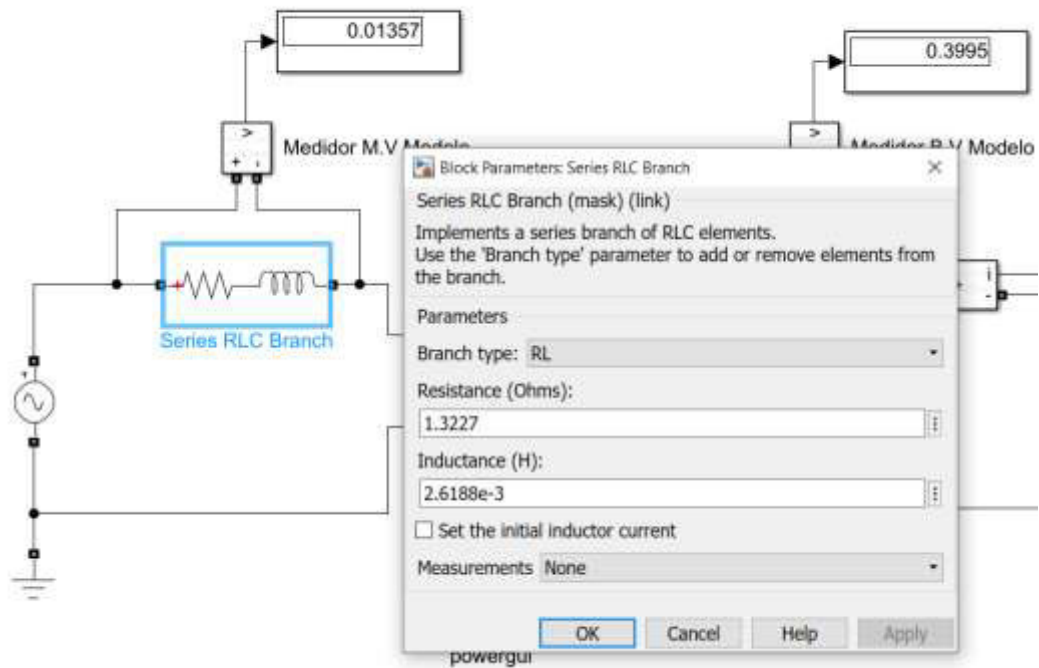


Figura F16. Valores de R y L en medio voltaje para el modelo

Se ajusta los valores de R y L, en el lado de bajo voltaje para el modelo, como se muestra en la Figura F17.

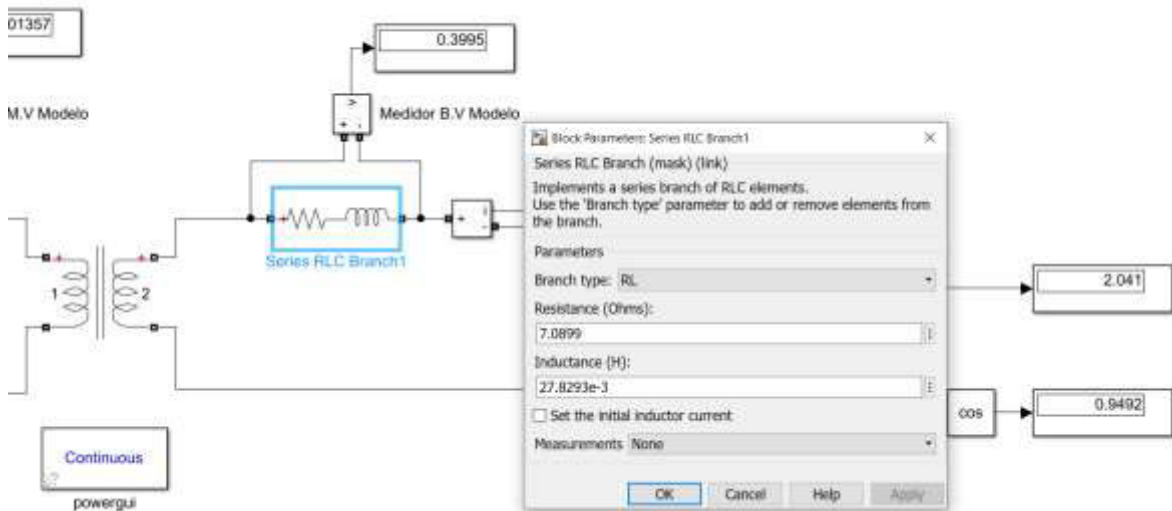


Figura F17. Valores de R y L en bajo voltaje para el modelo

Se ajusta los valores de potencia a escala, como se muestra en la Figura F18.

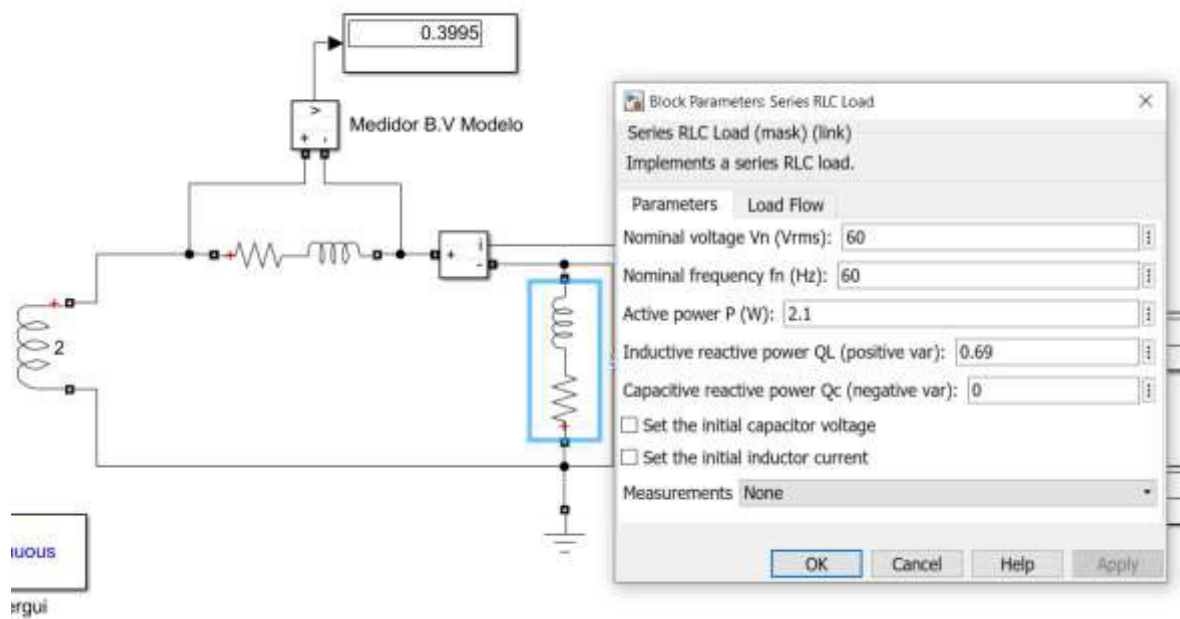


Figura F18. Ajuste de potencia en el prototipo a escala

Y finalmente se obtiene la caída de voltaje, como se muestra en la Figura F19.

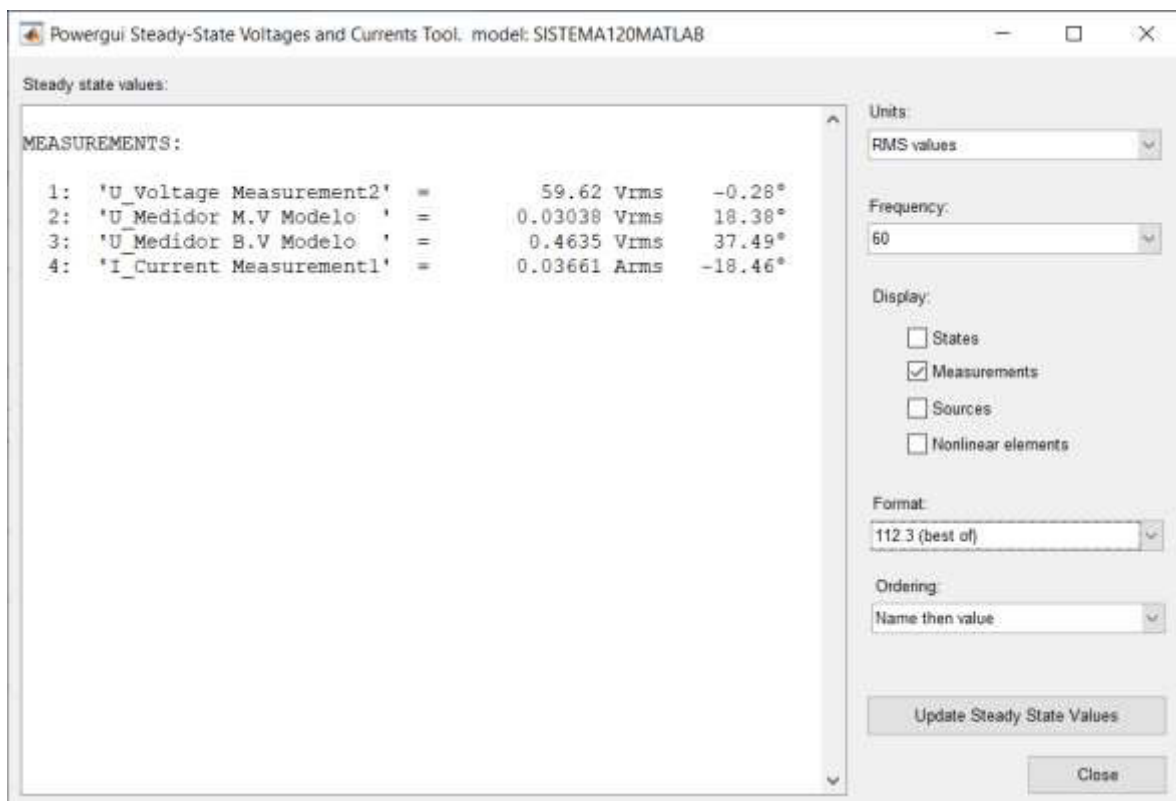


Figura F19. Caídas de voltaje en el lado de bajo voltaje y medio voltaje

ANEXO G. Subrutina para la obtención de valores de corriente en las simulaciones de CYMDIST

A continuación, se describe el procedimiento para obtener los valores de corriente generados por la simulación de CYMDIST. Se inicia corriendo un flujo de carga aplicado al sistema de distribución creado previamente para obtener las caídas respectivas de voltaje, esto se aprecia claramente en la Figura G1

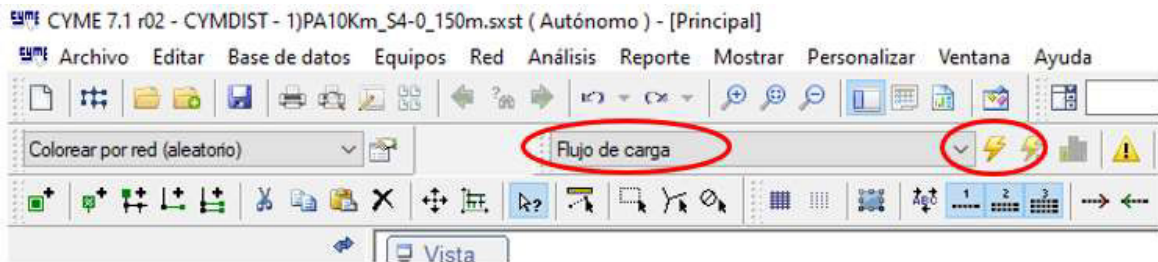


Figura G1. Flujo de carga para obtener corrientes CYMDIST de CYME

Para poder visualizar los resultados del flujo de carga aplicados en el sistema, hay que dirigirse a la pestaña mostrar, seguido de esto a la pestaña cuadro de resultados y finalmente pulsar la pestaña cuadro de flujo de carga, dicho proceso se visualiza de manera clara en la Figura G2.

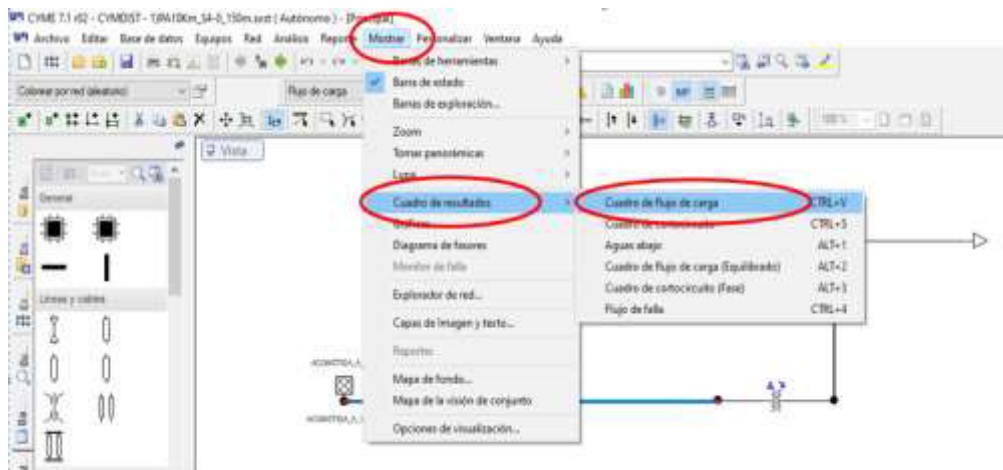


Figura G2. Pasos de obtención del flujo de carga

Seguido de esto se selecciona el elemento en el cual se desea analizar el valor de corriente ya sea en los conductores, transformador o carga, obteniendo una tabla con valores de corriente en cada elemento como se observa en la Figura G3. Para visualizar de mejor manera los valores y con más decimales se pulsa en el botón de amplificación de decimales como se indica en la Figura G4.

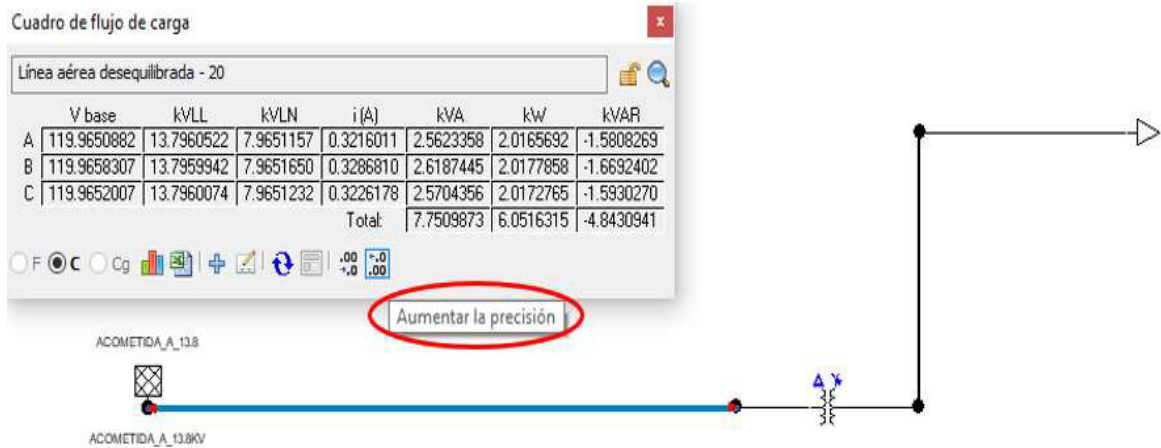


Figura G3. Pestaña para aumentar la precisión en los resultados.

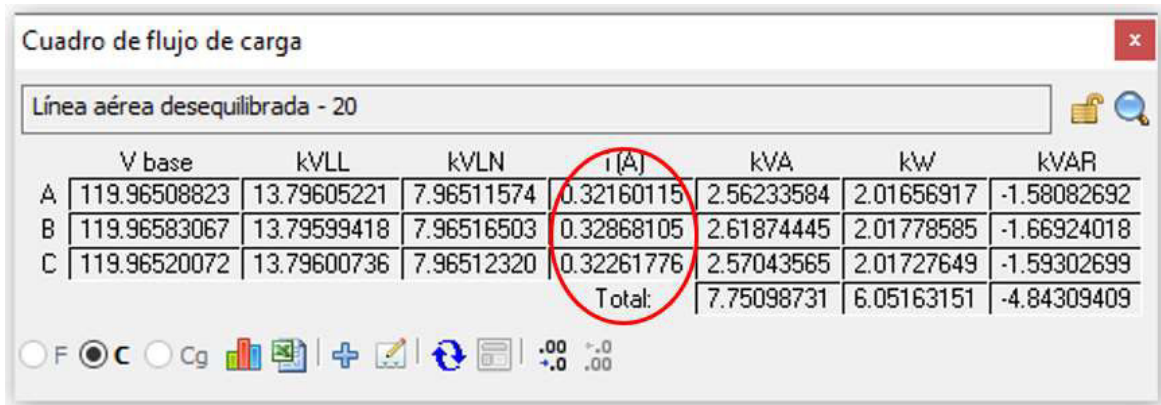


Figura G4. Tabla de corrientes por fase.

ANEXO I. Valores de corriente para distancias de 15 km, 20 km y 25 km referidos a los conductores en medio voltaje y todas las combinaciones de calibre y longitud en bajo voltaje

Tabla I1. Corrientes en p.u. para el lado de medio voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=15 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.202963671	0.1887923	6.98222048
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.202868069	0.1874231	7.61330705
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.202724665	0.1900235	6.26522925
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.202581262	0.1888341	6.7859988
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.203059273	0.1900321	6.41545338
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.202963671	0.1891532	6.80440541
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.202868069	0.1875231	7.56401393
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.202772467	0.1913212	5.64734807
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.203202677	0.1897723	6.60935043
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.203107075	0.1902314	6.33935327
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.203059273	0.1877982	7.51557551
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.203011472	0.1900234	6.39770348
2 AWG ACSR, L=150 m	0.203871893	0.1889721	7.3084096
2 AWG ACSR, L=200 m	0.2041587	0.1911231	6.38503282
2 AWG ACSR, L=250 m	0.204349904	0.1879812	8.0101354
2 AWG ACSR, L=300 m	0.204636711	0.1899123	7.19539076

Tabla I2. Corrientes en p.u. para el lado de bajo voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=15 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.12795467	0.1100723	13.9755509
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128362395	0.1123452	12.4781054
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.128771644	0.1098531	14.691545
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129184703	0.1161921	10.057385
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128174156	0.1089212	15.0209345
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128656566	0.1123721	12.6573144

3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129142025	0.1098621	14.9292417
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129763901	0.1178391	9.18961353
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128448512	0.1087542	15.3324563
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.129026186	0.1100232	14.7280072
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129558133	0.1100131	15.0859175
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.13035834	0.1115234	14.4485884
2 AWG ACSR, L=150 m	0.129616053	0.1100234	15.1159155
2 AWG ACSR, L=200 m	0.130768351	0.1208831	7.55936044
2 AWG ACSR, L=250 m	0.131852061	0.1299734	1.4248249
2 AWG ACSR, L=300 m	0.132971589	0.1245321	6.34683624

Tabla I3. Corrientes en p.u. para el lado de medio voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=20 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.260898662	0.2422134	7.16188495
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.260707457	0.2365321	9.27298255
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.260564054	0.2354231	9.64866551
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.260277247	0.2400012	7.79017268
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.260946463	0.2341261	10.2781094
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.260755258	0.2300982	11.7570239
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.260564054	0.2341261	10.1464318
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.260372849	0.2300983	11.6273832
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.261042065	0.2422132	7.21294899
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.26085086	0.23542311	9.74800313
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.260707457	0.2400012	7.94233421
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.260611855	0.234126	10.1629512
2 AWG ACSR, L=150 m	0.261567878	0.2300942	12.0327122
2 AWG ACSR, L=200 m	0.26166348	0.2422124	7.43362429
2 AWG ACSR, L=250 m	0.261759082	0.2365323	9.63740467
2 AWG ACSR, L=300 m	0.261806883	0.2354234	10.0774597

Tabla I4. Corrientes en p.u. para el lado de bajo voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=20 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.127957719	0.112132	12.3679283
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128363919	0.1098341	14.4353796
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.12877393	0.1123124	12.7832784
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129185465	0.1176421	8.93549828
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.12817568	0.1143121	10.8160768
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128658853	0.10987632	14.5987101
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129144312	0.12001321	7.07046393
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129766949	0.11236541	13.4098367
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128450799	0.1143212	11.0001644
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128818894	0.11873251	7.82989489
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129609956	0.1098362	15.2563558
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.130361389	0.1123412	13.8232564
2 AWG ACSR, L=150 m	0.129619101	0.1124512	13.2448851
2 AWG ACSR, L=200 m	0.130772162	0.1121541	14.2370224
2 AWG ACSR, L=250 m	0.131856633	0.1108123	15.9600109
2 AWG ACSR, L=300 m	0.132976924	0.1189431	10.5535785

Tabla 15. Corrientes en p.u. para el lado de medio voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=25 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV(p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.322801147	0.3017413	6.52408989
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.322562141	0.3071413	4.78073123
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.322323136	0.30131412	6.51799814
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.32208413	0.3100853	3.72536828
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.322848948	0.3025312	6.29326753
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.322609943	0.3012413	6.62367775
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.322370937	0.3012312	6.55758152
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.322131931	0.3100963	3.73623967
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.32289675	0.301231	6.70980739

2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.322705545	0.3019614	6.42819292
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.322466539	0.305637	5.21893467
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.322275335	0.305312	5.26361566
2 AWG ACSR, L=150 m	0.32332696	0.302412	6.46867184
2 AWG ACSR, L=200 m	0.323279159	0.306512	5.18658829
2 AWG ACSR, L=250 m	0.323231358	0.3023531	6.45923036
2 AWG ACSR, L=300 m	0.323183556	0.30216412	6.50386927

Tabla I6. Corrientes en p.u. para el lado de bajo voltaje.

Conductor en medio voltaje: 2 AWG ACSR, L=25 km			
Calibre y conductor en bajo voltaje	Corriente de fase del sistema 13.8 kV (p.u.)	Corriente de fase prototipo (p.u.)	Porcentaje de error (%)
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.127952384	0.1134523	11.3324063
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.128359346	0.1154231	10.0781489
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.128769357	0.1099342	14.627049
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129180893	0.1123412	13.0357459
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128171869	0.1098721	14.2775237
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.12865428	0.1129863	12.1783589
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129139739	0.1183621	8.34571843
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.129763901	0.1098121	15.3754633
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.128446226	0.1198432	6.69776471
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.129023137	0.1098351	14.8717799
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.129558133	0.1193631	7.8690799
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.13035834	0.1089453	16.4262908
2 AWG ACSR, L=150 m	0.129614529	0.1186311	8.47391807
2 AWG ACSR, L=200 m	0.130769876	0.1098527	15.9954086
2 AWG ACSR, L=250 m	0.131853585	0.1193421	9.48892288
2 AWG ACSR, L=300 m	0.132973875	0.1100431	17.2445715

ANEXO J. Cantidad de vueltas por voltio para núcleo de un transformador

Tabla J1. Cantidad de vueltas por voltio para un transformador

NÚCLEO	POTENCIA MÁXIMA	VUELTAS POR VOLTIO	ÁREA cm ²
1.6 x 1.9	9W	14	3.04
2.2 x 2.8	37W	7	6.16
2.5 x 1.8	20W	9.3	4.5
2.5 x 2.8	49W	6	7
2.8 x 1.5	17W	10	4.2
2.8 x 2.5	49W	6	7
2.8 x 3.5	96W	4.3	9.8
2.8 x 5	196W	3	14
3.2 x 3.5	125W	3.75	11.2
3.2 x 4	163W	3.3	12.8
3.2 x 5	256W	2.625	16
3.8 x 4	231W	2.76	15.2
3.8 x 5	361W	2.21	19
3.8 x 6	519W	1.85	22.8
3.8 x 7	707W	1.58	26.6
3.8 x 8	924W	1.38	30.4
3.8 x 9	1170W	1.22	34.2
3.8 x 10	1444W	1.1	38
3.8 x 11	1747W	1.004	41.8
3.8 x 12	2079W	0.921	45.6
4.4 x 9	1568W	1.06	39.6
4.4 x 10	1940W	0.95	44
4.4 x 11	2342W	0.867	48.4
4.4 x 12	2787W	0.795	52.8

ANEXO K. Tabla de calibres de conductor

Tabla K1. Amperios según el calibre del cable

CALIBRE AWG	AMPERIOS	PIES POR LIBRA
6	53.16	
7	42.04	16.00
8	33.38	20.00
9	26.56	25.20
10	21.20	31.80
11	16.60	40.10
12	13.30	50.60
13	10.50	63.80
14	8.30	80.40
15	6.60	101.40
16	5.20	125.00
17	4.10	155.00
18	3.20	203.00
19	2.60	248.00
20	2.00	323.00
21	1.62	408.00
22	1.28	489.00
23	1.00	615.00
24	0.80	775.00
25	0.64	970.00
26	0.50	1300.00
27	0.40	1639.00
28	0.32	2067.00
29	0.25	2607.00
30	0.20	3287.00
31	0.18	4145.00
32	0.12	5257.00
33	0.10	6592.00
34	0.08	8310.00
35	0.06	13210.00

Tabla K2. Datos de conductores en medio voltaje

Calibre	Mils circulares	Diámetro mm	Amperaje
7	20,818	3.67	44.2
8	16,509	3.26	33.3
9	13,090	2.91	26.5
10	10,383	2.59	21.2
11	8,234	2.30	16.6
12	6,530	2.05	13.5
13	5,178	1.83	10.5
14	4,107	1.63	8.3
15	3,257	1.45	6.6
16	2,583	1.29	5.2
17	2,048	1.15	4.1
18	1,624	1.02	3.2
19	1,288	0.91	2.6
20	1,022	0.81	2.0
21	810.1	0.72	1.6
22	642.4	0.65	1.2
23	0.509	0.57	1.0
24	0.404	0.51	0.8
25	0.320	0.45	0.6
26	0.254	0.40	0.5
27	0.202	0.36	0.4
28	0.160	0.32	0.3
29	0.126	0.28	0.26
30	0.100	0.25	0.20

ANEXO L. Código de Arduino para el resistómetro e inductómetro

Anexo digital.

ANEXO M. Fotografías de las placas utilizadas en el prototipo y elementos utilizados en la emulación.



Figura M1. Diseño del inductómetro-resistómetro en ARES de PROTEUS

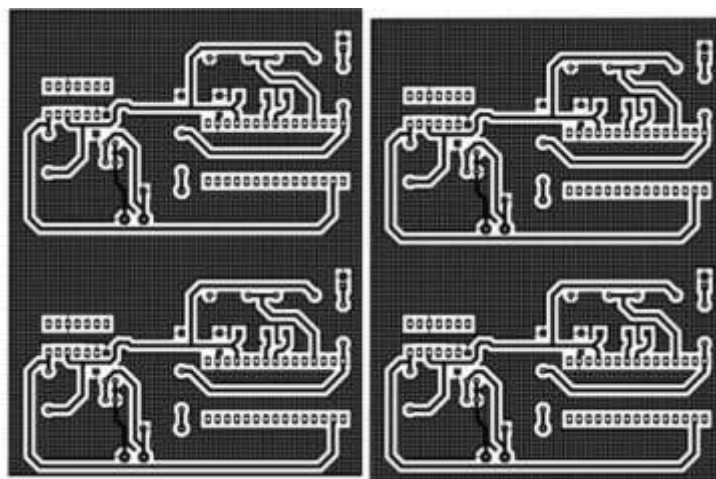


Figura M2. Diseño del inductómetro-resistómetro fabricado



Figura M3. Diseño en 3D de la placa del alimentador primario.



Figura M4. Ubicación de placas en el módulo y cableado de las mismas.

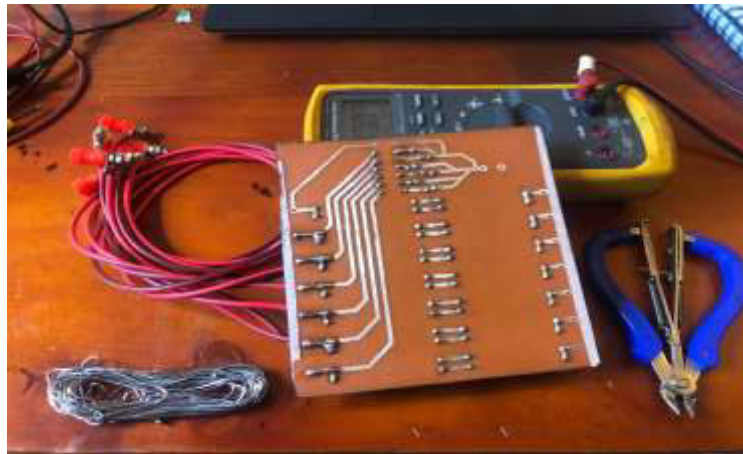


Figura M5. Vista trasera de las placas del alimentador primario.

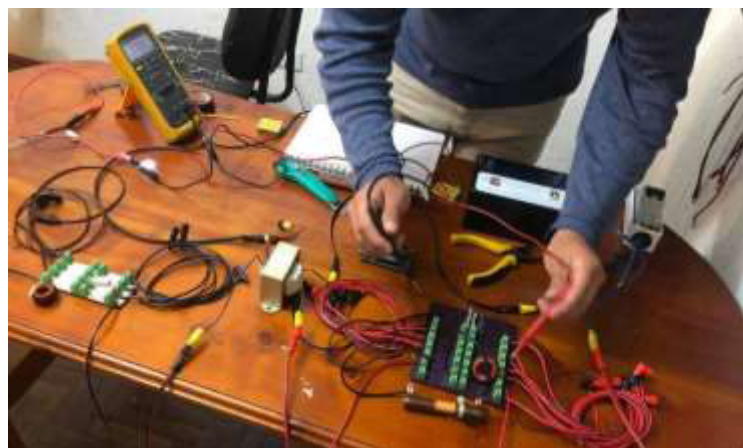


Figura M6. Medición de los valores de resistencia en la impedancia del alimentador primario.

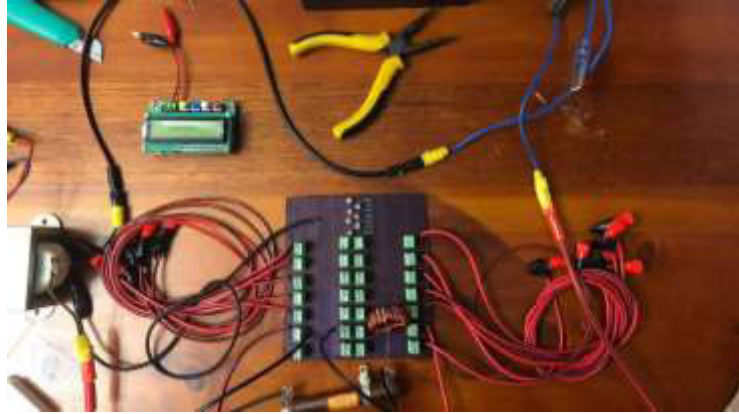


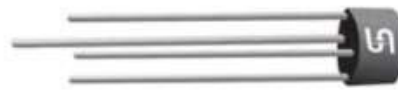


Figura M7. Vista superior en la placa del alimentador primario.



Figura M8. Elementos para implementar en el prototipo escala.

ANEXO N. Datasheets de los dispositivos electrónicos utilizados en el prototipo.

W005 - W10

Single Phase 1.5 AMPS. Silicon Bridge Rectifiers

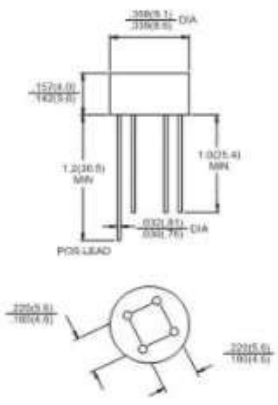
RB-15

Features

- ✦ UL Recognized File # E-96005
- ✦ Surge overload ratings to 40 amperes peak
- ✦ Ideal for printed circuit board
- ✦ Reliable low cost construction technique results in inexpensive product
- ✦ High temperature soldering guaranteed: 260 °C / 10 seconds / 0.375" (9.5mm) lead length at 5 lbs., (2.3 kg) tension

Mechanical Data

- ✦ Case: Molded plastic
- ✦ Lead: solder plated
- ✦ Polarity: As marked
- ✦ Weight: 1.07 grams



Dimensions in inches and (millimeters)

Maximum Ratings and Electrical Characteristics

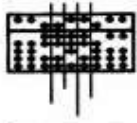
Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.
 Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
 For capacitive load, derate current by 20%

Type Number	Symbol	W005	W01	W02	W04	W06	W08	W10	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current @ $T_A = 50^\circ\text{C}$	$I_{(AV)}$	1.5							A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	I_{FSM}	40							A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 1.5A	V_F	1.0							V
Maximum DC Reverse Current @ $T_A=25^\circ\text{C}$ at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A=125^\circ\text{C}$	I_R	10 500							μA μA
Typical Thermal Resistance (Note)	$R_{\theta JA}$ $R_{\theta JL}$	36 13							$^\circ\text{C/W}$
Operating Temperature Range	T_J	-55 to +125							$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{STG}	-55 to +150							$^\circ\text{C}$

Note: Thermal Resistance from Junction to Ambient and from Junction to Lead Mounted on P.C.B. With 0.4" x 0.4" (10mm x 10mm) Copper Pads.

Version: A06

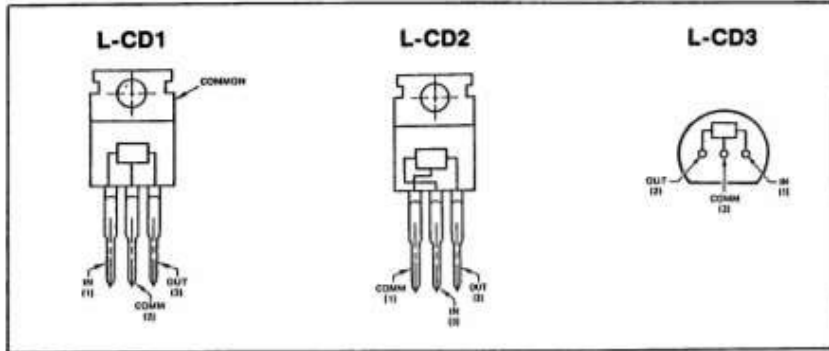
Figura N1. Datasheet del rectificador.



CODI Semiconductor, Inc.

LINEAR

LOGIC SYMBOLS AND CONNECTION DIAGRAMS



PACKAGE OUTLINES

**JEDEC TO-220 Outline
Plastic Power Package**

DIM	INCHES			MILLIMETERS		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	.385		.410	10.03		10.41
B	.365		.385	9.27		9.77
C	.300		.320	7.62		8.13
D	.100		.120	2.54		3.05
E	.040		.060	1.02		1.52
F	.141		.145	3.58		3.68
G	.575		.600	14.6		15.24
H	.235		.265	5.97		6.73
I	.160		.190	4.06		4.83
J	.030		.055	508		1.40
K	.500			12.70		
L			.260			6.35
M	.190		.210	4.83		5.33
N	.045		.055	1.06		1.40
O	.095		.105	2.41		2.66
P	.015		.030	.381		.762
Q	.030		.045	.808		1.43

Package weight is 2.1 grams

NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters
Center lead is electrical contact with the mounting tab

**JEDEC TO-92 Outline
Plastic Package**

DIM	INCHES			MILLIMETERS		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	.175		.505	4.45		12.70
B	.170		.210	4.32		5.33
C	.500			12.70		
D	.015		.025	0.406		0.635
E	.135			3.43		
F		.100			2.54	
G		.080			1.27	
H	.135		.165	3.18		4.19
I	.080		.105	2.03		2.67
J	.080		.105	2.03		2.67

NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters
Package material is transfer molded thermosetting plastic
Package weight is 0.25 grams

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

Figura N2. Datasheet del LM78XX hoja 1.



CODI Semiconductor, Inc.

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS 3 - TERMINAL VOLTAGE REGULATORS

	1 AMP Pos. 7805-7824	1 AMP Neg. 7905-7924	.5A Pos. 7805-7824	.1A Pos. 78L05-78L24
Thermal resistance Rj-c Rj-a	5°C/w 70°C/w		3°C/w 100°C/w	
Power Dissipation	20W	10W	100mW	
Temperature range Operating Ambient Operating Junction Storage	-20 to +85°C -20 to +125°C -55 to +125°C		-20 to +75°C -20 to +125°C -60 to +125°C	
Line Regulation (MV) Vo/Vi (%)	2.0	1.0	2.0	
Load Regulation (MV) Vo/Io (%)	2.0	1.0		
Logic/Connection diagram	L-0D 1	L-0D 2	L-0D 1	L-0D 3
Package	TO-220			TO-92

TYPE No.	Normal OUTPUT Voltage Range (V)	OUTPUT Voltage Range (V)	INPUT Voltage Range (V)	Quiescent Current (mA)	Ripple Rejection (dB) RIS	OUTPUT Pulse Voltage (µV)	OUTPUT Voltage Drift (FPP) mV/°C
----------	--	--------------------------------	-------------------------------	------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--

1 AMP POSITIVE							
7805	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	5.1	57	40	±0.4
7806	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	4.7	55	45	±0.4
7808	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	4.7	56	50	±0.4
7812	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	4.7	55	70	±0.4
7815	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	4.7	54	85	±1.0
7818	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	5.0	55	95	±1.2
7824	24.0	23.0-25.0	27.0-40.0	5.0	55	130	±1.4

1 AMP NEGATIVE							
7905	-5.0	-4.8-5.2	-7.0-35.0	-1.0	54	100	-0.4
7906	-6.0	-5.75-6.25	-8.0-35.0	-1.0	54	120	-0.5
7908	-8.0	-7.7-8.3	-10.5-35.0	-1.2	54	200	-0.6
7912	-12.0	-11.5-12.5	-14.5-35.0	-1.5	54	300	-0.8
7915	-15.0	-14.4-15.6	-17.5-35.0	-1.5	56	330	-1.0
7918	-18.0	-17.3-18.7	-21.0-35.0	-1.5	56	430	-1.0
7924	-24.0	-23.0-25.0	-27.0-40.0	-1.5	51	600	-1.0

.5A (300ma) POSITIVE							
7805	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	4.5	62	40	±1.0
7806	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	4.8	58	45	±1.0
7808	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	4.8	54	57	±1.0
7812	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	4.8	55	78	±1.0
7815	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	4.8	56	90	±1.0
7818	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	4.8	53	100	±1.0
7824	24.0	23.0-25.0	27.0-40.0	5.0	50	120	±1.0

.1A (100ma) POSITIVE							
78L05	5.0	4.75-5.25	7.0-30.0	8.0*	40	40	±1.0
78L06	6.0	5.75-6.25	8.0-30.0	8.0*	39	50	±1.0
78L08	8.0	7.8-8.2	10.5-30.0	8.0*	39	60	±1.0
78L12	12.0	11.4-12.6	14.5-35.0	8.3*	37	80	±1.5
78L15	15.0	14.3-15.7	17.5-35.0	8.3*	36	90	±1.5
78L18	18.0	17.3-18.7	21.0-40.0	8.3*	33	120	±1.0
78L24	24.0	22.8-25.2	27.0-40.0	7.0*	32	200	±2.0

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

Figura N3. Datasheet del LM78XX hoja 2.

ANEXO O. Subrutina para la programación de la placa de desarrollo ESP32 a través de USB y programación de ATMEGA 164P.

Se conecta el programador al computador a través de su puerto USB y el primer módulo ESP32 por medio de su conector micro USB, además por medio del IDE Arduino cargaremos el programa por el botón subir como se aprecia en la Figura O1.



```
AI_Voltage_Measunng
#include <Filters.h> //Easy library to do the calculations
#include <SPI.h> //Libraries for the OLED display
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 32 // OLED display height, in pixels
#define OLED_RESET -1 //

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET); //Declaring the display name (display)

float testFrequency = 50; // test signal frequency (Hz)
float windowLength = 40.0/testFrequency; // how long to average the signal, for statistist

int Sensor = 0; //Sensor analog input, here it's A0
```

Figura O1. Programa que se carga en el módulo uno

Posteriormente conectamos el programador AVRISP mkII al puerto de programación del microcontrolador ATMEGA 164P, seguido de esto se conecta el otro extremo del programador al puerto USB de computador.

Una vez realizado esto, se abre el programa PROGISP en el cual cargaremos el programa que se subirá al microcontrolador, luego se verifica la conexión y a través del botón "AUTO", se envía el programa al ATMEGA 164P, como se aprecia en la Figura O2.



Figura O2. Programa que se carga en ATMEGA 164P

Finalmente se procede de forma similar para el segundo módulo ESP32, pero se carga el código que se muestra en la Figura O3.

```
esp32Rest Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Subir
esp32Rest$
#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include "AsyncJson.h"
#include "ArduinoJson.h"
#include <Filters.h>
#include <stdio.h>
#define ZMPT101B A0
#define RXD2 16
#define TXD2 17

#include <HardwareSerial.h>

#define RXD1 23
#define TXD1 22
HardwareSerial MySerial(1);
AsyncWebServer server(80);
```

Figura O3. Código que se carga en el módulo dos

Adicionalmente en la Figura O4. se muestra el esquemático de la placa de desarrollo ESP32.

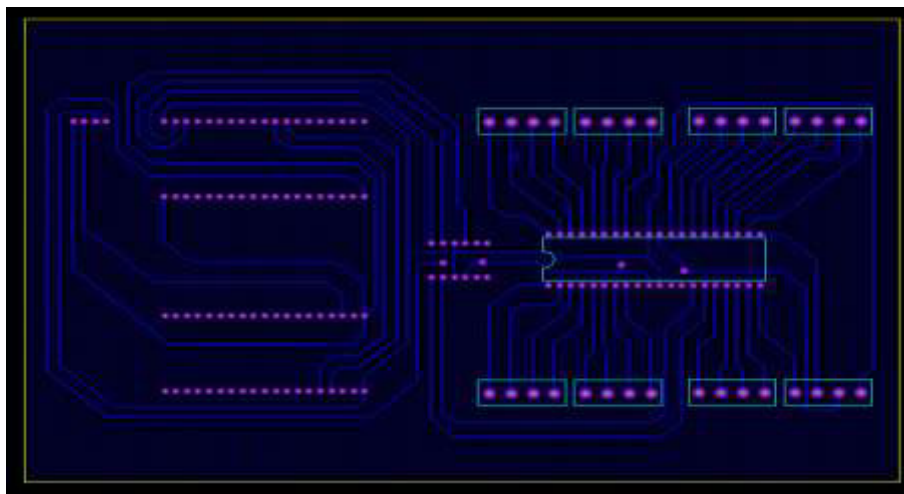


Figura O4. Esquemático en proteus de la placa de desarrollo ESP32

ANEXO P. Código que dicta el funcionamiento del multímetro inalámbrico

Anexo digital.

ANEXO Q. Caídas de voltaje para longitudes de 15 km, 20 km y 25 km referidos a los conductores en medio voltaje.

Tabla Q1. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para medio voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=15 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04284	0.04785	11.6946779
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04308	0.04803	11.4902507
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04332	0.04812	11.0803324
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04356	0.04951	13.6593205
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04296	0.04693	9.24115456
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04332	0.04731	9.21052632
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04356	0.04856	11.4784206
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04392	0.04871	10.9061931
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04308	0.04811	11.6759517
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04344	0.04741	9.13904236
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04381	0.04782	9.15316138
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04416	0.04811	8.94474638
2 AWG ACSR, L=150 m	0.04368	0.04908	12.3626374
2 AWG ACSR, L=200 m	0.04441	0.04791	7.88110786
2 AWG ACSR, L=250 m	0.04488	0.04881	8.75668449
2 AWG ACSR, L=300 m	0.04561	0.04902	7.47643061

Tabla Q2. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para bajo voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=15 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.56581	0.59791	5.67328255
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.75714	0.82715	9.24663867
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.95022	1.02829	8.21599209
4/0 AWG ACSR, L=300 m	1.14462	1.29461	13.1039122
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.66922	0.72913	8.95221302
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.89581	0.99581	11.1630815

3/0 AWG ACSR, L=250 m	1.12464	1.28464	14.2267748
3/0 AWG ACSR, L=300 m	1.35672	1.55672	14.7414352
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.79794	0.85794	7.51936236
2/0 AWG ACSR, L=200 m	1.06938	1.16938	9.35121285
2/0 AWG ACSR, L=250 m	1.34292	1.54291	14.8921753
2/0 AWG ACSR, L=300 m	1.62144	1.82153	12.3402654
2 AWG ACSR, L=150 m	1.34731	1.47722	9.64217589
2 AWG ACSR, L=200 m	1.81284	1.99284	9.92917191
2 AWG ACSR, L=250 m	2.28468	2.58471	13.1322548
2 AWG ACSR, L=300 m	2.76504	2.96511	7.23570003

Tabla Q3. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para medio voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=20 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04548	0.04792	5.3649956
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04596	0.04811	4.67798085
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04632	0.04931	6.45509499
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04656	0.05216	12.0274914
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04584	0.05284	15.2705061
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04612	0.05112	10.8412836
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04656	0.05251	12.7792096
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04704	0.05301	12.6913265
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04608	0.05108	10.8506944
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04644	0.04941	6.39534884
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04692	0.04998	6.52173913
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04714	0.05111	8.42172253
2 AWG ACSR, L=150 m	0.04618	0.05218	12.9926375
2 AWG ACSR, L=200 m	0.04764	0.05064	6.29722922
2 AWG ACSR, L=250 m	0.04848	0.05241	8.10643564
2 AWG ACSR, L=300 m	0.04922	0.05721	16.2332385

Tabla Q4. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para bajo voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=20 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR

4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.56581	0.59519	5.1925558
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.75714	0.78914	4.22643104
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.95022	1.05022	10.5238787
4/0 AWG ACSR, L=300 m	1.14468	1.02233	10.6885767
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.77291	0.798991	3.37439029
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.89592	0.99592	11.1617109
3/0 AWG ACSR, L=250 m	1.12464	1.22463	8.89084507
3/0 AWG ACSR, L=300 m	1.35684	1.55611	14.68633
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.79118	0.91218	15.2936121
2/0 AWG ACSR, L=200 m	1.06914	0.96911	9.356118
2/0 AWG ACSR, L=250 m	1.34292	1.14292	14.8929199
2/0 AWG ACSR, L=300 m	1.62138	1.82199	12.3727935
2 AWG ACSR, L=150 m	1.34748	1.547411	14.8374002
2 AWG ACSR, L=200 m	1.81272	1.99278	9.93313915
2 AWG ACSR, L=250 m	2.2848	2.5848	13.1302521
2 AWG ACSR, L=300 m	2.76492	2.99493	8.31886637

Tabla Q5. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para medio voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=25 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04272	0.04571	6.99906367
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04308	0.04622	7.28876509
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04356	0.04677	7.36914601
4/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04392	0.04872	10.9289617
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04296	0.04591	6.86685289
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04344	0.04662	7.32044199
3/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04392	0.04791	9.08469945
3/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04441	0.04875	9.77257374
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.04302	0.04821	12.0641562
2/0 AWG ACSR, L=200 m	0.04368	0.04799	9.86721612
2/0 AWG ACSR, L=250 m	0.04428	0.04911	10.9078591
2/0 AWG ACSR, L=300 m	0.04512	0.04892	8.42198582
2 AWG ACSR, L=150 m	0.04416	0.04911	11.2092391

2 AWG ACSR, L=200 m	0.04524	0.05112	12.9973475
2 AWG ACSR, L=250 m	0.04621	0.05294	14.5639472
2 AWG ACSR, L=300 m	0.04716	0.05316	12.7226463

Tabla Q6. Caída de voltaje con refrigeración y sin refrigeración para bajo voltaje

CONDUCTOR EN MEDIO VOLTAJE: 2 AWG ACSR, L=25 km			
CALIBRE Y CONDUCTOR EN BAJO VOLTAJE	CON REFRIGERACIÓN	SIN REFRIGERACIÓN	% ERROR
4/0 AWG ACSR, L=150 m	0.56592	0.58992	4.2408821
4/0 AWG ACSR, L=200 m	0.75726	0.79729	5.28616327
4/0 AWG ACSR, L=250 m	0.95016	0.99011	4.20455502
4/0 AWG ACSR, L=300 m	1.14462	1.25461	9.60930265
3/0 AWG ACSR, L=150 m	0.66911	0.69912	4.48506225
3/0 AWG ACSR, L=200 m	0.89581	0.94581	5.58154073
3/0 AWG ACSR, L=250 m	1.12446	1.23446	9.78247336
3/0 AWG ACSR, L=300 m	1.35684	1.49311	10.0431886
2/0 AWG ACSR, L=150 m	0.79811	0.88911	11.4019371
2/0 AWG ACSR, L=200 m	1.06932	1.16932	9.35173755
2/0 AWG ACSR, L=250 m	1.34292	1.44292	7.44645995
2/0 AWG ACSR, L=300 m	1.62121	1.77121	9.25234855
2 AWG ACSR, L=150 m	1.34742	1.44742	7.42159089
2 AWG ACSR, L=200 m	1.81278	1.981278	9.29500546
2 AWG ACSR, L=250 m	2.28474	2.48474	8.75373128
2 AWG ACSR, L=300 m	1.48068	1.68068	13.5073075

ANEXO R. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para una distancia de 15,20 y 25 km en el alimentador primario

Tabla R1. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para una distancia de 15 km en el alimentador primario.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PB15km_S4-0_150m	4.9305	2.0745	0.000357	0.00943
2	PB15km_S4-0_200m	4.9571	2.7761	0.000359	0.012619
3	PB15km_S4-0_250m	4.9843	3.4841	0.000361	0.015837
4	PB15km_S4-0_300m	5.0114	4.1969	0.000363	0.019077
5	PB15km_S3-0_150m	4.9439	2.4531	0.000358	0.01115
6	PB15km_S3-0_200m	4.9754	3.2847	0.000361	0.01493
7	PB15km_S3-0_250m	5.0071	4.1236	0.000363	0.018744
8	PB15km_S3-0_300m	5.0472	4.9747	0.000366	0.022612
9	PB15km_S2-0_150m	4.9603	2.9257	0.000359	0.013299
10	PB15km_S2-0_200m	4.9981	3.9211	0.000362	0.017823
11	PB15km_S2-0_250m	5.0349	4.9241	0.000365	0.022382
12	PB15km_S2-0_300m	5.0829	5.9453	0.000368	0.027024
13	PB15km_S#2_150m	5.0291	4.9401	0.000364	0.022455
14	PB15km_S#2_200m	5.1011	6.6471	0.00037	0.030214
15	PB15km_S#2_250m	5.1681	8.3771	0.000374	0.038078
16	PB15km_S#2_300m	5.2379	10.1384	0.00038	0.046084

Tabla R2. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para una distancia de 20 km en el alimentador primario.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PC20km_S4-0_150m	5.2261	2.0746	0.000379	0.00943
2	PC20km_S4-0_200m	5.2891	2.7761	0.000383	0.012619
3	PC20km_S4-0_250m	5.3251	3.4842	0.000386	0.015837
4	PC20km_S4-0_300m	5.3611	4.1971	0.000388	0.019078
5	PC20km_S3-0_150m	5.2709	2.4531	0.000382	0.128818
6	PC20km_S3-0_200m	5.3131	3.2851	0.000385	0.014932
7	PC20km_S3-0_250m	5.3551	4.1236	0.000388	0.018744
8	PC20km_S3-0_300m	5.4091	4.9751	0.000392	0.022614
9	PC20km_S2-0_150m	5.2931	2.9261	0.000384	0.0133
10	PC20km_S2-0_200m	5.3424	3.9201	0.000387	0.017819
11	PC20km_S2-0_250m	5.3923	4.9241	0.000391	0.022382
12	PC20km_S2-0_300m	5.4561	5.9451	0.000395	0.027023
13	PC20km_S#2_150m	5.3848	4.9408	0.00039	0.022458
14	PC20km_S#2_200m	5.4805	6.6466	0.000397	0.030212
15	PC20km_S#2_250m	5.5704	8.3775	0.000404	0.03808

16	PC20km_S#2_300m	5.6631	10.138	0.00041	0.046082
----	-----------------	--------	--------	---------	----------

Tabla R3. Caídas de voltaje obtenidas en CYMDIST de CYME y por unidad para una distancia de 25 km en el alimentador primario.

No	Caso	ΔV Primario en CYME (V)	ΔV Secundario en CYME (V)	Voltaje p.u. Primario	Voltaje p.u. Secundario
1	PD25km_S4-0_150m	4.9161	2.0751	0.000356	0.009432
2	PD25km_S4-0_200m	4.9608	2.7767	0.000359	0.012621
3	PD25km_S4-0_250m	5.006	3.484	0.000363	0.015836
4	PD25km_S4-0_300m	5.051	4.197	0.000366	0.019077
5	PD25km_S3-0_150m	4.9384	2.453	0.000358	0.01115
6	PD25km_S3-0_200m	4.9908	3.2847	0.000362	0.01493
7	PD25km_S3-0_250m	5.044	4.123	0.000366	0.018741
8	PD25km_S3-0_300m	5.111	4.975	0.00037	0.022614
9	PD25km_S2-0_150m	4.966	2.9261	0.00036	0.0133
10	PD25km_S2-0_200m	5.0278	3.9209	0.000364	0.017822
11	PD25km_S2-0_250m	5.0901	4.924	0.000369	0.022382
12	PD25km_S2-0_300m	5.1704	5.9443	0.000375	0.02702
13	PD25km_S#2_150m	5.0809	4.9406	0.000368	0.022457
14	PD25km_S#2_200m	5.2006	6.6469	0.000377	0.030213
15	PD25km_S#2_250m	5.3131	8.3774	0.000385	0.038079
16	PD25km_S#2_300m	5.4292	10.1388	0.000393	0.024678

ANEXO S. Capturas de la interfaz del sistema de distribución a escala

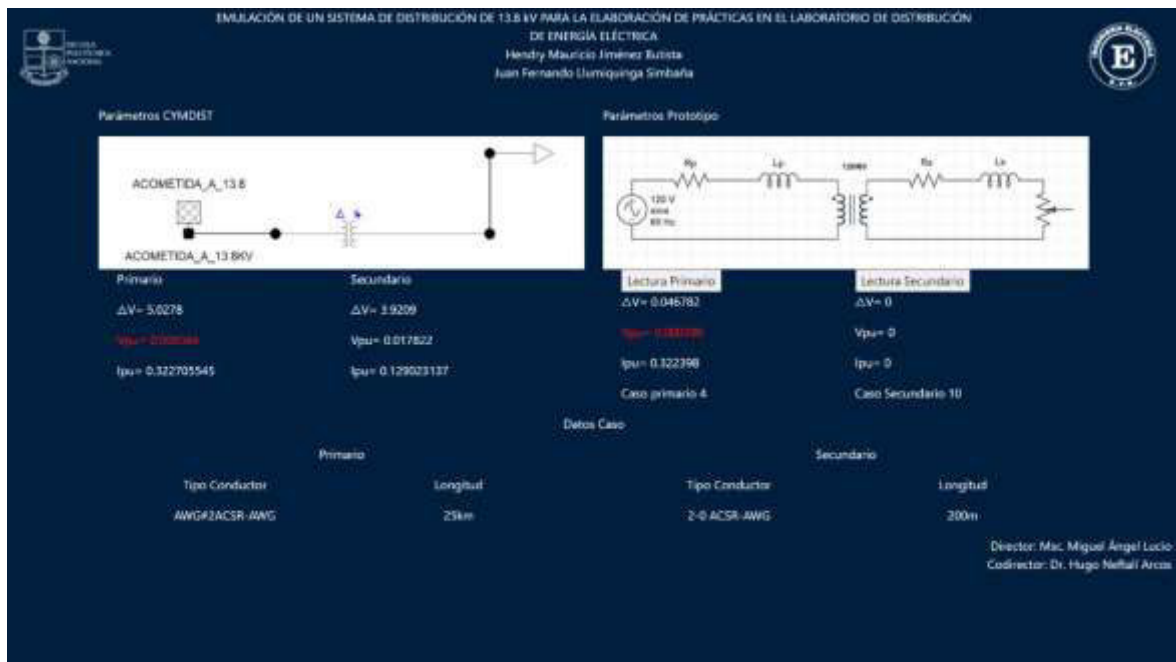


Figura S1. Interfaz de resultados cuarto caso primario, décimo caso secundario

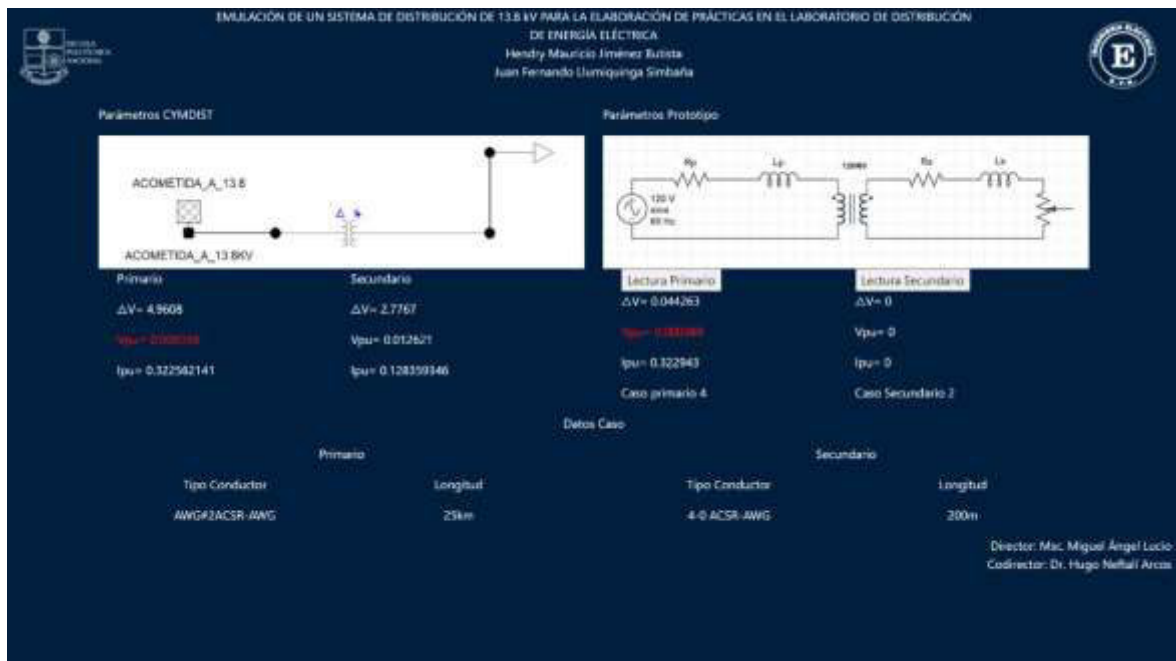


Figura S2. Interfaz de resultados cuarto caso primario, segundo caso secundario

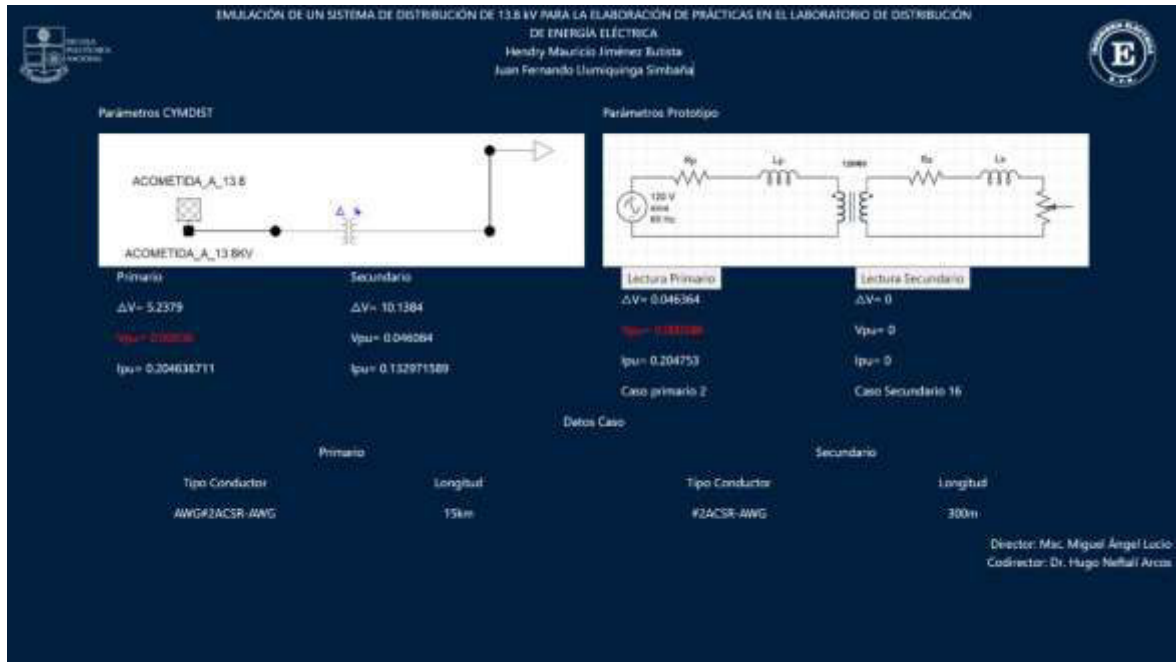


Figura S3. Interfaz de resultados segundo caso primario, cuarto caso secundario

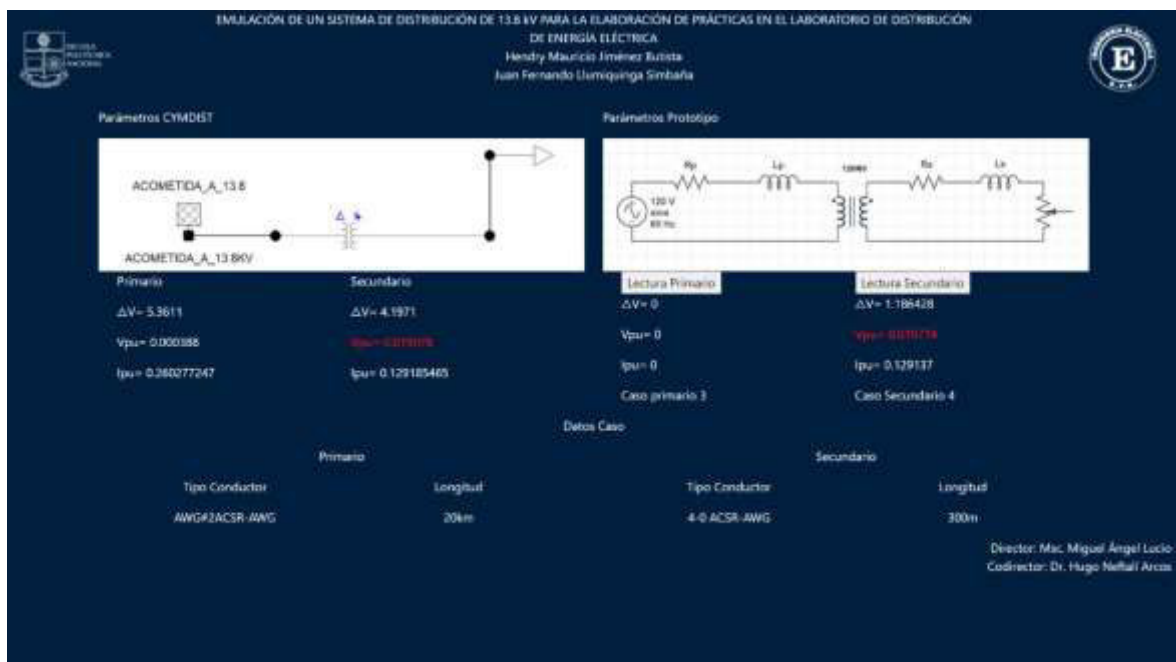


Figura S4. Interfaz de resultados tercer caso primario, cuarto caso secundario

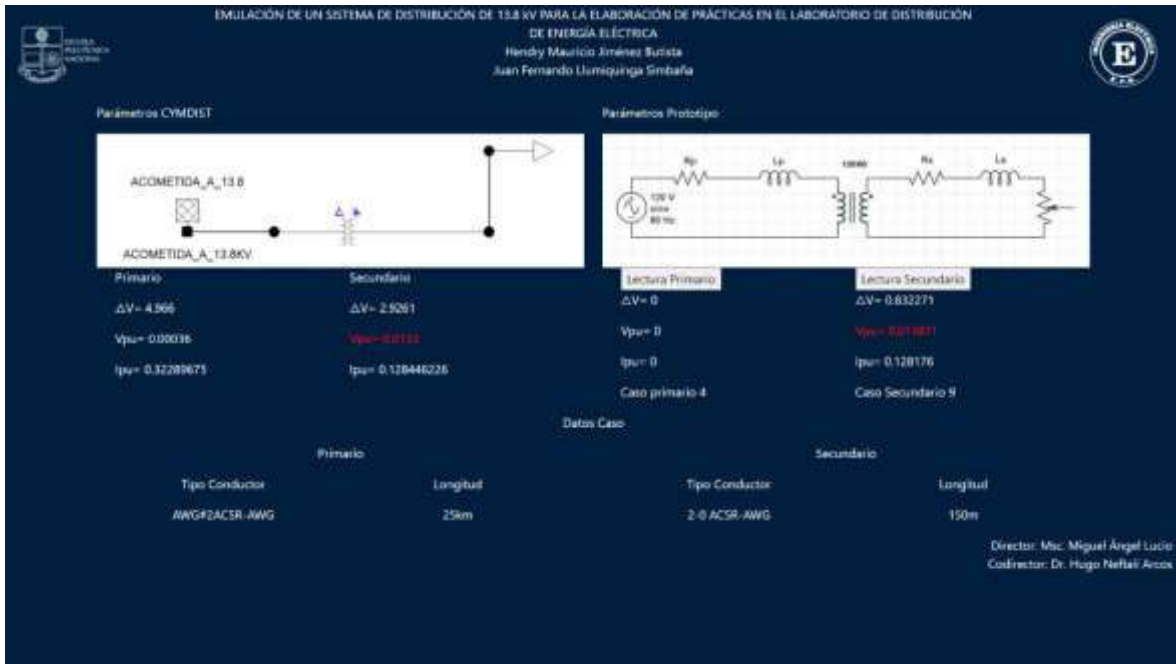


Figura S5. Interfaz de resultados tercer caso primario, cuarto caso secundario

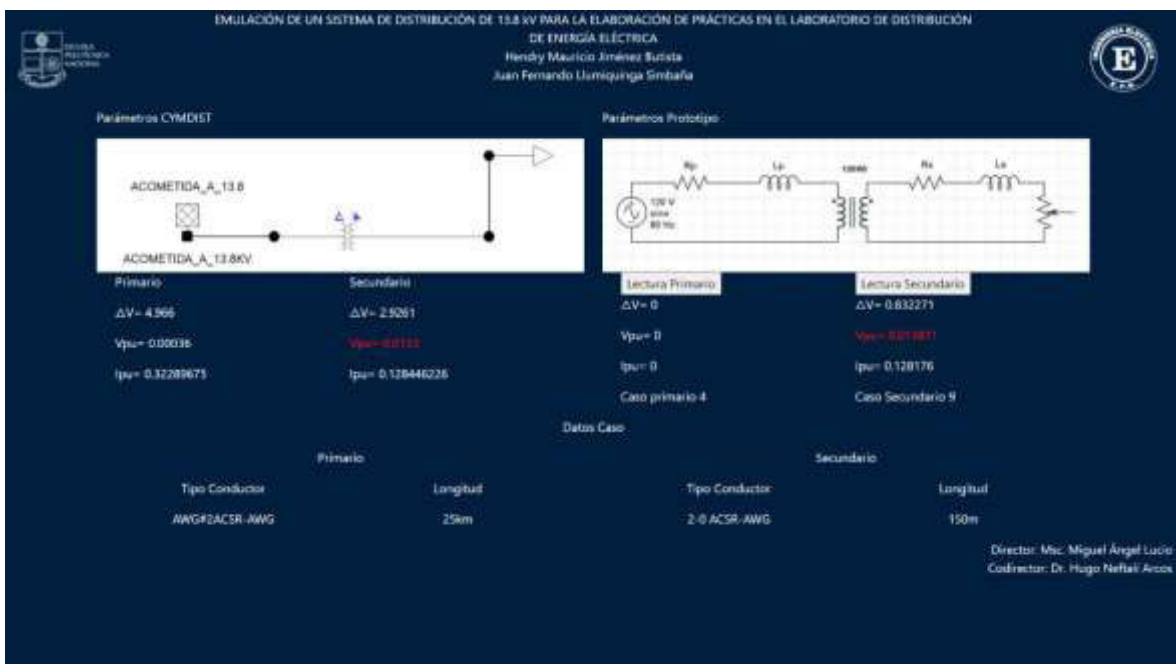


Figura S6. Interfaz de resultados cuarto caso primario, tercer caso secundario

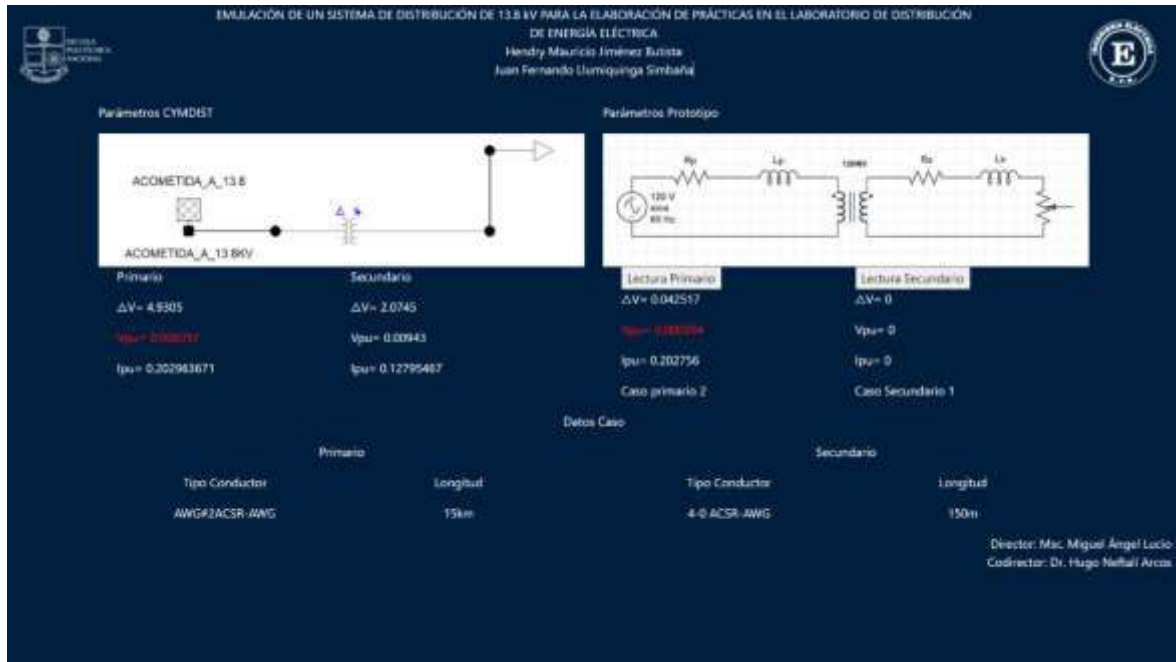


Figura S7. Interfaz de resultados tercer caso primario, tercer caso secundario

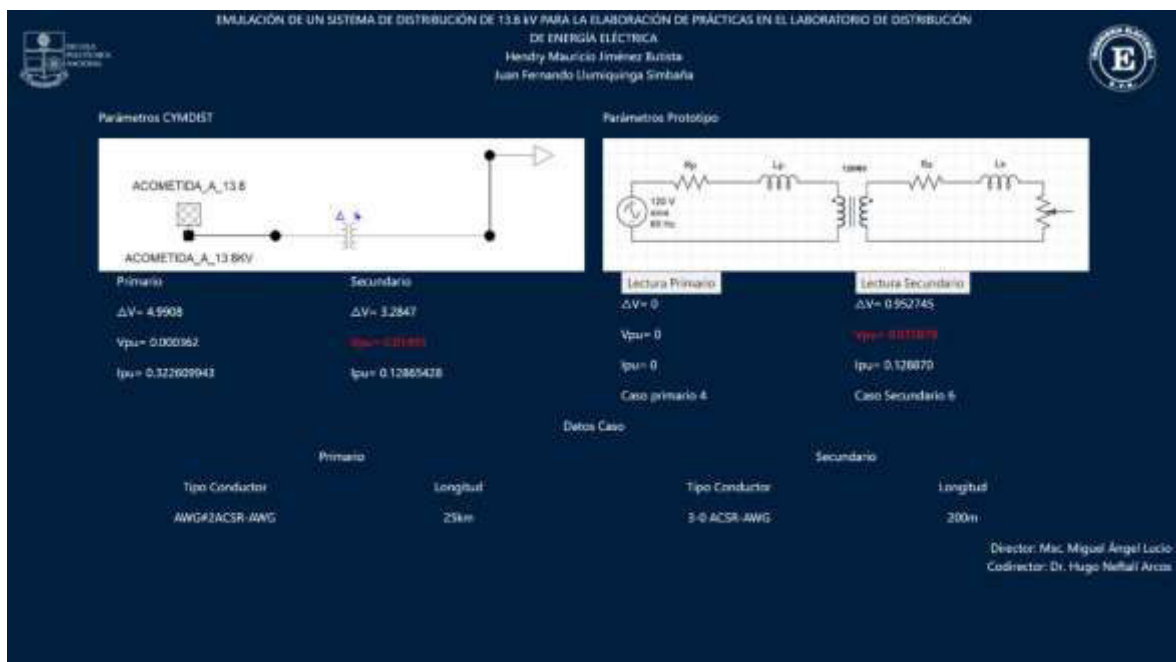


Figura S8. Interfaz de resultados tercer caso primario, tercer caso secundario

ANEXO T. Subrutina para simular el circuito secundario utilizando cable preensamblado

A continuación, se describe el procedimiento para obtener las impedancias equivalentes y correspondientes a cada uno de los conductores preensamblados que queda estipulado como una futura implementación dentro del proyecto de titulación. Se inicia creando el archivo en CYMDIST de CYME y se guardará con el nombre que se considere conveniente, dicho esto se selecciona la pestaña “Nuevo Estudio”, este paso inicial se muestra en la Figura T1.

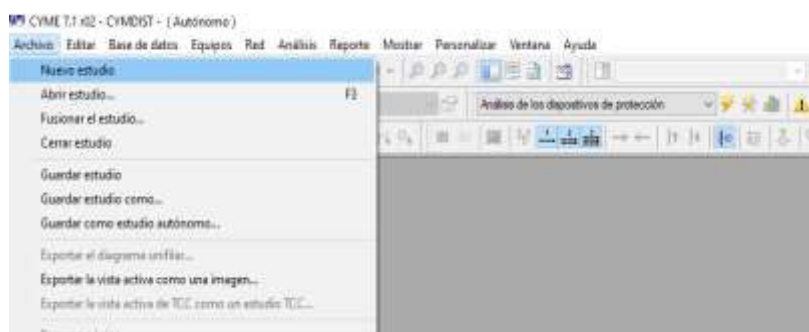


Figura T1. Creación de un nuevo estudio en CYMDIST de CYME.

Se selecciona un modelo en blanco, el cual servirá de base para crear el sistema de distribución a 13.8 kV y todos los elementos que lo constituyen el sistema de distribución esto se muestra claramente en la Figura T2.



Figura T2. Creación de un archivo en blanco para colocar los elementos.

En el bloque de elementos que se encuentra en la parte izquierda, se toman todos los elementos necesarios para armar el sistema de distribución completo. Todos los elementos que constituyen el sistema de distribución interconectados

lógicamente se muestran en la Figura T3, en este punto tomamos muy en cuenta que el circuito secundario estará constituido por un conductor preensamblado.

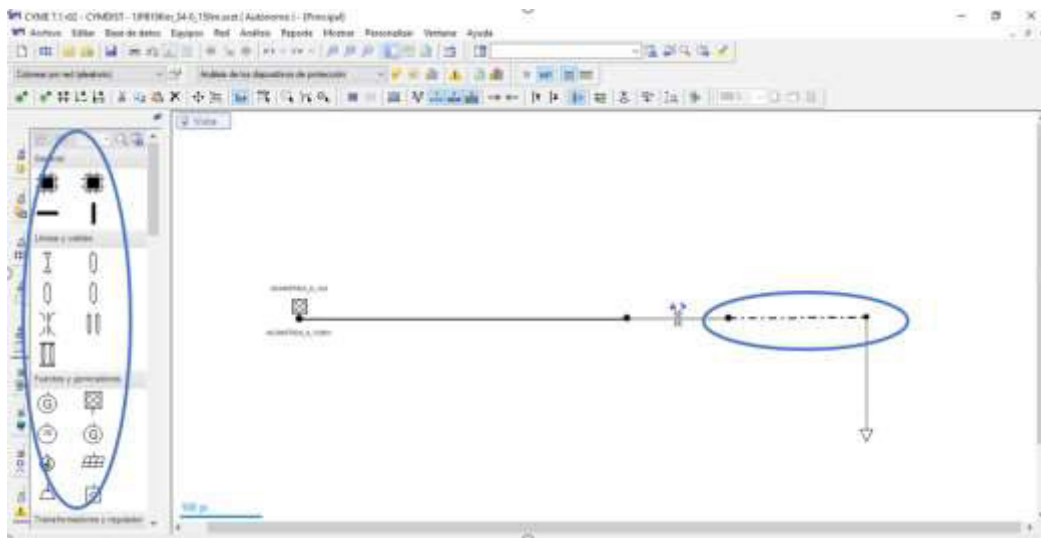


Figura T3. Creación de la subrutina para obtener parámetros del sistema.

Una vez armado el sistema por completo, en el entorno de CYMDIST de CYME, abrimos la pestaña “Equipos”, la cual despliega un menú que nos permitirá cargar valores en todos los elementos necesarios para armar el sistema a 13.8 kV. La lista de elementos a ser asignados un valor específico se muestra en la Figura T4.

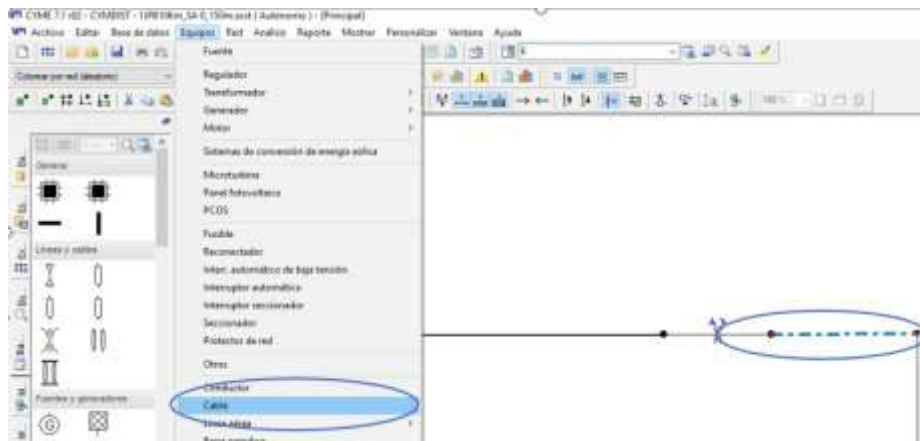


Figura T4. Lista de elementos que conforman el sistema de distribución.

Se asigna los valores específicos a cada uno de los elementos del sistema de distribución como barra de alimentación, líneas, conductores, transformador, carga; para el caso se indica el calibre y dimensiones del conductor preensamblado. Un ejemplo de asignación de valores y calibres se muestra en la Figura T5.

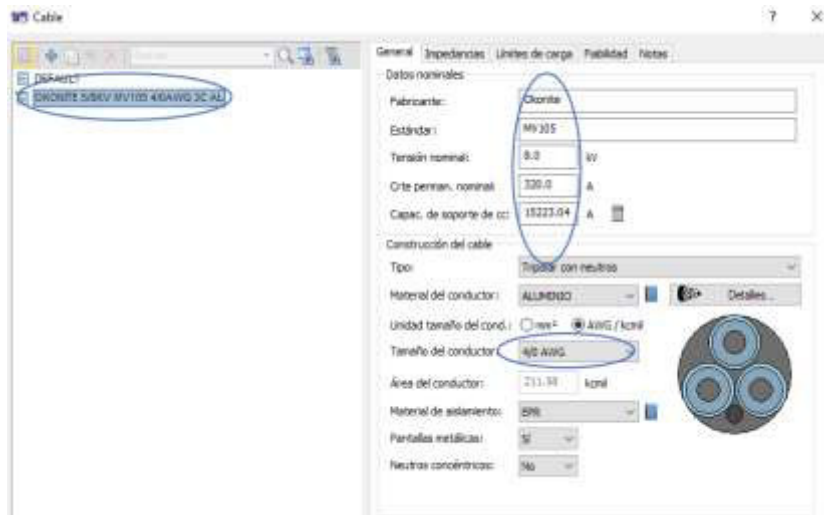


Figura T5. Asignación de valores específicos para cada elemento del sistema.

Una vez ingresado los valores correspondientes a cada uno de los elementos del sistema, podemos obtener la matriz de impedancias tanto en el conductor del lado de medio voltaje como en el conductor en el lado de bajo voltaje que para el caso es preensamblado, en la Figura T6 se aprecia la matriz de impedancias pertenecientes a un conductor preensamblado calibre aproximado al 4/0.

Cable

Tipo: Cable

Número: 6

Estado: Conectado

Longitud: 492.126 pies

Etapas: No definido

Impedancias equivalentes

Impedancias de fase Impedancias de secuencia

	A	B	C	
$Z [ABC] =$	$1.136 + j0.7719$	$0.5795 + j0.5893$	$0.5469 + j0.6301$	Ohms/mi
	$0.5795 + j0.5893$	$1.136 + j0.7719$	$0.5469 + j0.6301$	
	$0.5469 + j0.6301$	$0.5469 + j0.6301$	$1.073 + j0.851$	
$Y [ABC] =$	$0 + j221.3$	$0 + j0$	$0 + j0$	$\mu S/mi$
	$0 + j0$	$0 + j221.3$	$0 + j0$	
	$0 + j0$	$0 + j0$	$0 + j221.3$	

Figura T6. Matriz de impedancias en el lado de medio voltaje para conductor preensamblado.

El valor de las impedancias obtenidas mediante la simulación es el punto de partida para el escalamiento y posterior construcción de resistencias y reactancias inductivas para una futura implementación en el prototipo. Con los valores de impedancias en los conductores tanto en medio voltaje como en bajo voltaje, se

procede a correr un flujo de carga, con el afán de obtener las caídas de voltaje existente en los conductores. La pestaña que contiene la opción de flujo de carga se indica con detalle en la Figura T7.

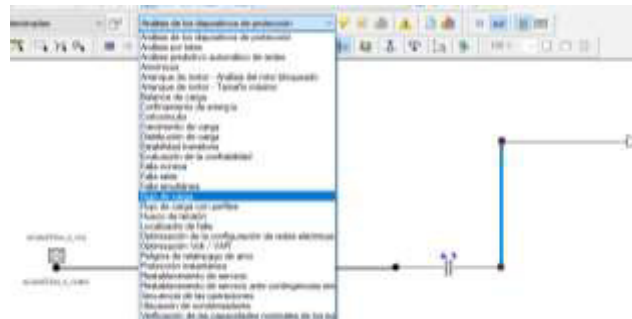


Figura T7. Pestaña donde se encuentra la opción flujo de carga.

Finalmente, para obtener los resultados de caída de voltaje tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje específicamente en el conductor preensamblado, procedemos a dar clic en las pestañas “Cuadro de Resultados” y luego en “Cuadro de Flujo de Carga”, para de esta forma obtener los valores de caída de voltaje y los valores de corriente de los conductores dentro de la simulación, esto para el lado de medio voltaje y bajo voltaje. Los valores de voltaje y corriente en cualquier punto se despliegan en un cuadro como se puede observar en la Figura T8.



Figura T8. Tabla de valores de voltajes y corrientes en el preensamblado.

Los valores obtenidos de voltaje y corriente son los que posteriormente se compararán con los valores obtenidos en el prototipo, siendo prácticamente los mismo en su representación bajo el sistema por unidad p.u.

ANEXO U. Valores de voltaje y corriente en por unidad sensadas por el prototipo

Tabla U1. Alimentador primario 2AWG, L=10 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el circuito secundario caso 1						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.009429	0.009681	2.67	0.127946	0.128028	0.06
2	0.012591	0.013036	3.53	0.128354	0.128299	0.04
3	0.015835	0.016393	3.52	0.128763	0.128711	0.04
4	0.019075	0.019876	4.20	0.129175	0.129107	0.05
5	0.011150	0.011434	2.55	0.128164	0.127924	0.19
6	0.014930	0.015434	3.38	0.128648	0.128428	0.17
7	0.018742	0.019671	4.96	0.129134	0.129329	0.15
8	0.022610	0.023436	3.65	0.129753	0.129963	0.16
9	0.013298	0.013567	2.02	0.128440	0.128210	0.18
10	0.017817	0.018687	4.88	0.129321	0.129415	0.07
11	0.022380	0.023533	5.15	0.129599	0.129901	0.23
12	0.027021	0.028238	4.50	0.130347	0.130210	0.11
13	0.022455	0.023540	4.83	0.129608	0.129685	0.06
14	0.030207	0.031524	4.36	0.130757	0.130638	0.09
15	0.038075	0.040184	5.54	0.131841	0.131545	0.22
16	0.046082	0.047018	2.03	0.132961	0.132993	0.02

Tabla U2. Alimentador primario 2AWG, L=15 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el alimentador primario caso 2						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.000357	0.000354	0.84	0.202963	0.202756	0.10
2	0.000359	0.000355	1.11	0.202868	0.202821	0.02
3	0.000361	0.000359	0.55	0.202724	0.203157	0.21

4	0.000363	0.000363	0.00	0.202581	0.202674	0.05
5	0.000358	0.000356	0.56	0.203059	0.203358	0.15
6	0.000361	0.000374	3.60	0.202963	0.202811	0.07
7	0.000363	0.000377	3.86	0.202868	0.202915	0.02
8	0.000366	0.000359	1.91	0.202772	0.203196	0.21
9	0.000359	0.000346	3.62	0.203202	0.202938	0.13
10	0.000362	0.000377	4.14	0.203107	0.203472	0.18
11	0.000365	0.000361	1.10	0.203059	0.203550	0.24
12	0.000368	0.000373	1.36	0.203011	0.202769	0.12
13	0.000364	0.000362	0.55	0.203871	0.203570	0.15
14	0.000370	0.000364	1.62	0.204158	0.204599	0.22
15	0.000374	0.000371	0.80	0.204349	0.203849	0.24
16	0.000380	0.000386	1.58	0.204636	0.204753	0.06

Tabla U3. Alimentador primario 2AWG, L=15 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el circuito secundario caso 2						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.009430	0.009664	2.48	0.127954	0.127822	0.10
2	0.012619	0.012970	2.78	0.128362	0.128620	0.20
3	0.015837	0.016274	2.76	0.128777	0.128489	0.22
4	0.019077	0.019719	3.37	0.129184	0.129228	0.03
5	0.011150	0.011543	3.52	0.128174	0.127929	0.19
6	0.014930	0.015478	3.67	0.128656	0.128436	0.17
7	0.018744	0.019529	4.19	0.129142	0.129192	0.04
8	0.022612	0.023369	3.35	0.129763	0.129810	0.04
9	0.013299	0.013764	3.50	0.128448	0.128273	0.14
10	0.017823	0.018267	2.49	0.129026	0.129081	0.04
11	0.022382	0.023352	4.33	0.129558	0.129493	0.05
12	0.027024	0.028330	4.83	0.130358	0.130087	0.21
13	0.022455	0.023046	2.63	0.129616	0.129609	0.01
14	0.030214	0.031583	4.53	0.130768	0.131029	0.20

15	0.038078	0.039385	3.43	0.131852	0.131592	0.20
16	0.046084	0.046167	0.18	0.132971	0.133228	0.19

Tabla U4. Alimentador primario 2AWG, L=20 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el alimentador primario caso 3						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.000379	0.000371	2.11	0.260898	0.261315	0.16
2	0.000383	0.000370	3.39	0.260707	0.260745	0.01
3	0.000386	0.000393	1.81	0.260564	0.260317	0.09
4	0.000388	0.000373	3.87	0.260277	0.260425	0.06
5	0.000382	0.000372	2.62	0.260946	0.260986	0.02
6	0.000385	0.000389	1.04	0.260755	0.261090	0.13
7	0.000388	0.000381	1.80	0.260564	0.260477	0.03
8	0.000392	0.000403	2.81	0.260372	0.259917	0.17
9	0.000384	0.000372	3.13	0.261042	0.260708	0.13
10	0.000387	0.000387	0.00	0.260850	0.261175	0.12
11	0.000391	0.000392	0.26	0.260707	0.260390	0.12
12	0.000395	0.000402	1.77	0.260611	0.261089	0.18
13	0.000390	0.000363	6.92	0.261567	0.261600	0.01
14	0.000397	0.000394	0.76	0.261663	0.262244	0.22
15	0.000404	0.000401	0.74	0.261759	0.261818	0.02
16	0.00041	0.000397	3.17	0.261806	0.261944	0.05

Tabla U5. Alimentador primario 2AWG, L=20 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el circuito secundario caso 3						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.009430	0.009778	3.69	0.127957	0.128070	0.09
2	0.012619	0.013159	4.28	0.128363	0.128245	0.09

3	0.015887	0.016276	2.45	0.128773	0.128533	0.19
4	0.019078	0.019774	3.65	0.129185	0.129137	0.04
5	0.128818	0.133229	3.42	0.128175	0.128201	0.02
6	0.014932	0.015454	3.50	0.128658	0.128441	0.17
7	0.018744	0.019583	4.48	0.129144	0.128911	0.18
8	0.022614	0.024030	6.26	0.129766	0.129536	0.18
9	0.013300	0.013826	3.95	0.128450	0.128135	0.25
10	0.017819	0.018281	2.59	0.128818	0.129052	0.18
11	0.022382	0.022876	2.21	0.129609	0.129813	0.16
12	0.027023	0.028158	4.20	0.130361	0.130107	0.19
13	0.022458	0.023478	4.54	0.129619	0.129936	0.24
14	0.030212	0.031578	4.52	0.130772	0.130923	0.12
15	0.038080	0.039715	4.29	0.131856	0.132184	0.25
16	0.046082	0.046177	0.21	0.132976	0.132707	0.20

Tabla U6. Alimentador primario 2AWG, L=25 km; todas las combinaciones de circuito secundario

Mediciones en el alimentador primario caso 4						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.000356	0.000360	1.12	0.322801	0.322131	0.21
2	0.000359	0.000369	2.79	0.322562	0.322943	0.12
3	0.000363	0.000376	3.58	0.322323	0.322206	0.04
4	0.000366	0.000383	4.64	0.322084	0.321886	0.06
5	0.000358	0.000357	0.28	0.322848	0.322693	0.05
6	0.000362	0.000354	2.21	0.322609	0.322844	0.07
7	0.000366	0.000371	1.37	0.322370	0.321635	0.23
8	0.000370	0.000397	7.30	0.322131	0.322621	0.15
9	0.000360	0.000379	5.28	0.322886	0.323296	0.13
10	0.000364	0.000390	7.14	0.322705	0.322398	0.10
11	0.000369	0.000390	5.69	0.322466	0.322247	0.07
12	0.000375	0.000406	8.27	0.322275	0.321747	0.16
13	0.000368	0.000376	2.17	0.323326	0.323801	0.15

14	0.000377	0.000386	2.39	0.323279	0.323399	0.04
15	0.000385	0.000400	3.90	0.323231	0.323780	0.17
16	0.000393	0.000418	6.36	0.323185	0.322675	0.16

Tabla U7. Alimentador primario 2AWG, L=25 km; todas las combinaciones de circuito secundario.

Mediciones en el circuito secundario caso 4						
No	Voltaje en p.u. Teórico	Voltaje en p.u. Práctico	% de error	Corriente en p.u. Teórico	Corriente en p.u. Práctico	% de error
1	0.009432	0.009798	3.88	0.127952	0.128064	0.09
2	0.012621	0.013548	7.34	0.128359	0.128308	0.04
3	0.015836	0.016272	2.75	0.128769	0.128662	0.08
4	0.019077	0.019987	4.77	0.129180	0.128940	0.19
5	0.011150	0.011550	3.59	0.128171	0.127979	0.15
6	0.014930	0.015879	6.36	0.128654	0.128870	0.17
7	0.018741	0.019797	5.63	0.129139	0.129126	0.01
8	0.022614	0.023543	4.11	0.129763	0.129621	0.11
9	0.013300	0.013871	4.29	0.128446	0.128176	0.21
10	0.017822	0.018645	4.62	0.129023	0.129030	0.01
11	0.022382	0.023233	3.80	0.129558	0.129623	0.05
12	0.027020	0.028344	4.90	0.130358	0.130408	0.04
13	0.022457	0.023333	3.90	0.129614	0.129606	0.01
14	0.030213	0.031742	5.06	0.130769	0.130691	0.06
15	0.038079	0.040522	6.42	0.131853	0.131745	0.08
16	0.024678	0.024726	0.19	0.132973	0.132719	0.19

ANEXO V. Fotos de varios ángulos del prototipo culminado y funcional con varios casos interconectados.



Figura V1. Conexión interna de elementos para alimentador primario(A/P).



Figura V2. Conexión interna de elementos circuito secundario(C/S).



Figura V3. Conexión interna de todos los elementos que constituyen el prototipo (Vista Posterior).



Figura V4. Modulo totalmente cerrado vista lateral



Figura V5. Vista del tablero de conexión.



Figura V6. Modulo prototipo con todos sus elementos integrados y funcionales.



Figura V7. Módulo finalizado que representa el sistema de distribución de 13.8 kV.

ANEXO W. Manual de usuario del módulo a escala

Anexo digital.

ORDEN DE EMPASTADO