

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**AMPLIACIÓN DE EMULADOR DE A/P Y C/S CON CALIBRES DE  
CONDUCTOR # 2, 1/0, 2/0, 3/0 Y 4/0 PARA EL LABORATORIO DE  
DISTRIBUCIÓN**

**AMPLIACIÓN DE EMULADOR DE A/P Y C/S CON CALIBRE DE  
CONDUCTOR 2/0 PARA A/P PARA EL LABORATORIO DE  
DISTRIBUCIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**CRISTIAN ANDRÉS PICOITA RENGEL**

**cristian.picoita@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO**

**miguel.lucio@epn.edu.ec**

**DMQ, Febrero 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, CRISTIAN ANDRÉS PICOITA RENGEL declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**CRISTIAN ANDRÉS PICOITA RENGEL**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CRISTIAN ANDRÉS PICOITA RENGEL, bajo mi supervisión.



---

**MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CRISTIAN ANDRÉS PICOITA RENGEL

MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO

ALEXANDER FRANCISCO HIDALGO SARANGO

SEBASTIAN ALEJANDRO VALENCIA PÉREZ

DARWIN ALBERTO YÁNEZ CATOTA

## DEDICATORIA

*A Dios y a la Virgen del Cisne.*

*A mis padres José y Mercy, que son mi motivación a ser mejor cada día.*

*A mi hermano Jose Luis, hoy te siento aquí más que nunca.*

*A mis hermanos Alberto y Vanessa, a quienes admiro tanto.*

*A mi hermano Miguel, y mis sobrinos David, Sofía, Nicolás, Felipe, Julieta, Ignacio y  
María, anhelo que esto inspire sus sueños.*

*A mis abuelos, tíos, primos y a toda mi familia y amigos, que me han apoyado siempre.*

*¡A ustedes les debo este logro!*

Cristian Andrés Picoita R.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer a mi Madre que siempre ha estado conmigo dándome su apoyo y amor en cada momento de mi vida, admiro tu fortaleza y tu bondad, formaste una persona de valores, los cuales prevalecerán en mi vida profesional; sin ti no hubiera logrado nada. Gracias Papá, me has dado la mejor educación, te esforzaste tanto para que no me falte nada, incluso poniéndome delante de ti, siempre admirare como eres tan bueno con la gente; has dejado lo mejor de ti en mí. Son los mejores padres que Dios me pudo dar, y soy un profesional gracias a ustedes. Hoy quiero que estén orgullosos de lo que hemos logrado.

Quiero agradecer a mis hermanos mayores Alberto y Vanessa por brindarme su apoyo siempre, por ser un ejemplo para mí, como padres, hermanos, profesionales y sobre todo como personas, no saben cuánto los admiro. A mi hermano pequeño Miguel, sé que ahora te fijas en mí y por eso seré mejor cada día, te apoyaré y estaré contigo siempre.

Agradezco a mi ángel Jose Luis, cuando estaba a tu lado sentía que lo podía todo, me exigiste a superarme y a ser más fuerte, me apoyaste en cada dificultad que tenía; ahora todo lo hago contigo, este es nuestro logro hermano. Sufrí cuando partiste, porque pensaba que no ibas a poder estar hoy aquí, que equivocado estaba...

Gracias a mis tíos, primos y toda mi familia que siempre ha estado pendiente de mí, ayudándome sin ningún interés, siempre han creído en mí y que puedo lograrlo todo, espero al haber cumplido esta meta, también se sientan orgullosos.

También quiero agradecer al M.Sc. Miguel Lucio por sus enseñanzas durante toda la carrera, su ayuda y guía fue esencial para el desarrollo de este proyecto, gracias por haberlo hecho con tanto compromiso y vocación.

Agradecer a mis compañeros Alex, Sebastián y Darwin que junto a ellos emprendimos esta recta final, juntos lo hicimos posible

Y finalmente a mis amigos de la universidad que siempre me apoyaron a lo largo de mi formación profesional, y un agradecimiento especial a Santiago, Kevin y Kalif me han brindado su amistad incondicional y con su apoyo siempre he podido superar cada dificultad que se me presento en esta etapa de mi vida.

Agradecido eternamente con Dios y todos ustedes, hoy lo hemos logrado,

Cristian Andrés

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3 ALCANCE .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO .....	3
1.4.1 RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	3
1.4.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	4
1.4.3 TIPOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	5
1.4.4 TIPOS DE CONDUCTORES .....	5
1.4.5 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL ALIMENTADOR PRIMARIO	6
1.4.6 CONFIGURACIONES BÁSICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO .....	7
1.4.7 PARÁMETROS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	9
1.4.8 MODELO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....	13
1.4.9 MÉTODO DE ANÁLISIS APROXIMADOS.....	15
1.4.10 ECUACIONES DE CARSON.....	19
1.4.11 MATRIZ DE IMPEDANCIA PRIMITIVA EN LÍNEAS AÉREAS .....	20
1.4.12 MATRIZ DE IMPEDANCIA PARA LÍNEAS AÉREAS Y REDUCCIÓN DE KRON .....	20
2 METODOLOGÍA.....	23
2.1 SISTEMA A ESCALA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV 23	
2.2 ESCALAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REAL AL VOLTAJE DE LA RED CON EL SISTEMA DE TRANSFORMACIÓN POR UNIDAD.....	23
2.3 DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR. ....	25

2.4	DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE IMPEDANCIA SERIE PARA EL MODULO DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, PARA SU POSTERIOR IMPLEMENTACIÓN EN EL MODULO .....	27
2.4.1	MEDIANTE EL CÁLCULO MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE Y ESCALAMIENTO A LAS BASES DEL PROTOTIPO .....	27
2.4.2	MEDIANTE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV31	
2.5	DETERMINACIÓN DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN POR UNIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV, CON EL ALIMENTADOR PRIMARIO DE CALIBRE 2/0 AWG ASCR .....	34
2.5.1	OBTENCIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE MEDIANTE EL FCV .....	34
2.5.2	OBTENCIÓN DE CAÍDAS DE VOLTAJE MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV EN CYMDIST	35
2.7	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE IMPEDANCIA.....	38
2.7.1	RESISTENCIA A USAR EN EL MÓDULO DEL ALIMENTADOR PRIMARIO.....	38
2.7.2	ELABORACION DE LA INDUCTANCIA A PARTIR DE UN TOROIDE	39
2.7.3	ELABORACIÓN DE LA PLACA DE IMPEDANCIA .....	39
2.7.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO IDENTIFICADOR DE CASOS.....	40
2.7.5	IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO ESP32 .....	41
2.7.6	ESTRUCTURA DEL MÓDULO .....	41
2.8	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA.....	42
2.8.1	ELEMENTOS DEL SISTEMA A ESCALA .....	43
2.8.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO .....	43
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	47
3.1	RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA SERIE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO .....	47
3.2	RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LA IMPEDANCIA SERIE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO ...	49
3.3	CONDUCTOR Y CALIBRE MÁS ÓPTIMO PARA UNA MENOR CAÍDA DE VOLTAJE.....	51
3.3.1	CASO DE ESTUDIO 1: ALIMENTADOR PRIMARIO DE CALIBRE 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD DE 15 KM. Y VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 4/0 AWG ASCR.....	52
3.3.2	CASO DE ESTUDIO 2: ALIMENTADOR PRIMARIO CON CALIBRE 2 AWG ASCR Y CAMBIO DE CALIBRE A 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD	

DE 15 KM. Y VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 1/0 AWG ASCR.....	53
3.3.3 CASO DE ESTUDIO 3: ALIMENTADOR PRIMARIO CON CALIBRE 2 AWG ASCR CON VARIACIÓN EN SU LONGITUD Y CAMBIO DE CALIBRE A 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD DE 15 KM. Y CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 1/0 AWG ASCR CON UNA SOLA DISTANCIA.....	54
3.4 RESULTADOS DE CAÍDAS DE VOLTAJE DEL VOLTÍMETRO INALÁMBRICO TOMADAS EN EL MÓDULO EN TIEMPO REAL, Y VERIFICACIÓN DE LAS MISMAS CON LAS OBTENIDAS MEDIANTE SIMULACIÓN EN CYME .....	55
3.4.1 RESULTADOS DE LAS CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL CASO 2 DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, CALIBRE 2/0 AWG ASCR, CON CASOS AL AZAR DEL CIRCUITO SECUNDARIO .....	56
3.4.2 RESULTADOS DE LAS CAÍDAS DE VOLTAJE EN TODOS LOS CASOS DEL CIRCUITO SECUNDARIO, CON EL CASO 2 DEL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA UN CALIBRE 2/0 AWG ASCR. ....	56
3.5 RESULTADOS DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA .....	58
3.6 CONCLUSIONES .....	59
3.7 RECOMENDACIONES .....	61
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
5 ANEXOS .....	65



## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación, se construye un módulo de impedancia para emular un alimentador primario con un conductor de calibre 2/0 AWG ASCR y longitud de 15 km, que se acopla al prototipo del sistema de distribución a escala implementado en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Para el cálculo de los parámetros del alimentador primario, se determinará la matriz de impedancia por fase mediante la simulación del sistema de distribución real en el software CYMDIST, además de verificar los valores con el cálculo teórico y el sistema por unidad. El alimentador primario se cataloga como línea corta, por tanto, en el equivalente del modelo solo se considera la impedancia serie, compuesta por resistencia e inductancia. En la construcción del conductor del alimentador, se usa una resistencia de potencia y una inductancia elaborada a partir de un núcleo toroidal.

Al ensamblar el módulo del alimentador primario al sistema a escala, se tomará medidas de caídas de voltaje y corriente, en diferentes casos de estudio con variaciones de distancia y calibre en el circuito secundario, usando el voltímetro inalámbrico propio del sistema a escala. Las mediciones se visualizarán en una interfaz web y se comprobarán a través de las caídas de voltajes obtenidas en la simulación de CYME.

Finalmente, se hace un análisis de las caídas de voltaje, para determinar el calibre óptimo entre el conductor implementado y el conductor propio del sistema a escala.

**PALABRAS CLAVE:** Alimentador primario (AP), circuito secundario (C/S), caída de voltaje, interfaz web, CYMDIST, sistema de distribución, sistema a escala, prototipo, modulo, sistema por unidad (p.u).

## ABSTRACT

In the present degree project, an impedance module will be built to emulate a distribution feeder of a 2/0 AWG ASCR conductor size, the line length is 15 km. The module will be coupled to the scale distribution system prototype implemented in the Electric Power Distribution Laboratory at Escuela Politécnica Nacional.

In calculation parameters of distribution feeder, the phase impedance matrix will be determined by simulating the real distribution system in the CYMDIST software, in addition the values will be verified with the theoretical calculation and using the per-unit system. The distribution feeder is classified as a short line, therefore, in the equivalent model, only the series impedance, composed of resistance and inductance, is considered. For the construction of conductor, a power resistor and an inductance elaborated from a toroidal core are used.

When the module of distribution feeder is assembled to the scale system, voltage drops and currents will be measured, for different case studies with variations of distance and size of the low voltage circuit. The measurements will be taken with the scale system's own wireless voltmeter, they will be displayed in a web interface and they will be verified through the voltage drops obtained in the simulation of CYME.

Finally, with an analysis of the voltage drops, the optimal conductor size will be determined between the implemented distribution feeder and the scale system's own distribution feeder.

**KEYWORDS:** Distribution feeder (AP), secondary circuit (C/S), voltage drop, web interface, CYMDIST, distribution system, scale system, prototype, module, per-unit (p.u).

# 1 INTRODUCCIÓN

La red de distribución desempeña un cargo muy importante dentro del sistema eléctrico del país, el cual se encarga del transporte de la energía eléctrica, que le lleva desde las subestaciones de distribución y la entrega a los consumidores.

Los sistemas de distribución deben cumplir con principios comunes, como brindar un servicio de calidad con un mínimo de variaciones de voltaje de acuerdo a las exigencias de la empresa eléctrica distribuidora. Además, debe brindar confiabilidad al sistema procurando un mínimo de interrupciones, las cuales deben ser de muy corta duración y afectar a la mínima cantidad de clientes finales. Y con estas consideraciones, el costo debe ser las más económico, teniendo en cuenta la construcción, operación y mantenimiento para brindar un servicio eléctrico adecuado.

Dentro del sistema de distribución uno de los componentes más importantes es el alimentador primario, el cual se encarga del transporte de energía desde la subestación de alimentación hacia los transformadores de distribución. En su operación, el transporte de potencia a través de los conductores, afecta de manera negativa al sistema de distribución, por los efectos indeseables que implican la variación de alguno de los parámetros del alimentador primario, como caídas de voltaje, que deben ser tratadas a tiempo, para que no afecta en la calidad de energía entregada al usuario.

Es por esto que se busca complementar el sistema de distribución a escala de 13.8 kV del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, con la implementación de un nuevo módulo que disponga la ampliación de calibres en los alimentadores primarios, realizando también variaciones en su longitud, para así completar el estudio en la operación de los sistemas de distribución y los efectos que impliquen con estos nuevos modelos a escala del alimentador primario. Completando, de forma computacional la implementación del módulo al sistema de distribución para verificar los resultados prácticos.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un módulo emulador para conductor ACSR 2/0 AWG en alimentadores primarios, para incluir en el sistema de distribución a escala del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar y construir un módulo emulador en un alimentador primario, considerando únicamente la impedancia serie  $R+jX$  del modelo, dado que en distribución se usan líneas cortas por sus longitudes.
2. Determinar los parámetros eléctricos de los alimentadores primarios en el sistema de distribución a través de ensayos.
3. Presentar y comparar los parámetros del sistema de distribución a escala, al cambiar el conductor ACSR #2 AWG a ACSR 2/0 AWG tomando las mediciones de voltaje y corriente que se evidenciaran en la simulación.
4. Realizar mediciones de voltaje y corriente en puntos específicos del sistema, usando el programa de medición inalámbrica del emulador.

## **1.3 ALCANCE**

La construcción e implementación del módulo de ampliación de calibres en los A/P dentro del emulador del sistema, tendrá un tiempo de ejecución de 49 horas. Continuamente, a través de investigación y con el uso del conocimiento técnico se procederá a diseñar, simular y construir la impedancia serie física con su respectiva emulación, para lo cual se tendrá un tiempo de 170 horas, realizando la implementación y ensamblaje del módulo al emulador del sistema, y finalmente la elaboración del trabajo escrito con sus respectivas conclusiones y recomendaciones como resultado del proyecto desarrollado.

El entregable del trabajo, será el módulo de impedancia que emule el A/P con conductor ACSR de calibre 2/0 AWG, que será implementada y acoplada al módulo del emulador del sistema de distribución de 13.8 kV elaborado por los Sres. Henry Jiménez y Fernando Llumiquinga.

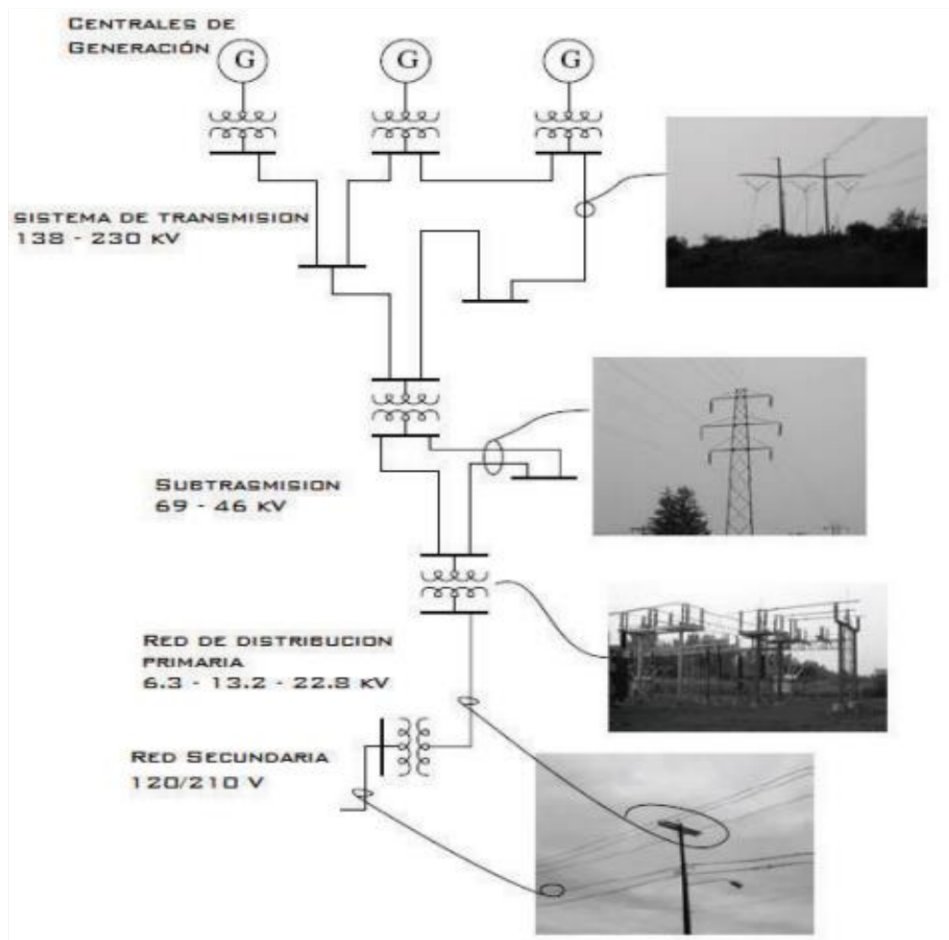
## 1.4 MARCO TEÓRICO

### 1.4.1 RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Dentro de un sistema de energía, una fase de gran importancia es la distribución, debido a la cercanía al usuario consumidor. Su papel es llevar la energía desde una subestación de distribución y la entrega a los consumidores, sin tener limitación en la alimentación u otra restricción técnica. [1]

En Ecuador la red de distribución empieza en las subestaciones de subtransmisión, luego va hacia las subestaciones de distribución dentro de las ciudades, donde el voltaje se reduce a nivel primario, y así finalmente con los transformadores de distribución se toma el voltaje de la red primaria y se lo reduce a nivel de voltaje apto para el consumo, que se entrega a los clientes finales a través de los circuitos secundarios. [2]

En la Figura 1.1, se muestra la estructura de un sistema de energía eléctrica que parte desde la generación, y va hasta el cliente final. La etapa de distribución se estructura desde las subestaciones de distribución hasta las redes secundarias que llegan a los usuarios. [2]



**Figura 1.1.** Visión general de un sistema de energía eléctrica. [2]

### 1.4.1.1 Niveles de voltaje en Ecuador

Los niveles de voltaje estandarizados por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en la regulación Nro. ARCONEL 005/17, son: [3]

Bajo voltaje :  $BV < 0.6$  [kV]

Medio Voltaje :  $0.6 \leq MV \leq 40$  [kV] (Redes Primarias)

Alto voltaje :  $AV > 40$  [kV]

En Ecuador quien se encarga de la distribución de energía eléctrica dentro del país, son CNEC y las empresas eléctricas, que en su mayoría maneja un nivel de voltaje primario de 13.8 kV, siendo el más común en el país, aunque algunas distribuidoras operan con otros valores de voltaje como 13.2 o 22.8 kV. [4]

### 1.4.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

En una red de distribución se incluye los siguientes elementos:

- Subestación de distribución: Su función es reducir el voltaje de subtransmisión al de distribución primaria, para luego suministrarlo a los usuarios mediante ramificaciones. Incluye la recepción de las líneas de subtransmisión, transformador de reducción, salida de los alimentadores primarios y equipos de protección y control. [1]
- Alimentadores primarios: Son las líneas o circuitos a nivel de voltaje primario, que transportan la potencia desde la subestación de distribución hasta los transformadores de distribución. El voltaje primario dentro del país tiene los siguientes valores: 6.3 kV, 13.8 kV y 22.8 kV. [1]
- Transformador de distribución: Es el transformador que reduce el nivel de voltaje primario y suministra servicio al nivel de voltaje secundario para los consumidores. [1]
- Circuitos Secundarios: Son las líneas o circuitos encargados de distribuir la energía a nivel de voltaje de utilización, que enlazan al transformador de distribución a las acometidas del usuario. El voltaje secundario dentro del país tiene los siguientes valores: 240/120 V y 220/127 V. [1]

### **1.4.3 TIPOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

En los últimos años se ha tenido un crecimiento enorme en el desarrollo de las ciudades, tanto en temas demográficos, urbanos, tecnológicos, entre otros, que exigen la evolución de los sistemas eléctricos, para poder abastecer de energía a todos los usuarios. [2]

Es por esto que se ha visto que los sistemas eléctricos también han evolucionado y han ido creciendo a través de nuevas tecnologías. La tendencia se enfoca a aumentar la confiabilidad, mientras se abarca más cobertura, de tal forma que los clientes se mantengan satisfechos. Por otro lado, se busca reducir costos y pérdidas en los sistemas, a través de sistemas más eficientes y sostenibles, que se logra con algunos tipos de redes de distribución, entre las más importantes redes aéreas y subterráneas, además de diferentes topologías de las mismas, que también serán objeto de estudio más adelante. [2]

#### **1.4.3.1 Redes aéreas**

Se ubican a lo largo de las calles, sus elementos se instalan en una estructura aérea levantada sobre el terreno y el aislamiento de los equipos se hace en aire. Por lo general se usan para las líneas de distribución que entregan energía a los clientes. [2]

La confiabilidad y seguridad de este tipo de líneas es baja, debido a tener una gran exposición a fallas que se pueden provocar por caída de árboles, descargas eléctricas, entre otras causas. [2]

#### **1.4.3.2 Redes subterráneas**

Sus elementos están instalados bajo el nivel del suelo. Se compone de una cámara de transformación, pozos de revisión, canalizaciones, conductores aislados, equipos de protección y seccionamiento, y el aislamiento no es en aire. [2]

Este tipo de red se diferencia al tipo aérea, por ser más costosa, sin embargo, debido a ser un sistema más confiable y seguro, el beneficio es mayor a pesar del alto costo de inversión. [2]

### **1.4.4 TIPOS DE CONDUCTORES**

Los materiales de los conductores para la transmisión de potencia, son el cobre y el aluminio. Todas las líneas de transmisión de Ecuador eran de cobre, después el aluminio entró a remplazar el cobre, debido a la facilidad de su tecnología que dio paso a un costo de fabricación más bajo que el del cobre. Así también, el aluminio al ser más liviano que el cobre, ha permitido abaratar el costo de las líneas de transmisión al no tener que hacer estructuras de soporte muy robustas. [5]

Otra ventaja del aluminio, es tener un mayor diámetro que el cobre con la misma resistencia. Con un diámetro mayor, las líneas de flujo eléctrico originadas en el conductor, tienen más separación en una superficie al mismo voltaje, es decir, disminuye el gradiente de voltaje en la superficie del conductor y la tendencia a ionizar el aire alrededor del conductor, impidiendo así el efecto corona, causado por la ionización. [5]

En las redes de distribución a nivel nacional se usa conductores de aluminio desnudo para redes aéreas, y conductores de cobre para casos únicos de redes subterráneas. Los diferentes tipos de conductores compuestos de aluminio se identifican con la siguiente simbología: [5]

ACAR conductores de aluminio con alma de aleación

AAC todos los conductores de aluminio

AAAC todos los conductores con aleación de aluminio

ACSR conductores de aluminio con alma de aleación [5]

Los conductores de aleación de aluminio tienen más resistencia a la tensión que los conductores de aluminio. El ACSR Y ACAR son los tipos de conductores más comunes para las líneas aéreas de transmisión y distribución. [5]

El ACSR tiene como material el aluminio reforzado que dispone de alma de acero, según la norma ASTM designación B232 en aluminio y designación B498 en acero. Además, se encuentran de manera concéntrica con disposición de 6/1 hilos sin sobrepasar el calibre 4/0 AWG y 26/7 para calibres superiores. [6]

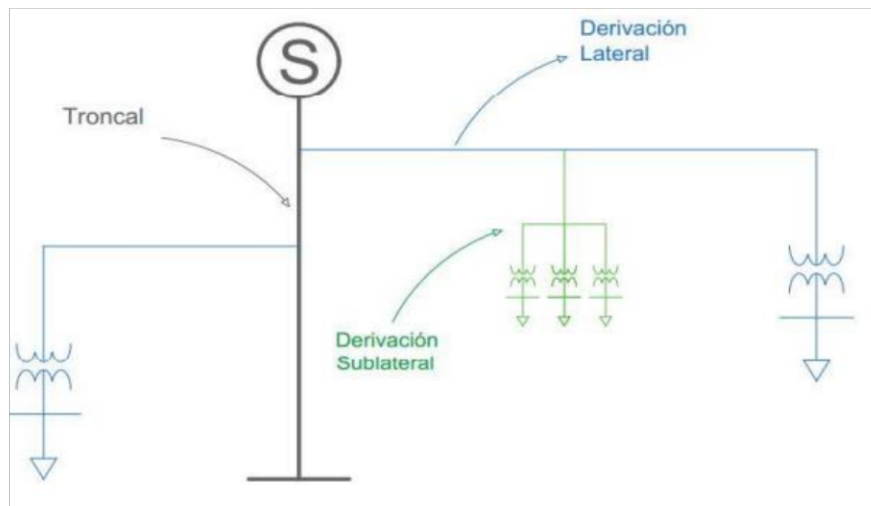
#### **1.4.5 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL ALIMENTADOR PRIMARIO**

En la Figura 1.2 se ilustran las partes del alimentador primario. De la subestación de distribución sale los alimentadores primarios, los cuales se constituyen de la siguiente manera:

- A/P expresos. – Se caracteriza por no tener caída de voltaje, y alimentan generalmente industrias.
- A/P troncales. – Se trata de la parte del alimentador que soporta la mayor circulación de corriente en el circuito primario, alimentan el servicio público
- A/P de distribución. – Permite la derivación de los mismos los alimentadores primarios o incluso de estos alimentadores instalarse los transformadores de distribución.



- Derivación lateral. – Se deriva desde un A/P troncal, soportando una menor circulación de corriente.
- Derivación sublateral. – Son las ramas que nacen de la derivación lateral, teniendo aún menor capacidad de circulación de corriente, al alimentar solo pocos transformadores. [3]



**Figura 1.2.** Constitución de un alimentador primario. [3]

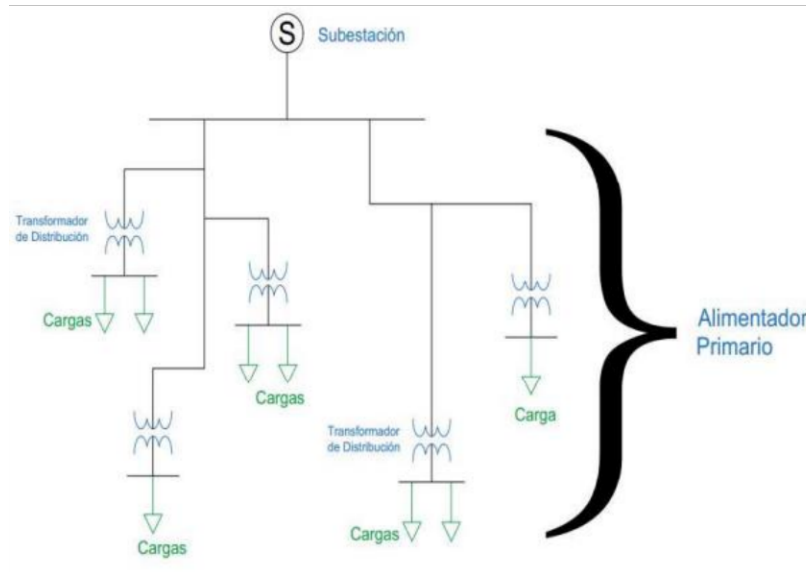
#### **1.4.6 CONFIGURACIONES BÁSICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO**

La topología o configuración de un sistema de distribución es la disposición o arreglo de la distribución de la energía eléctrica. A continuación, se presenta las configuraciones más comunes de los alimentadores primarios que se usan en Ecuador: [7]

##### **1.4.6.1 Alimentador primario tipo radial**

Se trata del esquema más simple y económico por ser el más fácil de construir e instalar; razones por las cuales es el más común en la disposición de los alimentadores primarios. Por lo general se usan para zonas de baja densidad de carga, como el sector rural. En la Figura 1.3 se muestra el sistema radial convencional, con recorrido desde la subestación de distribución hacia los transformadores individuales, sin intersección de alguna otra subestación u alimentador. [3] [7]

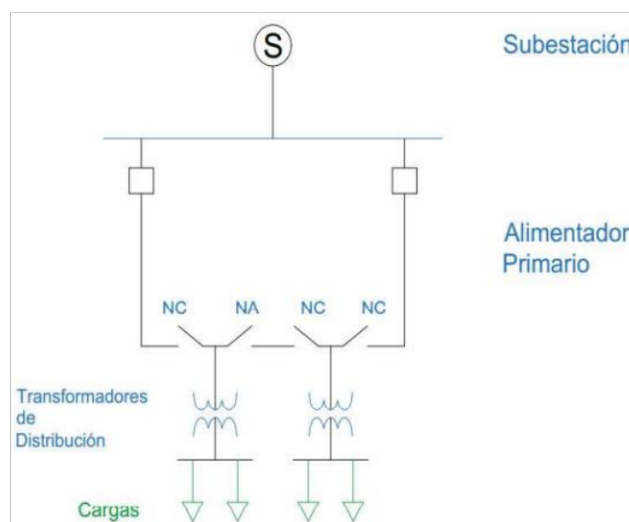
Las características de este sistema, es una baja confiabilidad en el servicio, debido a que al ocurrir alguna falla en algún punto del alimentador causara el corte del servicio a los usuarios al no tener ninguna ruta alternativa de reconexión, es decir que el consumidor del sistema no dispondrá de energía hasta reactivar el transformador o alimentador. [3] [7]



**Figura 1.3.** Alimentador primario radial convencional. [3]

#### 1.4.6.2 Alimentador primario tipo anillo

En la Figura 1.4 se muestra un alimentador primario tipo anillo. Este esquema se caracteriza por tener desde la subestación de distribución dos trayectorias paralelas para suministrar la energía hacia la carga; el anillo es operado con interruptores de enlace. De esta manera, cuando exista una falla en un alimentador o entre a mantenimiento, el arreglo permite que el alimentador suministre energía eléctrica desde otro alimentador o subestación hacia la red en anillo. Así el suministro de energía no se ve afectado cuando el alimentador salga de servicio; y si existe una falla en la trayectoria del anillo, se puede aislar ese tramo. [3] [7]



**Figura 1.4.** Alimentador primario en anillo. [3]

### 1.4.6.3 Alimentador primario tipo mallado

El esquema tipo malla presenta una gran confiabilidad y eficiencia, debido a que presenta más cantidad de interconexiones, lo que implica también un costo elevado. Los alimentadores radiales pueden derivarse de los alimentadores primarios de enlace interconectados o directamente desde la subestación de distribución; en cuanto a protecciones, tiene gran complejidad en el diseño y operación de esta topología, al considerar todas las interconexiones tanto entre alimentadores como hacia otras subestaciones. Se utiliza para zonas de alta densidad de carga. [3] [6]

En la Figura 1.5 se muestra el diagrama de un sistema de alimentadores tipo mallado, alimentado por varias subestaciones de distribución. [3]

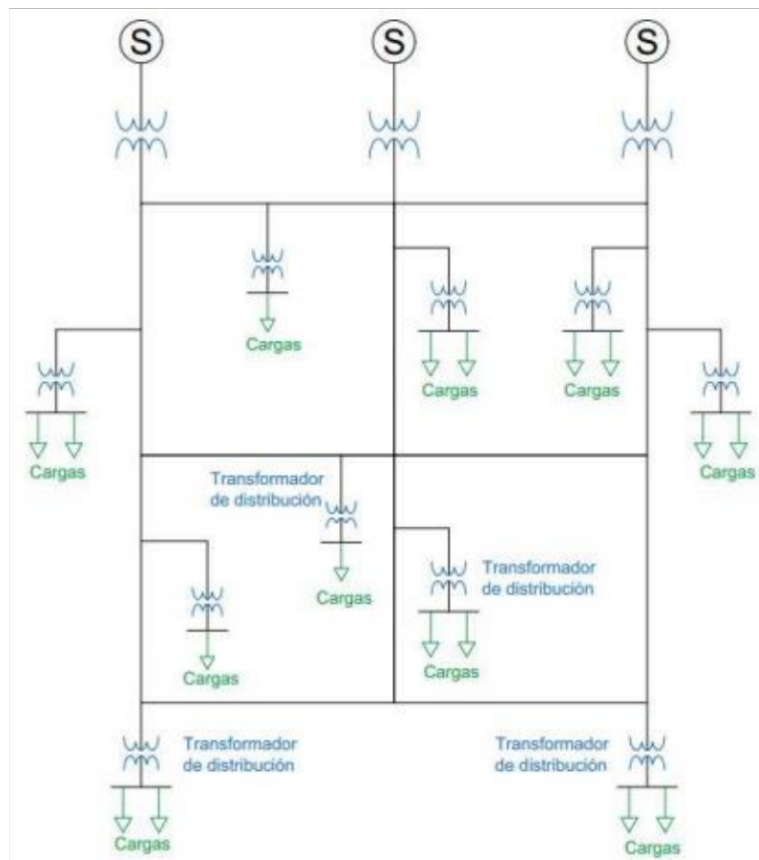


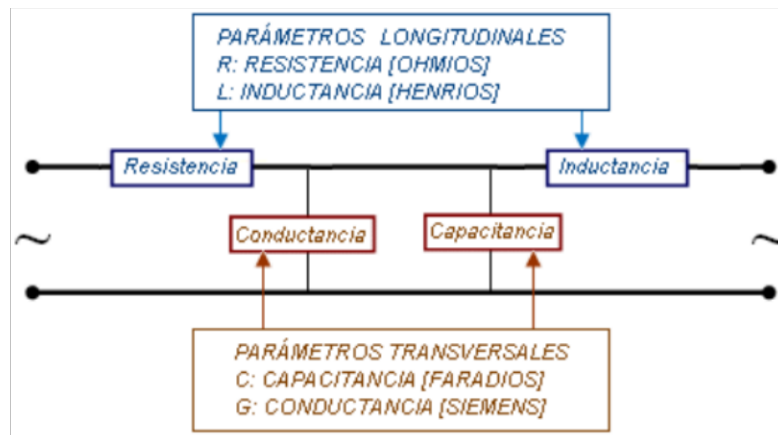
Figura 1.5. Alimentador primario en malla. [3]

### 1.4.7 PARÁMETROS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

La línea de transmisión consta de 4 parámetros que representan su capacidad de funcionamiento dentro del sistema de potencia. En la Figura 1.6 se muestra los parámetros de la línea de transmisión distribuidos a lo largo de la línea, los cuales conforman la impedancia serie del alimentador; y los parámetros paralelos entre el conductor y tierra. [8]

Los parámetros son:

- Resistencia serie [ $\Omega/\text{km}$ ]
- Inductancia serie [ $\text{H}/\text{km}$ ]
- Capacitancia en derivación [ $\text{F}/\text{km}$ ]
- Conductancia en derivación [ $\text{S}/\text{km}$ ] [8]



**Figura 1.6.** Parámetros de una línea de transmisión. [8]

Para el desarrollo del presente proyecto solo se focaliza el estudio de alimentadores primarios, por lo que solo se desarrolla y analiza la impedancia serie de la línea, al considerar el alimentador primario como línea corta, que más adelante se profundizará acerca de su modelo.

#### 1.4.7.1 Resistencia Serie

La resistencia es el parámetro eléctrico de la línea de transmisión, que permite evaluar las pérdidas de potencia en el alimentador por efecto joule. Esta resistencia se refiere a la resistencia efectiva que se define por la siguiente ecuación: [5] [8]

$$R = \frac{\text{Pérdidas de Potencia en el conductor}}{I^2} \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

La resistencia efectiva será igual a la resistencia DC, solo si la distribución de corriente es uniforme a lo largo del conductor, por lo que el punto de análisis será la resistencia DC que se calcula con la siguiente ecuación: [5] [8]

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \quad (1.2)$$

Donde:

$R_{dc}$  = Resistencia directa en el conductor [ $\Omega$ ]

$l$  = Longitud [m]

$A$  = Área de la sección conductora [ $mm^2$ ]

$\rho$  = Resistividad del conductor a 20 °C [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ]

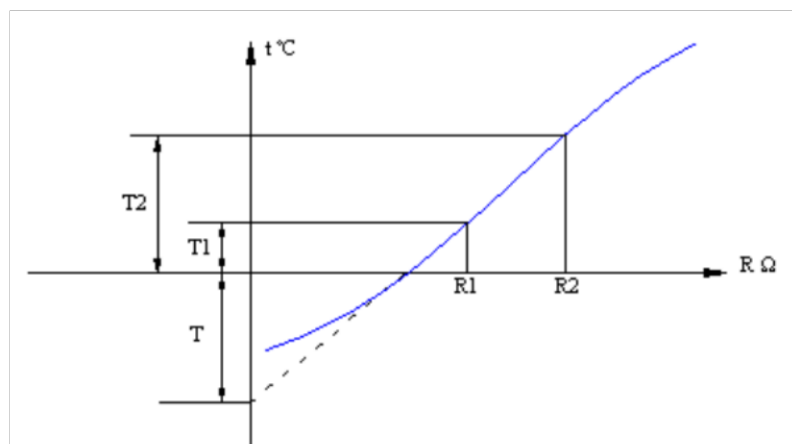
$\rho$  del cobre recocido: 0,01724 [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ] 100% de conductividad a 20 °C

$\rho$  del cobre estirado en frío: 0,01772 [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ] 97,3% de conductividad a 20 °C

$\rho$  del aluminio estirado: 0.0283 [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ] 61% de conductividad a 20 °C

#### 1.4.7.1.1 Cambio de Temperatura

En la Figura 1.7 se observa como la resistencia varia linealmente con la temperatura del conductor. Luego de un periodo la resistencia empieza a curvarse acercándose cada vez al eje t, pero nunca se pega. La variación en la temperatura, afecta de manera negativa, ya que al aumentar la resistencia también aumentarían las pérdidas de potencia por efecto Joule. [8]



**Figura 1.7.** Variación de la resistencia con la temperatura. [7]

La resistencia al cambio de temperatura se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{T+t_1}{T+t_2} \quad (1.3)$$

En donde:

$R_1$  = es la resistencia a la temperatura  $t_1$

$R_2$  = es la resistencia a la temperatura  $t_2$

$T$  =

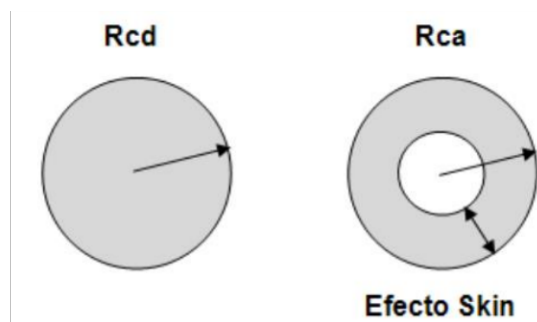
234.5 para cobre recocido de 100% de conductividad

241 para cobre estirado en frío de 97.3% de conductividad

228 para aluminio estirado en frío de 61% de conductividad

#### 1.4.7.1.2 Efecto Piel

Este efecto aparece cuando se transmite corriente alterna sobre el conductor, causando que la sección efectiva para la conducción eléctrica disminuya, debido a que el efecto hace que la densidad de corriente fluya a zonas próximas de la superficie del conductor. En la Figura 1.8, se ilustra la distribución descrita de la corriente eléctrica en DC y en AC. [8]



**Figura 1.8.** Distribución de la corriente eléctrica. [8]

De igual manera este efecto afecta de manera negativa, ya que la disminución de la sección para transmitir la corriente causa un aumento de la resistencia del conductor. La resistencia en corriente alterna para el conductor considerando el efecto se calcula con la siguiente ecuación. [8]

$$R_{ac} = R_{dc} + \Delta R_{dc}(\text{frecuencia}) \quad (1.4)$$

En donde:

$R_{ac}$  = Resistencia eléctrica en corriente alterna [ $\Omega$ ]

Para simplificar el cálculo del efecto piel, se considera que  $R_{ac} = R_{dc} + 0.1\%R_{dc}$

#### 1.4.7.2 Inductancia Serie

Cuando circula corriente por el conductor, cuya magnitud varía en el tiempo, se origina un campo o flujo magnético que se enlaza con los otros conductores del mismo circuito. [7]

La inductancia permite relacionar la fem inducida por la velocidad de variación de flujo con la velocidad de variación de la corriente, es decir la inductancia queda definida con la siguiente ecuación: [7]

$$L = \frac{d\sigma}{di} [H] \quad (1.5)$$

Donde:

$L$  = Inductancia propia del conductor [H]

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

La inductancia es un parámetro que dependerá del tamaño y disposición geométrica de los conductores. Así de forma general la inductancia total del flujo por fase de una línea de transmisión para un circuito trifásico, se calcula con la siguiente ecuación: [8]

$$L = 2 * 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (1.6)$$

En donde:

$L$  = Inductancia total del flujo [H/m]

DMG = Distancia media geométrica del conductor [cm]

RMG = Radio medio geométrico del conductor [cm]

#### 1.4.7.2.1 Reactancia inductiva

De acuerdo a la frecuencia del sistema eléctrico, y con la inductancia total del flujo de la Ecuación 1.6., se deduce la reactancia inductiva del sistema, que equivale a la suma de la inductancia interna y externa en el conductor, con la siguiente ecuación:

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.7)$$

En donde:

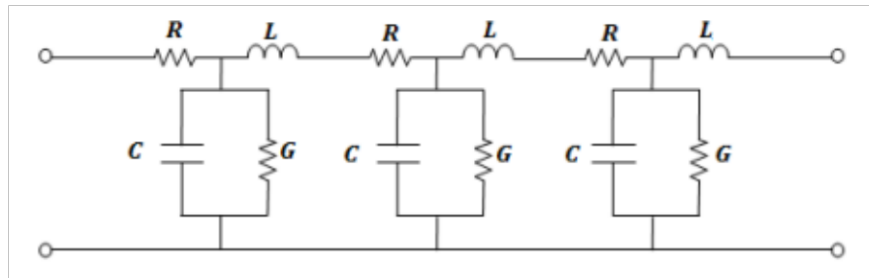
$X_L$  = Reactancia inductiva [ $\Omega$  /m]

Mediante la aplicación de la Ecuación 1.6 y 1.7, la reactancia inductiva en función de la distancia media geométrica y del radio medio geométrico RMG, se define de la siguiente manera:

$$X_L = 0.11736 * \log \frac{DMG}{RMG} \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (1.8)$$

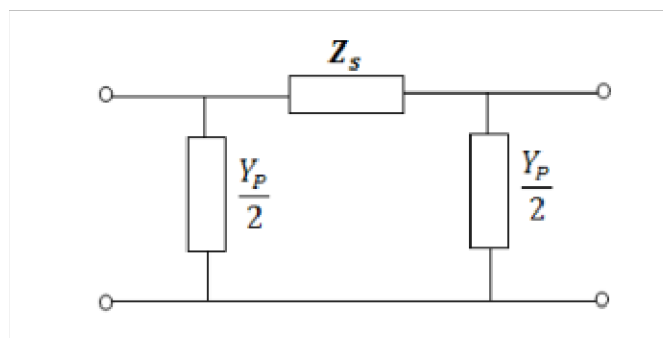
### 1.4.8 MODELO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Una línea transmisión se define como un sistema de conductores que tiene como función transmitir energía eléctrica. Se la puede representar a través de la distribución uniforme de los parámetros a lo largo de la línea (Figura 1.9), es decir, con secciones iguales, que de forma individual representara a una parte de la línea. [8]



**Figura 1.9.** Circuito equivalente de una línea de transmisión. [8]

Para el modelamiento de la línea de transmisión se puede simplificar el modelo anterior de forma más simple, a uno que represente de forma concentrada los parámetros de la línea, impedancia serie y admitancia en paralelo. En la Figura 1.10 se pueda observar el modelo descrito, llamado modelo  $\pi$ . [8]



**Figura 1.10.** Modelo  $\pi$  de una línea de transmisión. [8]

De acuerdo a la longitud de la línea de transmisión, se modela con parámetros concentrados para líneas cortas y medias, con resultados de buena exactitud; y con parámetros distribuidos para líneas de cualquier longitud, que por lo general son de longitud larga, con resultados de gran exactitud. [8]

- Líneas cortas: Son aquellas que su longitud es hasta los 80 km y el nivel de voltaje al cuál transmiten la energía eléctrica es menor a 44 kV. En este tipo de línea para su modelación la capacitancia puede despreciarse, quedando compuesta solo por la impedancia serie en función de los parámetros concentrados. [8]
- Líneas medias: Su longitud es entre los 80 y 240 km; transmite la energía en voltajes de subtransmisión y transmisión. Su modelación no desprecia la capacitancia, pero no es necesario un análisis tan riguroso, sino que se usa el modelo  $\pi$ , donde se incluye la admitancia en derivación (Figura 1.10). [8]
- Líneas largas: Su longitud es superior a los 240 km; transmite la energía en alto voltaje. Su modelación requiere de cálculos rigurosos para determinar el efecto de

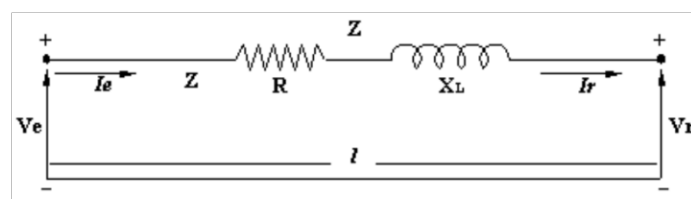


la capacitancia, por lo que se usa el circuito equivalente que tiene distribuido uniformemente los parámetros a lo largo de la línea de transmisión (Figura 1.9). [8]

#### 1.4.8.1 Modelo del alimentador primario como línea corta

La longitud de los A/P no debe pasar los 50 km dependiendo de la carga, en especial 13.2 kV y 13.8 kV. Por tanto, el alimentador primario es catalogado como una línea de transmisión corta. [7]

Su modelo matemático se compone solo con la impedancia serie en función de sus parámetros concentrados. No tiene significado operativo perceptible el hecho de no tomar en cuenta la reactancia capacitiva en la L/T media. [7]



**Figura 1.11.** Circuito equivalente del alimentador primario como línea corta. [7]

El circuito equivalente del alimentador primario se muestra en la Figura 1.11; se resuelve aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff y la ley de corriente de Kirchhoff. Las ecuaciones resultantes son: [7]

$$V_e = V_r + Z * I_r$$

$$I_e = I_r$$

$$Z = R + jX_L$$

En donde:

$I_e$  = Corriente del emisor

$I_r$  = Corriente del receptor

$V_e$  = Voltaje en el emisor

$V_r$  = Voltaje en el receptor [7]

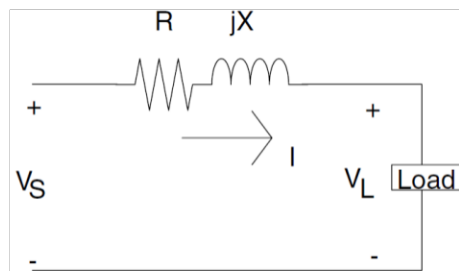
#### 1.4.9 MÉTODO DE ANÁLISIS APROXIMADOS

El alimentador de distribución suministra energía a cargas desbalanceadas trifásicas, bifásicas y monofásicas a través de redes no transpuestas trifásicas, bifásicas y monofásicas, dando como resultado que los voltajes y corrientes de línea sean desbalanceados. Para un análisis exacto se modela las tres fases de alimentador, pero si

no es necesario, se puede tener un análisis aproximado a través de métodos de análisis, que asumen al sistema trifásico perfectamente balanceado, cargas trifásicas perfectamente balanceadas y las redes trifásicas transpuestas. Así con estas consideraciones, para el alimentador se determina un solo circuito equivalente fase-neutro. [9]

#### 1.4.9.1 Caída de voltaje

En la Figura 1.12 se representa el circuito equivalente de un alimentador primario trifásico que suministra energía a una carga trifásica. [9]



**Figura 1.12.** Circuito equivalente fase-neutro. [9]

Aplicando ley de voltaje de Kirchoff obtenemos la siguiente ecuación: [9]

$$V_S = V_L + R * I + jX * I \quad (1.9)$$

En donde:

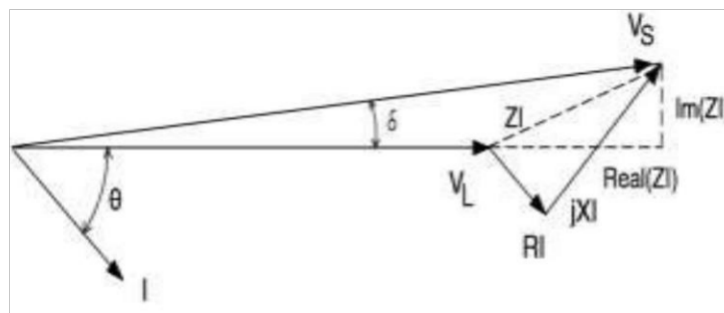
$V_S$  = Voltaje de la fuente

$V_L$  = Caída de tensión en la carga

$R + jX$  = Impedancia equivalente por fase

$I$  = Corriente que circula por la carga

El diagrama de fasores de la ecuación 1.9 se grafica en la Figura 1.13, donde el fasor de la caída de voltaje en la resistencia es representado por  $RI$  y se encuentra en fase con el fasor de corriente; en cambio el fasor de caída de voltaje está adelantado por 90 grados al fasor de corriente. La parte real e imaginaria de la impedancia  $ZI$  es representada por la línea entrecortada. Así de acuerdo a la ecuación 1.10, la diferencia en magnitud del voltaje de la carga y de la fuente determinara la caída de voltaje en toda la línea. [9]



**Figura 1.13.** Diagrama fasorial. [9]

$$V_{drop} = |V_S| - |V_L| \quad (1.10)$$

En donde:

$V_{drop}$  = Caída de voltaje en el alimentador

$V_S$  = Voltaje de la fuente

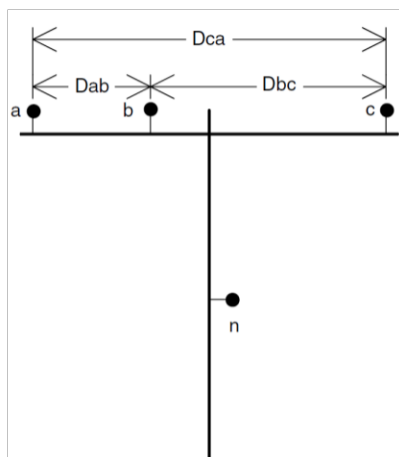
$V_L$  = Voltaje en la carga

El ángulo entre el voltaje de la fuente y el voltaje de la carga ( $\delta$ ) es muy pequeño, por lo que la caída de voltaje entre la fuente y la carga se aproxima con siguiente ecuación: [9]

$$V_{drop} \cong Re(Z * I) \quad (1.11)$$

#### **1.4.9.2 Impedancia de la línea**

Para el modelo aproximado del alimentador, se asume que la línea es transpuesta, necesitando así solo que se determine la impedancia de secuencia positiva de la misma. Esta impedancia puede ser de un circuito trifásico, bifásico o monofásico, y consiste en la resistencia del conductor y la impedancia propia y mutua resultante. El componente resistivo se puede encontrar en los datos de lo conductor para redes aéreas que se presentan en el ANEXO I. En la Figura 1.14 se muestra una configuración típica de un alimentador trifásico. [9]



**Figura 1.14.** Configuración típica de un alimentador primario trifásico. [9]

La ecuación para determinar la impedancia de secuencia positiva de la configuración de la Figura 1.14, es la siguiente: [9]

$$Z_{(+)} = r + j0.12134 * \ln \left( \frac{Deq}{RMG} \right) \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right] \quad (1.12)$$

En donde:

r = Resistencia del conductor

RMG = Radio medio geométrico del conductor

$$Deq = \sqrt[3]{Dab * Dbc * Dca} \quad (1.13)$$

#### **1.4.9.3 Primera aproximación por factor caída de voltaje**

Otra aproximación que se usa para calcular la caída de voltaje en el alimentador, además de la ecuación 1.11, es con el FCV (Factor caída de voltaje), que se define como: [9]

$$FCV = \frac{\Delta V}{kVA * Longitud} \quad (1.14)$$

Y que se determina con la ecuación:

$$FCV = \frac{R * \cos\phi + X * \sin\phi}{30 * Vfn^2} \quad (1.15)$$

En donde:

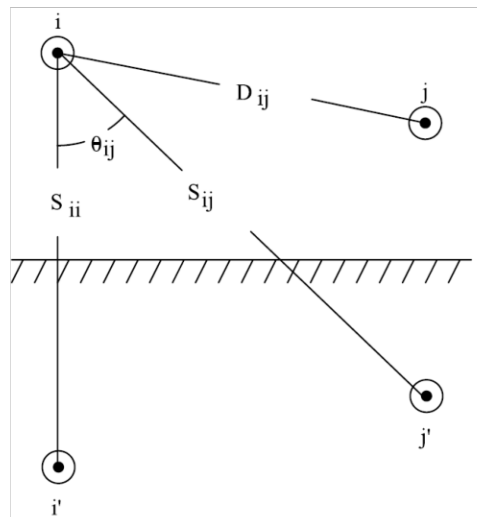
$Vfn^2$  = Voltaje fase neutro [kV]

kVA = Potencia [kVA]

Longitud = longitud [milla]

### 1.4.10 ECUACIONES DE CARSON

Para un análisis preciso, no se tiene que suponer ninguna separación entre conductores, tamaño del conductor o transposición de los mismos; esto debido a que un alimentador se encuentra intrínsecamente desequilibrado. De acuerdo al artículo de Carson que publicó en 1926, se desarrolla una técnica para determinar las impedancias propias y mutuas de un número de conductores. Para esto Carson asume que la tierra es un sólido uniforme e infinito, de superficie plana con resistencia constante; así cualquier efecto que se produzca por frecuencias en alta potencia se eliminara. Carson uso una imagen para cada conductor, es decir, el conductor tiene una determinada distancia sobre el suelo, y su imagen mantendrá la misma distancia bajo el suelo, como se observa en la Figura 1.15. [9]



**Figura 1.15.** Conductores e imágenes. [9]

De acuerdo a la Figura 1.15, y mediante cálculos matemáticos, se desarrollaron las siguientes ecuaciones de Carson modificadas:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{RMG_i} + 7,93402 \right) \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.16)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.17)$$

En donde:

$\hat{z}_{ii}$  = Impedancia propia del conductor  $i$  [ $\Omega/milla$ ]

$\hat{z}_{ij}$  = Impedancia mutua entre el conductor  $i$  y  $j$  [ $\Omega/milla$ ]

$r_i$  = Resistencia del conductor  $i$  [ $\Omega/milla$ ]

$D_{ij}$  = Distancia entre los conductores  $i$  y  $j$  [']

### 1.4.11 MATRIZ DE IMPEDANCIA PRIMITIVA EN LÍNEAS AÉREAS

Con las ecuaciones 1.16 y 1.17, se calculan los elementos de una matriz de impedancia primitiva de dimensión  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de conductores. En un sistema de distribución con redes aéreas en estrella con conexión a tierra, con 4 hilos da como resultado una matriz  $4 \times 4$ . En cambio, para una red subterránea, al tener tres conductores neutros concéntricos, el resultado será una matriz  $6 \times 6$ . En general para una red trifásica con  $m$  neutros, tendrá como resultado la siguiente matriz primitiva: [9]

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \vdots & \hat{Z}_{an1} & \hat{Z}_{an2} & \hat{Z}_{anm} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \vdots & \hat{Z}_{bn1} & \hat{Z}_{bn2} & \hat{Z}_{bnm} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \vdots & \hat{Z}_{cn1} & \hat{Z}_{cn2} & \hat{Z}_{cnm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{Z}_{n1a} & \hat{Z}_{n1b} & \hat{Z}_{n1c} & \vdots & \hat{Z}_{n1n1} & \hat{Z}_{n1n2} & \hat{Z}_{n1nm} \\ \hat{Z}_{n2a} & \hat{Z}_{n2b} & \hat{Z}_{n2c} & \vdots & \hat{Z}_{n2n1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2nm} \\ \hat{Z}_{nma} & \hat{Z}_{nmb} & \hat{Z}_{nmc} & \vdots & \hat{Z}_{nmn1} & \hat{Z}_{nmn2} & \hat{Z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Se puede abreviar la ecuación 1.18 de la siguiente forma:

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

### 1.4.12 MATRIZ DE IMPEDANCIA PARA LÍNEAS AÉREAS Y REDUCCIÓN DE KRON

La matriz de impedancias primitivas, en gran parte de sus aplicaciones, se reduce a una de dimensión  $3 \times 3$ , donde solo se toma en cuenta un equivalente con las impedancias propias y mutuas de las tres fases. La Figura 1.16 tiene una red trifásica con neutro a tierra. La reducción de Kron se aplica para la reducción de la matriz, asumiendo que las líneas tienen el mismo neutro en común. [9]

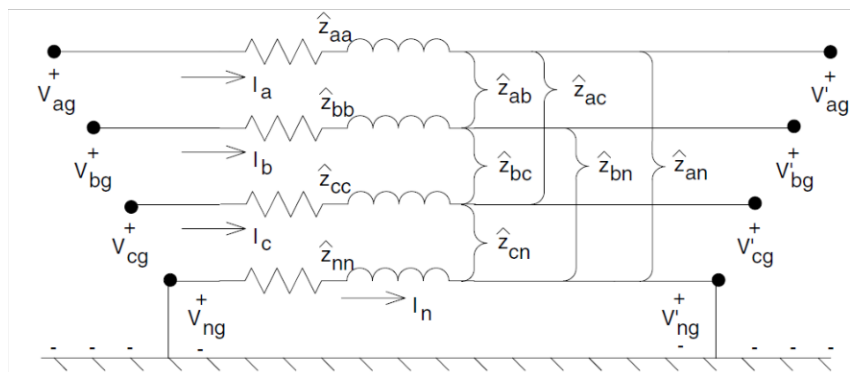


Figura 1.16. Red aérea trifásica en estrella con neutro a tierra. [9]

De acuerdo a la reducción de Kron, se aplica la ley de voltaje de Kirchoff's al circuito de la Figura 1.16, teniendo la siguiente ecuación: [9]

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{an} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bn} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cn} \\ \hat{Z}_{na} & \hat{Z}_{nb} & \hat{Z}_{nc} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Al abreviar la ecuación 1.20 se obtiene: [9]

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Resolviendo la ecuación 1.21 se tiene que:

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V'_{abc}] + ([\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}]) \cdot [I_{abc}] \\ [V_{abc}] &= [V'_{abc}] + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \end{aligned} \quad (1.22)$$

En donde:

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \quad (1.23)$$

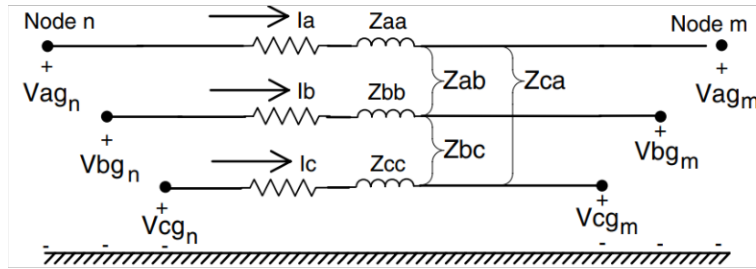
De la ecuación 1.23, se llega a matriz de impedancia por fase del método de reducción de Kron: [9]

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.24)$$

Para un circuito monofásico, la matriz de impedancia para la fase b es la siguiente: [9]

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.25)$$

Para determinar las caídas de voltaje en el alimentador, se usa la matriz de impedancia propia por fase, al ya haber determinado las corrientes. La aplicación de ecuaciones modificadas de Carson y la matriz de impedancia por fase nos permite tener un modelo más exacto del alimentador, considerando que, para circuitos bifásicos y monofásicos algunos valores de la matriz de impedancia serán cero. En la Figura 1.17 se presenta el modelo trifásico de un alimentador. [9]



**Figura 1.17.** Modelo de un alimentador trifásico. [9]

Para determinar los voltajes en el alimentador, en base a la matriz de impedancia se realiza con la siguiente ecuación: [9]

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Al abreviar la ecuación 1.26, tenemos la ecuación reducida de Kron: [9]

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \quad (1.27)$$

La ecuación 1.27 permitirá determinar la caída de voltaje del alimentador que se emulará.

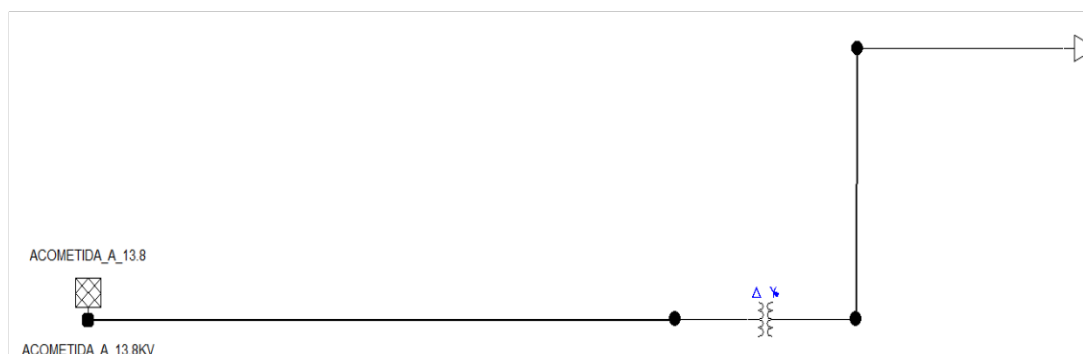


## 2 METODOLOGÍA

Para la modelación del alimentador primario se elabora la matriz de impedancia, que se calcula a partir de las ecuaciones reducidas de Kron, además de ser verificadas por la modelación de estos mismos alimentadores en el software CYMDIST de CYME, a través del ingreso de las características del conductor, como son: calibre de fases y neutro, configuración geométrica, longitud y temperatura.

### 2.1 SISTEMA A ESCALA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV

El esquema del sistema de distribución de 13.8 kV que se encuentra modelado en el laboratorio de distribución de energía de la Escuela Politécnica Nacional, se muestra en la figura 1.15. La subestación de distribución se representa a través de una fuente AC de 120 V tomada de un tomacorriente. De esta sale el alimentador primario implementado de calibre #2 y cuyas distancias varían entre 10, 15, 20 y 25 km, luego el voltaje baja a 60 V con un transformador que representa a uno de distribución. Del transformador sale el emulador del circuito secundario el cual tiene diferentes calibres de conductor a elegir, entre #2, 1/0, 2/0, 3/0 y 4/0 con distancias desde los 150 hasta los 300 m, para finalmente llegar a un foco de 2 kW que representa a la carga eléctrica de una residencia.



**Figura 2.1.** Sistema a escala de un sistema de distribución de 13.8 kV.

### 2.2 ESCALAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REAL AL VOLTAJE DE LA RED CON EL SISTEMA DE TRANSFORMACIÓN POR UNIDAD

Como el módulo a construir es de ampliación al sistema de distribución a escala del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica, se tomará en cuenta las mismas bases del prototipo que se detallan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Valores nominales del Sistema de Distribución a Escala.

<b>SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA</b>	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal MV	120 V
Voltaje nominal BV	60 V
Potencia nominal	50 VA

EL módulo del sistema de distribución escalado es alimentado de la red del laboratorio, que tiene un voltaje de 127 V, al tener alimentación de un transformador trifásico, sin embargo, como suelen presentarse fluctuaciones de voltaje en la red, se ha colocado un estabilizado de voltaje, que mantendrá el voltaje a 120 V AC. Este voltaje fijo nos servirá para poder determinar de forma más precisa las caídas de voltaje en los circuitos de medio y bajo voltaje. Es así que la potencia nominal de los 50 VA, se basa en capacidad de la fuente reguladora de voltaje.



**Figura 2.2.** Estabilizado de voltaje a 120 V, AC.

En la Tabla 2.2 se presenta los valores nominales del sistema de distribución real.

**Tabla 2.2.** Valores nominales del Sistema de Distribución Real.

<b>SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA</b>	
2 AWG ACSR 7AL1ST SPARATE AL	
Voltaje nominal MV	13.8 kV
Voltaje nominal BV	220 V
Potencia nominal	50 kVA

Para obtener los parámetros de la impedancia del alimentador primario a escala, se hace uso del sistema por unidad. Los parámetros eléctricos reales del sistema serán diferentes a la resistencia e inductancia que se construirá el módulo del alimentador primario, sin

embargo, al transformar estas impedancias a por unidad, serán iguales, como se indica en la ecuación 2.1.

$$Z_{\text{sistema real MV}} [p.u.] = Z_{\text{modelo MV}} [p.u.]$$

$$\frac{Z_{\text{real MV}}}{Z_{\text{base real MV}}} = \frac{Z_{\text{modulo MV}}}{Z_{\text{base modulo MV}}} \quad (2.1)$$

Ahora con el uso del sistema por unidad calcularemos la impedancia base en el alimentador primario, tanto para el sistema real como para el módulo a escala, tomando en cuenta los valores nominales de cada sistema presentados en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2.

$$Z_{\text{base real MV}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(13.8 \text{ kV})^2}{50 \text{ kVA}} = 3808.8 [\Omega] \quad (2.2)$$

$$Z_{\text{base modulo MV}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(120 \text{ V})^2}{50 \text{ VA}} = 288 [\Omega] \quad (2.3)$$

Ya teniendo los valores de las impedancias base, reemplazamos sus valores numéricos en la ecuación 2.1, para obtener la ecuación 2.4 que nos permitirá calcular la impedancia del módulo a escala.

$$Z_{\text{modulo MV}} = \frac{288}{3808.8} \cdot Z_{\text{real MV}}$$

$$Z_{\text{modulo MV}} = 0.075614 \cdot Z_{\text{real MV}} \quad (2.4)$$

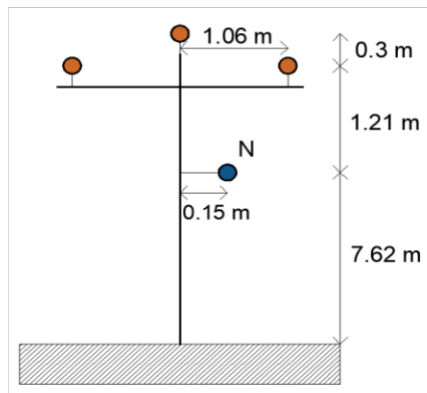
## 2.3 DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR.

La estructura que se usa para redes aéreas de distribución a 13.8 kV, es la EST-3CP (Trifásico Centrado Pasante), el conductor de las fases del alimentador es de tipo ACSR y de calibre 2/0. El calibre de la fase será el mismo para el neutro. En la Tabla 2.3, se muestra el conductor que se usara para el desarrollo del presente trabajo.

**Tabla 2.3.** Conductor para módulo de ampliación en el sistema de distribución

Calibre	Clase	Material	Diámetro [“]	RMG [“]	Resistencia $\frac{\Omega}{\text{milla}}$	Capacidad [A]
2/0	6/1	ACSR	0.447	0.0051	0.895	270

La estructura 3CP está montada sobre postes de hormigón, compuesta por herrajes y aisladores que deben ser distribuidos de acuerdo a las normas de la Empresa Eléctrica Quito.



**Figura 2.3.** Estructura 3CP para una red aérea de 13.8 kV.

Las características del conductor que se usara para la implementación del alimentador primario en el módulo de ampliación del sistema de distribución, se detallan en la Tabla 2.4 para el conductor de fase y en la Tabla 2.5 para el conductor del neutro.

**Tabla 2.4.** Características de conductor para fase en voltaje primario.

<b>CONDUCTOR DE FASE</b>	
2/0 AWG ACSR 6AL1ST QUAIL AL	
Corriente nominal	270 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	133.100 kcmil
Diámetro interno	0.14902 pulgada
Diámetro externo	0.447 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.00510 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.706 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla

**Tabla 2.5.** Características de conductor para neutro en voltaje primario.

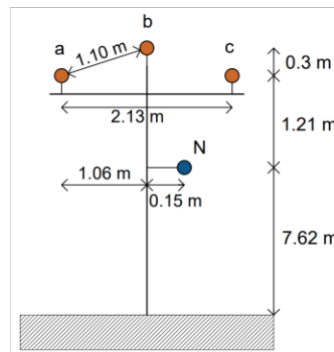
<b>CONDUCTOR DE NEUTRO</b>	
2/0 AWG ACSR 6AL1ST QUAIL AL	
Corriente nominal	270 A
Material de construcción	Aluminio reforzado con acero
Tamaño	133.100 kcmil
Diámetro interno	0.14902 pulgada
Diámetro externo	0.447 pulgada
Radio Medio Geométrico RMG	0.00510 pulgada
Resistencia a 25°C en corriente alterna	0.706 ohm/milla
Resistencia a 50°C en corriente alterna	0.895 ohm/milla

## 2.4 DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE IMPEDANCIA SERIE PARA EL MODULO DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, PARA SU POSTERIOR IMPLEMENTACIÓN EN EL MODULO

### 2.4.1 MEDIANTE EL CÁLCULO MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE Y ESCALAMIENTO A LAS BASES DEL PROTOTIPO

#### 2.4.1.1 Cálculo de impedancias propias y mutuas para formar la matriz de impedancia primitiva

Empezamos determinando las distancias entre las fases y entre cada fase con el neutro, considerando que para medio voltaje se utiliza la configuración de la estructura EST-3CP, en la cual se utilizan las distancias mostradas en la Figura 2.3.



**Figura 2.4.** Distancias reguladas para estructura 3CP.

$$D_{ab} = D_{ba} = \sqrt{1.0668^2 + 0.3048^2} = 1.1094891 \text{ m} = 3.64'$$

$$D_{bc} = D_{cb} = \sqrt{1.0668^2 + 0.3048^2} = 1.1094891 \text{ m} = 3.64'$$

$$D_{ca} = D_{ac} = 2.13364 \text{ m} = 7'$$

$$D_{an} = D_{na} = \sqrt{1.2192^2 + 1.2192^2} = 1.724209 \text{ m} = 5.6568'$$

$$D_{bn} = D_{nb} = \sqrt{0.1524^2 + (1.2192 + 0.3048)^2} = 1.5316 \text{ m} = 5.0249'$$

$$D_{cn} = D_{nc} = \sqrt{1.2192^2 + (1.0668 - 0.1524)^2} = 1.524 \text{ m} = 5'$$

Con las ecuaciones de Carson modificadas, ecuaciones 2.5 y 2.6, procedemos a calcular las impedancias propias de cada fase, cuyos datos y características se tomarán de la tabla 2.4 para el conductor 2/0 AWG ACSR.

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{RMG_i} + 7,93402 \right) \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.5)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.6)$$

Con el cálculo de las impedancias propias obtendremos todos los elementos diagonales de la matriz de impedancia primitiva, que en este caso serán del mismo valor tanto para todas las fases como para el neutro al usar el mismo tipo de conductor.

$$\hat{z}_{aa} = 0.895 + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{0.0051} + 7,93402 \right) \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{aa} = \hat{z}_{bb} = \hat{z}_{cc} = \hat{z}_{nn} = 0.9903 + j1.603209 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

Con el cálculo de las impedancias mutuas aplicando la ecuación obtenemos todos los valores fuera de la diagonal de la matriz de impedancia primitiva.

*Impedancias de la Fase A con respecto a las otras fases y el neutro.*

$$\hat{z}_{ab} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{3.64} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.8059 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{ac} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{7} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.7266 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{an} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5.6568} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.7524 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

*Impedancias de la Fase B con respecto a las otras fases y el neutro.*

$$\hat{z}_{ba} = \hat{z}_{ab} = 0.0953 + j0.8059 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{bc} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{3.64} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.8059 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{bn} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5.0249} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.7668 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

*Impedancias de la Fase C con respecto a las otras fases y el neutro.*

$$\hat{z}_{ca} = \hat{z}_{ac} = 0.0953 + j0.7266 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{cb} = \hat{z}_{bc} = 0.0953 + j0.8059 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{cn} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5} + 7,93402 \right) = 0.0953 + j0.7674 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

*Impedancias del Neutro con respecto a las fases.*

$$\hat{z}_{na} = \hat{z}_{an} = 0.0953 + j0.7524 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{nb} = \hat{z}_{bn} = 0.0953 + j0.7668 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$\hat{z}_{nc} = \hat{z}_{cn} = 0.0953 + j0.7674 \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

Una vez calculados todas las impedancias propias y mutuas, se presenta la matriz de impedancia primitiva.

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 0.9903 + j1.6032 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.7524 \\ 0.0953 + j0.8059 & 0.9903 + j1.6032 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7668 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 0.9903 + j1.6032 & 0.0953 + j0.7674 \\ 0.0953 + j0.7524 & 0.0953 + j0.7668 & 0.0953 + j0.7674 & 0.9903 + j1.6032 \end{bmatrix} \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

#### **2.4.1.2 Determinación matriz de impedancia por fase mediante la ecuación reducida de Kron**

Con la matriz primitiva ya calculada, procedemos a identificar las matrices necesarias para formar la ecuación reducida de Kron (ecuación 2.7)

$$[\hat{Z}_{ij}] = \begin{bmatrix} 0.9903 + j1.6032 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 \\ 0.0953 + j0.8059 & 0.9903 + j1.6032 & 0.0953 + j0.8059 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 0.9903 + j1.6032 \end{bmatrix} \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

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

$$[\hat{Z}_{nn}] = [0.9903 + j1.6032] \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$[\hat{Z}_{nj}] = [0.0953 + j0.7524 \quad 0.0953 + j0.7668 \quad 0.0953 + j0.7674] \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] \cdot [\hat{Z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{Z}_{nj}] \quad (2.7)$$

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.0809 + j1.3117 & 0.1883 + j0.5091 & 0.1884 + j0.4296 \\ 0.1883 + j0.5091 & 1.0858 + j1.3011 & 0.1909 + j0.5035 \\ 0.1884 + j0.4296 & 0.1909 + j0.5035 & 1.0860 + j1.3006 \end{bmatrix} \left[ \frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

#### **2.4.1.3 Calculo de la resistencia e inductancia para el alimentador primario del sistema real**

Para determinar los parámetros de la impedancia serie del alimentador, al ser el sistema un equivalente monofásico, se toma la impedancia de la primera fila y columna de la matriz,

$$Z_{real\ MV} = [1.080897 + j1.311728] \left[ \frac{\Omega}{milla} \right]$$

Al tener esta impedancia en ohmios/milla, se obtiene el equivalente a ohmios haciendo uso de la longitud del alimentador que se construirá.

$$Z_{real\ MV} = [1.080897 + j1.311728] \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \cdot \frac{1[milla]}{1609.34[m]} * 15000 [m] \quad (2.8)$$

$$Z_{real\ MV} = [10.074599 + j12.2260803] [\Omega]$$

De esta forma tenemos el valor de la resistencia para un alimentador primario de longitud de 15 km, con un valor de:

$$R_{real} = 10.074599[\Omega]$$

El valor de la inductancia lo obtendremos de la reactancia inductiva de la ecuación 3.5.

$$XL = 12.2260803[\Omega]$$

$$j12.22608 = j2\pi fL$$

$$L_{real} = 32.52279mH]$$

Así se logra determinar el valor de resistencia de 10.0746  $[\Omega]$  y el valor de la inductancia de 32.4307 [mH], parámetros del conductor del calibre 2/0 AWG ASCR que es objeto de este trabajo.

#### **2.4.1.4 Escalamiento de resistencia e inductancia a las bases del modulo**

Finalmente, a través de la ecuación 2.4 que determinamos para el escalamiento de la impedancia del alimentador primario a las bases del módulo, obtenemos los valores de resistencia e inductancia a implementar en el prototipo.

$$Z_{modulo\ MV} = 0.075614 * [10.074599 + j12.2260803] [\Omega] \quad (2.9)$$

$$Z_{modulo\ MV} = [0.761780 + j0.924463] [\Omega]$$

La resistencia se la obtiene directamente de la impedancia. Y al despejar la inductancia de la reactancia se tiene los siguientes valores:

$$R_{modulo} = 0.76178 [\Omega] \text{ y } L_{modulo} = 2.452214 [mH]$$



## 2.4.2 MEDIANTE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV

Una forma determinar los parámetros del alimentador primario es mediante el uso del software CYMDIST de CYME, en donde se realizará la simulación del sistema de acuerdo al modelo presentado en la Figura 2.1.

### 2.4.2.1 Obtención de la matriz de impedancia por fase mediante la simulación del sistema real en CYMDIST

En el Anexo II se presenta el procedimiento a detalle para la simulación del sistema de distribución, además de cómo obtener la matriz de impedancia por fase del alimentador primario que se muestra en la figura 2.5. Finalmente se tomará los resultados de las corrientes, caídas de voltaje y la matriz de impedancia por fase.

	A	B	C	
Z [ABC] =	1,081 + j1,312	0,1892 + j0,4808	0,1892 + j0,4808	Ohmios/mi
	0,1892 + j0,4808	1,086 + j1,301	0,1892 + j0,4808	
	0,1892 + j0,4808	0,1892 + j0,4808	1,086 + j1,301	

**Figura 2.5.** Matriz de impedancia por fase del alimentador primario obtenida en CYME.

### 2.4.2.2 Calculo de la resistencia e inductancia para el alimentador primario del sistema real, a partir de la matriz de impedancia por fase obtenida en CYME

Para determinar los parámetros de la impedancia serie del alimentador, al ser el sistema un equivalente monofásico, se toma la impedancia de la primera fila y columna de la matriz,

Al tener esta impedancia en ohmnios/milla, se obtiene el equivalente a ohmnios haciendo uso de la longitud del alimentador que se construirá.

$$Z_{real\ MV\ CYME} = [1.080897 + j1.311728] \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \cdot \frac{1 [milla]}{1609.34[m]} * 15000 [m] \quad (2.10)$$

$$Z_{real\ MV\ CYME} = [10.0746 + j12.22608] [\Omega]$$

De esta forma tenemos el valor de la resistencia y la inductancia para un alimentador primario de longitud de 15 km, obtenidos mediante la simulación en CYME.

$$R_{real\ CYME} = 10.0746[\Omega] \text{ y } L_{real\ CYME} = 32.4374[mH]$$

### 2.4.2.3 Escalamiento de resistencia e inductancia a las bases del módulo, a partir de la matriz de impedancia por fase obtenida en CYME

Finalmente, a través de la ecuación 2.4 que determinamos para el escalamiento de la impedancia del alimentador primario a las bases del módulo, obtenemos los valores de resistencia e inductancia a implementar en el prototipo.

$$Z_{modulo MV CYME} = 0.075614 * [10.0746 + j12.22608] [\Omega] \quad (2.11)$$

$$Z_{modulo MV CYME} = [0.76178 + j0.9244677] [\Omega]$$

La resistencia se la obtiene directamente de la impedancia. Y al despejar la inductancia de la reactancia se tiene los siguientes valores:

$$R_{modulo} = 0.76178 [\Omega] \text{ y } L_{modulo} = 2.4522[mH]$$

### 2.4.2.4 Verificación de los parámetros determinados para el alimentador primario del sistema de distribución, en las bases reales y en las bases del modulo

Con los valores obtenidos de resistencia e inductancia, en la Tabla 2.8 se verifica los datos calculados de forma teórica con los obtenidos mediante la simulación del sistema en CYME.

**Tabla 2.6.** Verificación de los diferentes métodos para la determinación de resistencia e inductancia como parámetros del alimentador primario.

Impedancia serie Alimentador primario				
Conductor 2/0 AWG ACSR, Longitud 15 km				
Método	Valor real		Valor modulo a escala	
	Resistencia [ $\Omega$ ]	Inductancia [mH]	Resistencia [ $\Omega$ ]	Inductancia [mH]
Mediante la simulación en CYME	10.0746	32.4374	0.76178	2.4522
Mediante el cálculo de la matriz de impedancia por fase	10.074599	32.52279	0.761780	2.452214
<b>Error</b>	<b>0.000009 %</b>	<b>0.2632 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0.000579 %</b>

En la Tabla 2.6, al ser todos los errores menores al 1 %, se pudo verificar los métodos para determinar los valores resistencia e inductancia del alimentador primario. Por lo que para el desarrollo del presente trabajo se usara el método de determinación de los parámetros a través de la simulación obtenida en CYMDIST, ya que éste toma en cuenta otros parámetros como la conexión del transformador, distancia entre fases, naturaleza del conductor, tipo de estructura, entre otras configuraciones que acercan más al cálculo real en el sistema de distribución.

#### 2.4.2.5 Escalamiento de la potencia implementada en el prototipo del sistema de distribución

El valor de la potencia del prototipo fue calculada al igualar las potencias del sistema con I Para determinar el valor de potencia que debe tener la carga del prototipo, se hace uso del sistema por unidad. La potencia del sistema real será diferente a la potencia del prototipo, sin embargo, al transformar estas impedancias a por unidad, serán iguales, como se indica en la ecuación 2.1.

$$S_{\text{sistema real [p.u]}} = S_{\text{prototipo [p.u]}}$$

$$\frac{S_{\text{real}}}{S_{\text{base real}}} = \frac{S_{\text{prototipo}}}{S_{\text{base prototipo}}} \quad (2.12)$$

Tomando en cuenta los valores nominales de cada sistema presentados en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2, que son la potencia del sistema real 50 KVA y la potencia del prototipo 50 VA, además de hacer considerando para todos los escenarios 0.95 de factor de potencia, tenemos la ecuación 2.13.

$$P_{\text{prototipo}} = \frac{S_{\text{Base prototipo}} \cdot \cos \Phi}{S_{\text{Base real}} \cdot \cos \Phi} \cdot P_{\text{real}}$$

$$P_{\text{prototipo}} = \frac{50}{50000} \cdot P_{\text{real}} \quad (2.13)$$

El valor de potencia asignada a la carga en la simulación es de 2 kW, teniendo que la potencia de la carga del prototipo es:

$$P_{\text{prototipo}} = \frac{50}{50000} \cdot 2000 = 2 \text{ W} \quad (2.14)$$

## 2.5 DETERMINACIÓN DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN POR UNIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV, CON EL ALIMENTADOR PRIMARIO DE CALIBRE 2/0 AWG ASCR

Para determinar la caída de voltaje se realizará a través de dos métodos, por primera aproximación del factor de caída de voltaje y mediante la simulación del sistema en CYMDIST. Sin embargo, para el presente trabajo se realizará estudios en cuenta los con las caídas determinadas mediante simulación, ya que como se ha mencionado, es el más completo a cuanto al comportamiento real del sistema. En cambio, con el FCV no se considera el escenario del circuito secundario para determinar la caída en el alimentador primario, al ser un método de aproximación que se usa solo para diseño.

### 2.5.1 OBTENCIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE MEDIANTE EL FCV

Se determinará la caída de voltaje con el factor caída de voltaje, a través de las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$FCV = \frac{R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi}{30 \cdot V \cdot f \cdot n^2} \quad (2.15)$$

$$\Delta V = FCV \cdot kVA \cdot Longitud \quad (2.16)$$

Para obtener la caída de voltaje en el alimentado primario partiremos de la impedancia  $Z_{aa}$  de la matriz de impedancia por fase en  $\frac{\Omega}{milla}$  para el alimentador primario del sistema.

$$Z_{real\ CYME} = [1.080897 + j1.311728] \left[ \frac{\Omega}{milla} \right]$$

El factor de potencia considerado en la simulación es de 0.95, la longitud del tramo es de 15 km, que se transformara a millas, y la potencia es de 2 kW. Con estos datos se procede a determinar el FCV.

$$FCV = \frac{1.080897 \cdot 0.95 + 1.311728 \cdot \sin(\cos^{-1}(0.95))}{30 \cdot (13.8/\sqrt{3})^2} = 0.0007543$$

Con el FCV determinamos en cambio, la caída de voltaje en el alimentador.

$$KVA = 0.0007543$$

$$\Delta V \% = 0.0007543 \cdot \left(\frac{2}{0.95}\right) \cdot (15 \cdot 0.0621371) = 0.0148 \%$$

Y el valor en por unidad es:

$$\Delta V [p.u.] = \frac{0.0147636}{100} = 0.000148 [p.u.]$$

## 2.5.2 OBTENCIÓN DE CAÍDAS DE VOLTAJE MEDIANTE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV EN CYMDIST

A partir del cuadro de resultados obtenidos en la simulación del sistema, cuya subrutina esta detallada en el ANEXO II, se procede a tomar las medidas de voltaje en diferentes puntos del sistema. Los datos de este cuadro el programa, los obtiene mediante la aplicación de la ecuación reducida de Kron, que se indica en la ecuación 2.17.

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \quad (2.17)$$

Para detallar el proceso se tomará un escenario del sistema de distribución, con el alimentador primario con conductor de calibre 2/0 AWG ASCR y de longitud 15 km; para el circuito secundario se tiene un conductor de calibre 3/0 AWG ASCR y de longitud de 250 m.

### 2.5.2.1 Caída de voltaje en el alimentador primario

Se toma el voltaje en la fuente de alimentación y al extremo derecho del alimentador primario, como se muestra en la Figura 2.6 y Figura 2.7.

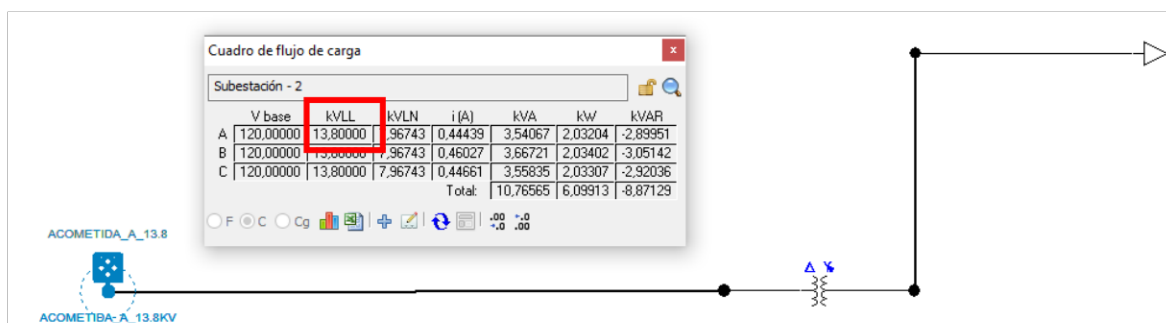


Figura 2.6. Voltaje en la fuente de alimentación.

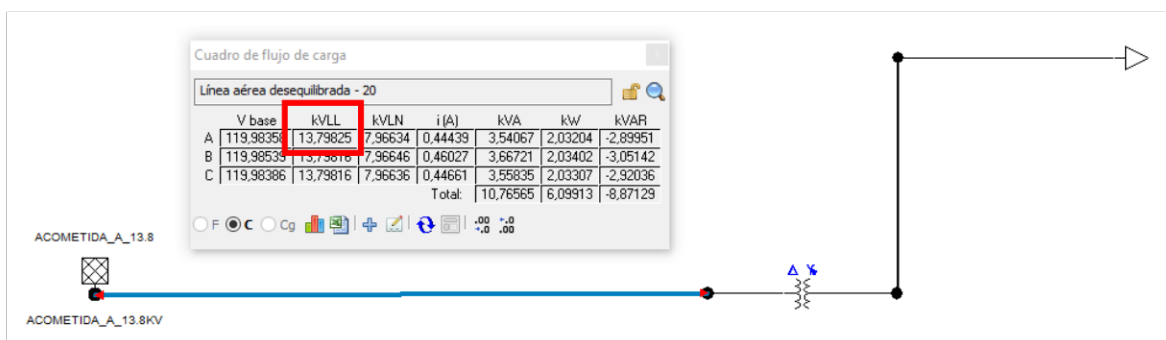


Figura 2.7. Voltaje en el extremo final del alimentador primario 2/0 AWG ASCR, L=15 km.

De los cuadros de resultados el voltaje en la fuente de alimentación es  $V_s = 13\,800 [V]$ , y el voltaje al extremo final del alimentador primario es  $V_{AP} = 13\,798.25 [V]$ . Con estos valores procedemos a calcular la caída de voltaje en el alimentador primario con la ecuación 2.18.

$$\Delta V_{real\ MV} = |V_s| - |V_{AP}| \quad (2.18)$$

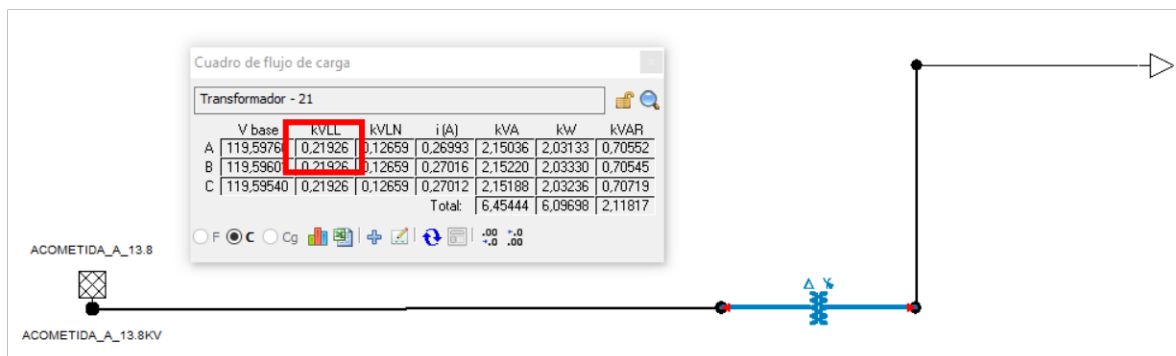
$$\Delta V_{real\ MV} = 13800 - 13798.25 = 1.75 [V]$$

Y para obtener el valor en por unidad lo dividimos para el voltaje base del circuito primario.

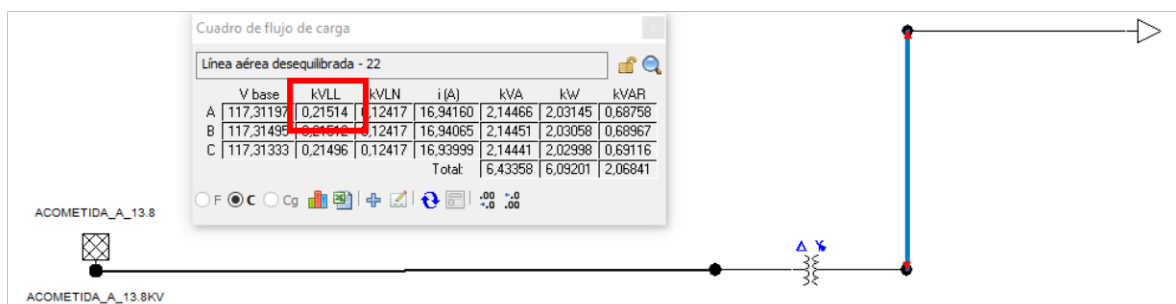
$$\Delta V_{MV} = \frac{1.75}{13800} = 0.0001268 [p.u]$$

### 2.5.2.2 Caída de voltaje en el circuito secundario

Se toma el voltaje en la fuente de alimentación y al extremo derecho del alimentador primario, como se muestra en la Figura 2.8 y Figura 2.9.



**Figura 2.8** Voltaje en el extremo derecho del transformador.



**Figura 2.9.** Voltaje en el extremo final del circuito secundario 3/0 AWG ASCR, L=250 m.

De los cuadros de resultados en el extremo derecho del transformador es  $V_T = 219.26 [V]$ , y el voltaje al extremo final del alimentador primario es  $V_{CS} = 215.14 [V]$ . Con estos valores procedemos a calcular la caída de voltaje en el circuito secundario con la ecuación 2.18.

$$\Delta V_{real\ BV} = |V_T| - |V_{CS}| \quad (2.18)$$

$$\Delta V_{real\ BV} = 219.26 - 215.14 = 4.12 [V]$$

Y para obtener el valor en por unidad lo dividimos para el voltaje base del circuito secundario.

$$\Delta V_{BV} = \frac{4.12}{220} = 0.0187272 [p.u]$$

En el ANEXO III se presentan todas las caídas de voltaje en por unidad en el alimentador primario y el circuito secundario, para todos los escenarios en el sistema de distribución de 13.8 kV.

## 2.6 OBTENCIÓN DE CORRIENTES EN POR UNIDAD, MEDIANTE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 KV EN CYMDIST

A partir del cuadro de resultados obtenidos en la simulación del sistema, cuya subrutina esta detallada en el ANEXO II, se procede a tomar las medidas de corriente en diferentes puntos del sistema.

Para detallar el proceso se tomará un escenario del sistema de distribución, con el alimentador primario con conductor de calibre 2/0 AWG ASCR y de longitud 15 km; para el circuito secundario se tiene un conductor de calibre 3/0 AWG ASCR y de longitud de 250 m.

Se toma el valor de la corriente en el lado de medio voltaje en lado de bajo voltaje, como se muestra en la Figura 2.10 y Figura 2.11.

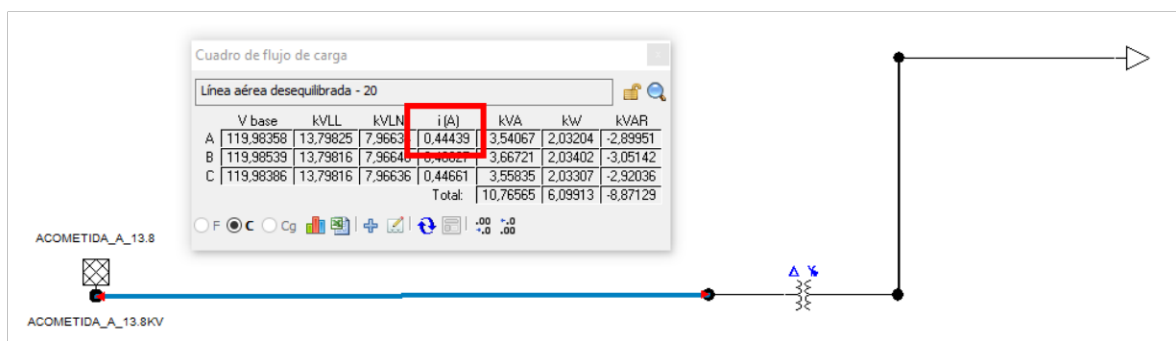
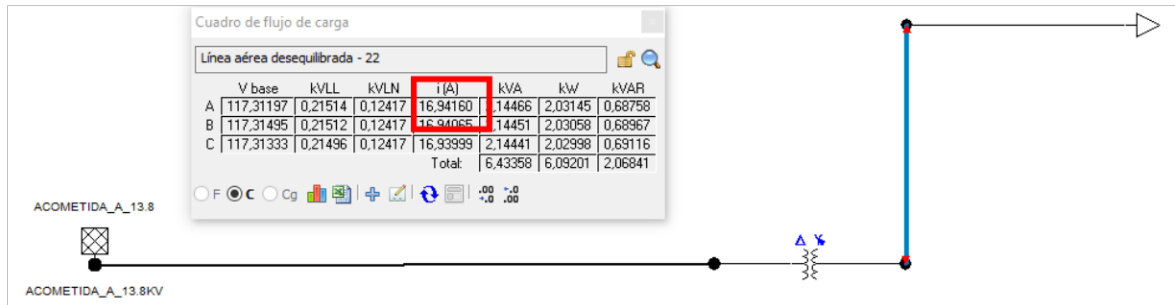


Figura 2.10. Corriente el lado de medio voltaje.



**Figura 2.11.** Corriente en el lado de bajo voltaje.

De los cuadros de resultados tenemos los siguientes valores:

$$I_{real\ MV} = 0.4439 [A]$$

$$I_{real\ BV} = 16.9416 [A]$$

Calculamos las corrientes base para el circuito de medio voltaje y para el de bajo voltaje.

$$I_{Base\ MV} = \frac{S_{Base}}{\sqrt{3}V_{Base\ MV}} = \frac{50\ kVA}{\sqrt{3} * 13.8\ kV} = 2.0918 [A]$$

$$I_{Base\ BV} = \frac{S_{Base}}{\sqrt{3}V_{Base\ BV}} = \frac{50\ kVA}{\sqrt{3} * 220V} = 131.216 [A]$$

Y para obtener el valor en por unidad lo dividimos para la corriente base de cada uno de los circuitos, obteniendo los siguientes valores:

$$I_{pu\ MV} = 0.2124 [A]$$

$$I_{pu\ BV} = 0.1291123 [A]$$

En el ANEXO IV se presentan todas las corrientes en por unidad en circuito de medio voltaje y en el de bajo voltaje, para todos los escenarios en el sistema de distribución de 13.8 kV.

## 2.7 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE IMPEDANCIA

### 2.7.1 RESISTENCIA A USAR EN EL MÓDULO DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

Como en el sistema la fuente de alimentación es el estabilizador de voltaje con 120 V AC, la resistencia deberá soportar una gran cantidad de potencia, y acorde a una corriente en el rango de 1 A o de un valor menor, que dependerá del valor de carga del sistema a escala. Es por esto que la resistencia tendrá que ser de alta potencia, cerca de los 100 W para el alimentador primario. En la Figura 2.12 se indica la resistencia que se implementó para el módulo de impedancia, la cual fue debidamente escalada al sistema de 13.8 kV a escala.





**Figura 12.** Resistencia implementada en el módulo del alimentador primario.

### **2.7.2 ELABORACION DE LA INDUCTANCIA A PARTIR DE UN TOROIDE**

Para la elaboración de la inductancia para la implementación en el módulo se parte de un núcleo toroidal. al cual se le enrollará alambre de cobre obteniendo un bobinado que nos dará la inductancia en milihenrios requerida para el alimentador primario.

Para determinar si se llegó al valor de la inductancia adecuada se procede a realizar las mediciones a través del inductómetro propio del sistema a escala y con un inductómetro comercial, para verificar sus valores.



**Figura 13.** Inductancia construida en base a un núcleo toroidal.

### **2.7.3 ELABORACIÓN DE LA PLACA DE IMPEDANCIA**

Para la elaboración de la placa primero se diseña el circuito a través del software Proteus. Esta placa se compone de borneras para la implementación de la resistencia e inductancia, así mismo para su extracción en caso de que se requiera remplazar alguno de estos elementos.

En la Figura 2.14 se observa el resultado final de la placa del alimentador primario a implementar.

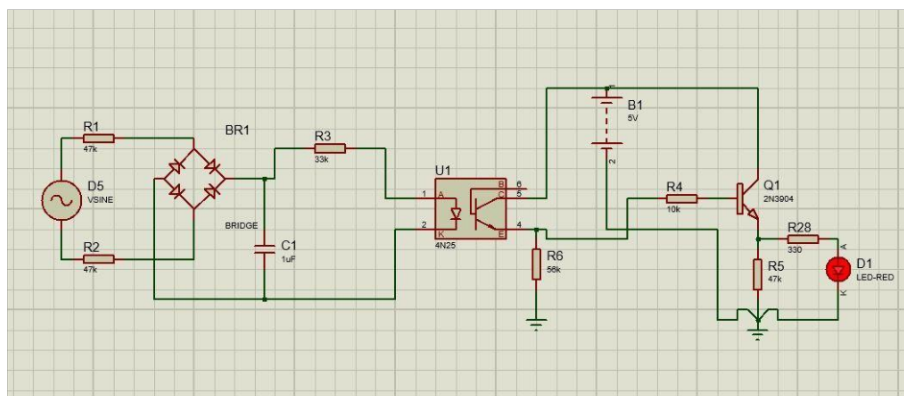


**Figura 2.14.** Impedancia física del alimentador primario.

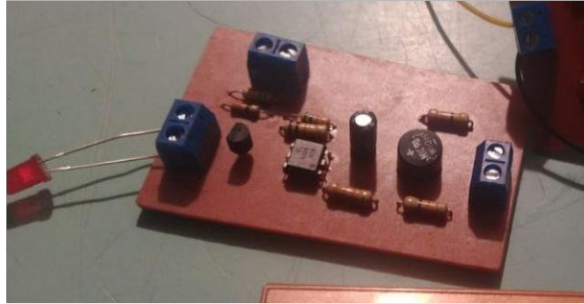
### 2.7.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO IDENTIFICADOR DE CASOS

El objetivo del circuito identificador de casos es detectar que alimentador del prototipo se encuentra conectado. Una vez detectado el caso, manda una señal al microprocesador del sistema, que diferencia el caso y direcciona inalámbricamente el valor de voltaje, corriente y caída de voltaje teórica de CYMDIST, para mostrar los resultados de ese escenario, y además presenta una respuesta visual a través de la energización de un led.

La creación de este circuito es para la detección de estos nuevos escenarios con el alimentador primario implementado, y también es necesario la modificación del programa del microprocesador con el ingreso de los parámetros del nuevo alimentador para los diferentes casos.

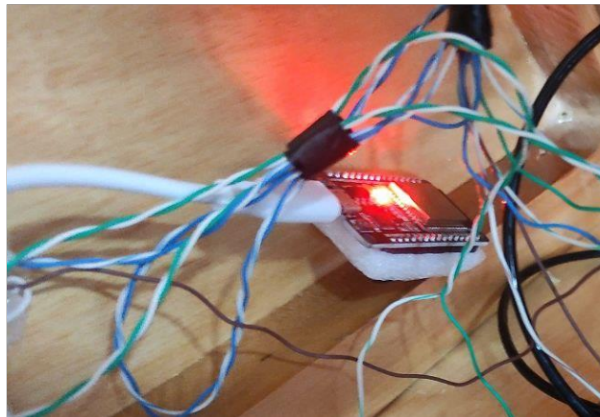


**Figura 2.15.** Nuevo circuito esquemático de detección de casos, en Proteus.



**Figura 2.16.** Placa del circuito detector de casos, para el alimentador primario.

### **2.7.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO ESP32**



**Figura 2.17.** ESP32 implementado en el módulo de impedancia.

Se implementa un nuevo ESP32 que se conecta a la red inalámbrica del prototipo 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 el módulo de impedancia para alimentador primario.

Es necesario la incorporación de este ESP3, ya que en el prototipo el módulo ESP32 tiene todos los bits ocupados para los escenarios de los escenarios del sistema a escala.

### **2.7.6 ESTRUCTURA DEL MÓDULO**

Para el ensamblaje de la impedancia, se ha encargado el trabajo de un tablero con medidas similares al pupitre del sistema a escala, permitiendo así un acople entre los dos módulos. Las características del tablero es que su material es de madera, y se trató de conseguir un color muy similar al del prototipo original. Así mismo, se buscó mantener la conexión de forma simple del alimentador primario, teniendo espacio en la parte trasera para todos los elementos de los conductores de todas las componentes del proyecto.



**Figura 2.18.** Estructura del módulo de impedancia

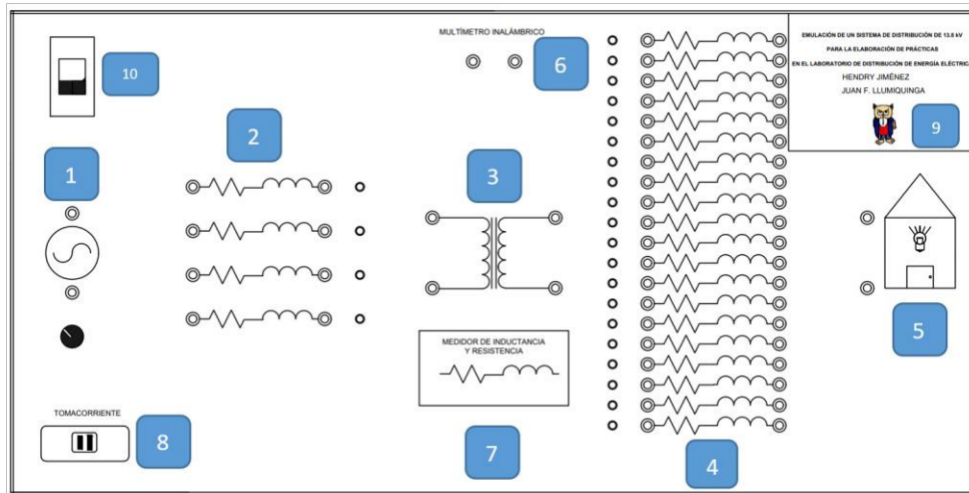
De igual forma en la parte delantera se mantuvo el espacio para la representación de los alimentadores en placas de acrílico, cuyos extremos se implementó borneras para la conexión mediante cables banana al sistema a escala, y se dejó un espacio adicional para implementar un equipo tecnológico en el cual se visualizará la interfaz del web del sistema.

Todo lo descrito acerca del módulo, se puede visualizar en el ANEXO VII a través de fotografías presentadas del presente proyecto.

## **2.8 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA**

Es importante conocer cómo funciona el prototipo del sistema a escala, así como todos los elementos que lo conforman, por lo cual presentamos un esquema con los elementos que lo componen.

## 2.8.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA A ESCALA



**Figura 2.19.** Esquema de conexión del sistema a escala. [6]

Los elementos que lo componen, son:

- 1-Fuente
- 2-Alimentadores primarios
- 3-Transformador
- 4-Circuitos secundarios
- 5- Carga
- 6- Multímetro inalámbrico
- 7- Inductómetro propio del sistema
- 8- Tomacorriente para dispositivo
- 10- Breaker de 6 A y fusible de 0.5 A

## 2.8.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO

Primeramente, debe hacerse la conexión por etapas. Desde la fuente de alimentación se conecta el alimentador hasta un transformador de distribución, a la salida del transformador se conecta al circuito secundario y este a la carga, teniendo su retorno por neutro el alimentador primario, el circuito secundario y el transformador. Para energizar el sistema de distribución a escala, se procede a activar el breakers. Una vez al realizar esta maniobra se enciende automáticamente una luz piloto de color verde que indica una energización correcta. Se conecta el voltímetro inalámbrico en dos puntos del sistema para medir caída de voltaje y se procede a tomar medidas a través de la interfaz web.

### 2.8.2.1 Funcionamiento interfaz WEB

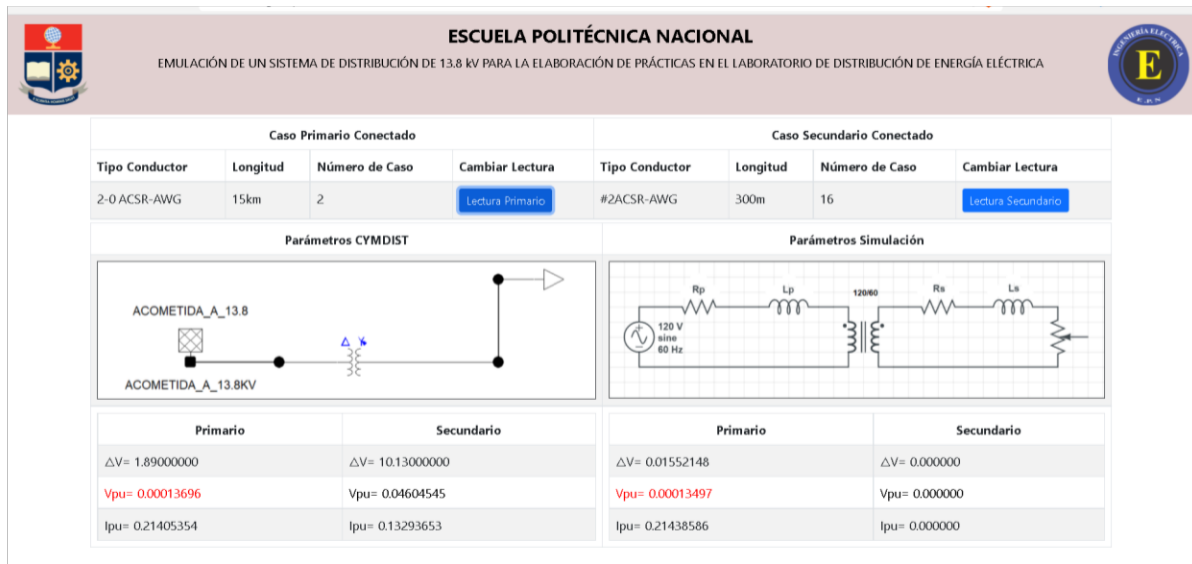
Para la visualización de resultados, primero nos conectamos a la red inalámbrica del sistema.

**Red:** 13.8kV Escala **Contraseña:** Escala13.8

Abrimos una ventana del navegador de la Tablet incorporada en el módulo, o también en un computador, e introducimos la dirección en la que se encuentra trabajando la nueva interfaz web de visualización para el módulo de impedancia implementado, la cual es:

**Dirección IP:** 192.168.1.201

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 2.20



**Figura 2.20.** Interfaz Web para el módulo de impedancia.

Para obtener el valor de caída de voltaje y corriente, nos ubicamos sobre Lectura Primario y al presionar el botón se identificará el caso del alimentador primario, en función del calibre y la distancia, luego repetiremos el proceso para circuito secundario. Además, la interfaz al identificar el caso nos presenta los datos de caída de voltaje y corriente en por unidad, obtenidos mediante CYMDIST.

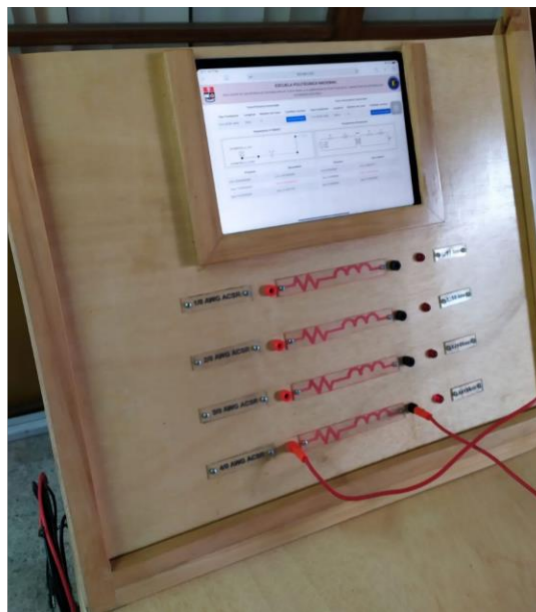
## 2.8 ACOPLAMIENTO DEL MÓDULO DE IMPEDANCIA AL SISTEMA A ESCALA

En la parte de atrás del módulo se implementa la placa de impedancia para cada calibre, los circuitos detectores de casos conectados al microcontrolador y el módulo ESP32



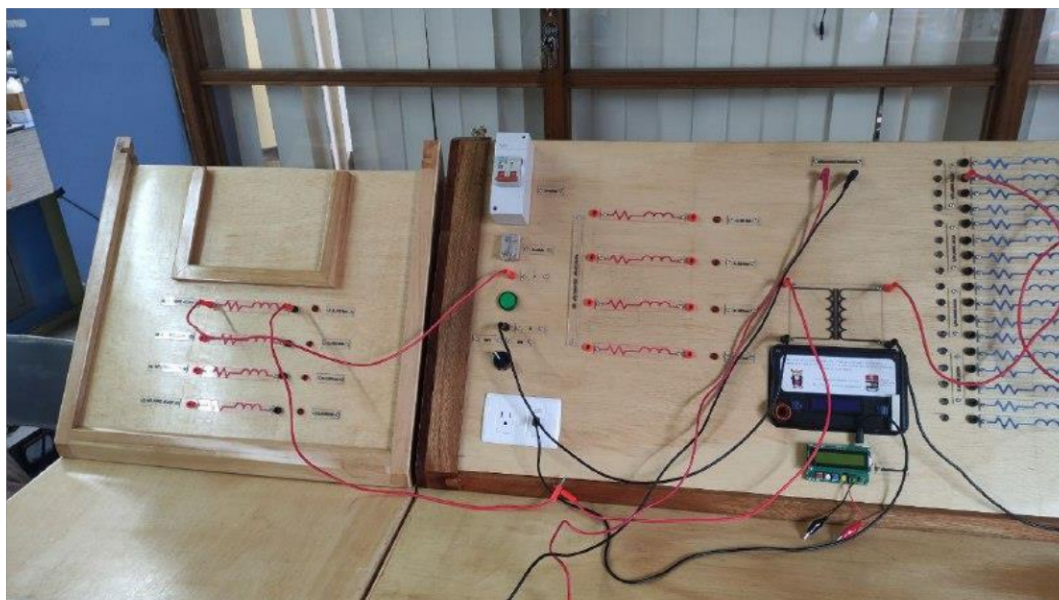
**Figura 2.21.** Implementación de placas y cableado al módulo de impedancia.

Después se agregan las placas de acrílico que representan a las impedancias y longitudes de los diferentes alimentadores, luego se implementan las borneras en los terminales de las impedancias para cada calibre, siendo este trabajo uno de los cuatro componentes del proyecto realizado. Al final se coloca la Tablet donde se visualizará la interfaz web de resultados, teniendo finalmente el módulo de impedancia.



**Figura 2.22.** Módulo de impedancia construido.

Teniendo el módulo ensamblado se procede a acoplar de manera eléctrica los dos prototipos con la fuente de alimentación a uno de los alimentadores del módulo y de este se hace una conexión al transformador de distribución. Y de forma física los dos prototipos están acoplados mediante seguros de tornillo. Los módulos acoplados se observan en la Figura 2.23.



**Figura 2.23.** Sistema de distribución a escala acoplado al módulo de impedancia.

Este módulo es entregado por todos lo que desarrollaron cada una de las componentes, al Laboratorio de Maquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, como evidencia de componente práctica del trabajo de titulación, y para que sea objeto de uso para los estudiantes en prácticas de Distribución de Energía Eléctrica.



### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 3.1 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA SERIE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

Para obtener los resultados de los parámetros a construir del alimentador primario, en este caso resistencia e inductancia, en el capítulo 2 con la aplicación de la ecuación de reducción de Kron se procedió a realizar el cálculo de R y L en base a la matriz de impedancia por fase, que se muestra en la ecuación 3.1.

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

Al remplazar los valores calculados y también verificados mediante la simulación del sistema de distribución en CYMDIST, tenemos el siguiente resultado de la matriz de impedancia por fase:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.0809 + j1.3117 & 0.1883 + j0.5091 & 0.1884 + j0.4296 \\ 0.1883 + j0.5091 & 1.0858 + j1.3011 & 0.1909 + j0.5035 \\ 0.1884 + j0.4296 & 0.1909 + j0.5035 & 1.0860 + j1.3006 \end{bmatrix} \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \quad (3.2)$$

De la matriz, al ser el sistema un equivalente monofásico, solo se considera la impedancia de una fase. En la ecuación 3.3, solo se muestra la impedancia  $Z_{aa}$  de la fase A, debido a que las impedancias de las otras fases en la diagonal son similares. Los demás elementos en la matriz se remplazarán por el número cero.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.0809 + j1.3117 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \quad (3.3)$$

Entonces  $Z_{aa}$  tiene el siguiente valor:

$$Z_{aa} = 1.0809 + j1.3117 \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \quad (3.4)$$

Del valor de esta impedancia se obtiene el valor de R y XL en ohmios, con la siguiente transformación para una longitud del alimentador de 15 km:

$$Z_{real\_MV} = [1.080897 + j1.311728] \left[ \frac{\Omega}{milla} \right] \cdot \frac{1 [milla]}{1609.34[m]} * 15000 [m]$$

$$Z_{real\_MV} = [10.0746 + j12.22608] [\Omega] \quad (3.5)$$

De esta forma tenemos el valor de la resistencia para un alimentador primario de longitud de 15 km, con un valor de:

$$\mathbf{R_{real} = 10.0746[\Omega]} \quad (3.6)$$

El valor de la inductancia lo obtendremos de la reactancia inductiva de la ecuación 3.5.

$$XL = 12.22608[\Omega]$$

$$j12.22608 = j2\pi fL$$

$$\mathbf{L_{real} = 32.4307 [mH]} \quad (3.7)$$

Al tener los parámetros reales del circuito de medio voltaje se procede a transformar estos valores con el sistema por unidad, para tener el valor de la resistencia e inductancia para el módulo a construir. Esta transformación se la hace a través de la ecuación 3.8.

$$Z_{modulo\_MV} = 0.075614 \cdot Z_{real\_MV} [\Omega] \quad (3.8)$$

Entonces la impedancia del módulo es:

$$Z_{modulo\_MV} = 0.075614 * [10.0746 + j12.22608] [\Omega]$$

$$Z_{modulo\_MV} = [0.76178 + j0.9244677] [\Omega] \quad (3.9)$$

La resistencia se la obtiene directamente de la impedancia.

$$\mathbf{R_{modulo} = 0.76178[\Omega]} \quad (3.10)$$

Y al despejar la inductancia de la reactancia se tiene el siguiente valor:

$$j0.9244677 = j2\pi fL$$

$$\mathbf{L_{modulo} = 2.4522 [mH]} \quad (3.11)$$

En la Tabla 3.1 se presenta los resultados tanto de la resistencia como de la inductancia para el sistema real y en valores para el módulo a escala del sistema de distribución.

**Tabla 3.1.** Valores determinados de la impedancia serie del alimentador primario.

Impedancia serie Alimentador primario		
Conductor 2/0 AWG ACSR, Longitud 15 km		
Parámetro	Valor real	Valor modulo a escala
Resistencia [ $\Omega$ ]	10.0746	0.76178
Inductancia [mH]	32.4307	2.4522

### 3.2 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LA IMPEDANCIA SERIE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

La construcción de los elementos de la impedancia serie del circuito de medio voltaje se realiza de acuerdo al procedimiento detallado en el capítulo 2. Una vez construida la inductancia y teniendo el arreglo de la resistencia se procede a realizar mediciones de cada uno de los parámetros hasta llegar de forma lo más aproximada a los valores determinados para el prototipo.

Se presentan los resultados de la medición de los elementos que se usaron para la construcción de la impedancia serie del módulo para ampliación del sistema de distribución. Esta medición permitirá verificar que los elementos están modelados a escala con la impedancia real del sistema.

Para la medición del resistor que se usara en la construcción del alimentador primario, se realizara a través de un multímetro DIGITAL, cuyo modelo es DT 5808 MULTIMETER, y que se evidencia en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Multímetro DIGITAL DT 5808

Para la medición se utiliza el inductómetro construido en el sistema de distribución a escala, que se muestra en la Figura 3.2. Además, se comprobó los resultados con inductómetro comercial que también se encuentra implementado en el módulo del sistema, mostrado en la Figura 3.3.



**Figura 3.2.** Inductómetro propio del sistema de distribución.



**Figura 3.3.** Inductómetro comercial del sistema de distribución.

Los valores medidos de los elementos construidos se muestran en la Tabla 3.2, que al compararlos con el valor de los parámetros obtenidos en CYME se tiene un error muy bajo, al haber sido construidos de manera muy aproximada al valor teórico.

**Tabla 3.2.** Mediciones de los elementos construidos de la impedancia serie

Impedancia serie Alimentador primario			
Conductor 2/0 AWG ACSR, Longitud 15 km			
Parámetro	Valor Teórico	Valor medido	Error
Resistencia [ $\Omega$ ]	0.76178	0.7791	2.27 %
Inductancia [mH]	2.4522	2.4315	0.84 %

Al comparar los valores simulados con los construidos, se tiene errores muy bajos, siendo el más alto el de 2.27 % para la resistencia. El que los errores sean porcentualmente pequeños, significa que la construcción de los elementos de la impedancia serie ha sido realizada de forma correcta.

### 3.3 CONDUCTOR Y CALIBRE MÁS ÓPTIMO PARA UNA MENOR CAÍDA DE VOLTAJE

En el presente trabajo se analizará el comportamiento del sistema de distribución a escala ante el cambio de calibre de #2 a 2/0, en el alimentador primario. Para lo que mediremos la caída de voltaje en diferentes puntos del sistema, para poder determinar cuál es el calibre más óptimo, considerando reducciones en pérdidas de potencia, teniendo así también una reducción de costos que significa un sistema más eficiente.

Para el estudio se tomará medidas de caída de voltaje en tramos del alimentador primario como del circuito secundario, para la distancia de 15 km con los dos calibres a comparar en el alimentador primario (#2 y 2/0), y para todos los casos de los circuitos secundarios con sus diferentes calibres de conductor y distancias del tramo.

Así presentamos la Tabla 3.3 con los resultados de las caídas de voltaje en el circuito de medio voltaje obtenidos en simulación de CYME y en por unidad, para un calibre 2/0 AWG ASCR con una distancia de 15 km, y se presenta también los resultados a la misma longitud del calibre original del sistema 2 AWG ASCR en la Tabla 3.4. Adicionalmente, en el ANEXO V se muestra los resultados de las demás longitudes para el calibre original. En el circuito secundario se tomará en cuenta los calibres 4/0, 3/0, 2/0, 1/0 y #2, y de la misma forma para cada calibre se tomará en cuenta las distancias de 150 m, 200 m, 250 m y 300m.

**Tabla 3.3** Caídas de voltaje para alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>					
1	AP15Km_CS4/0_150m	1.7100	2.074	0.000123913	0.009427273
2	AP15Km_CS4/0_200m	1.7700	2.776	0.000128261	0.012618182
3	AP15Km_CS4/0_250m	1.7400	3.480	0.000126087	0.015818182
4	AP15Km_CS4/0_300m	1.7600	4.196	0.000127536	0.019072727
5	AP15Km_CS3/0_150m	1.7135	2.450	0.000124167	0.011136364
6	AP15Km_CS3/0_200m	1.7000	3.300	0.000123188	0.015000000
7	AP15Km_CS3/0_250m	1.7500	4.120	0.000126812	0.018727273
8	AP15Km_CS3/0_300m	1.7800	4.970	0.000128986	0.022590909
9	AP15Km_CS2/0_150m	1.8000	2.900	0.000130435	0.013181818
10	AP15Km_CS2/0_200m	1.8100	4.370	0.000131159	0.019863636
11	AP15Km_CS2/0_250m	1.8200	4.920	0.000131884	0.022363636
12	AP15Km_CS2/0_300m	1.8300	6.000	0.000132609	0.027272727
13	AP15Km_CS#2_150m	1.7600	4.840	0.000127536	0.022000000
14	AP15Km_CS#2_200m	1.8000	6.640	0.000130435	0.030181818
15	AP15Km_CS#2_250m	1.8400	8.360	0.000133333	0.038000000
16	AP15Km_CS#2_300m	1.8900	10.130	0.000136957	0.046045455

**Tabla 3.4** Caídas de voltaje para alimentador primario de calibre #2 de longitud de 15km.

No	Caso	$\Delta V$	$\Delta V$	Voltaje Primario [p.u]	Voltaje Secundario [p.u]
		AP_CYME	C/S_CYME		
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>					
1	AP15Km_CS4/0_150m	4.9305	2.074	0.000357000	0.009430000
2	AP15Km_CS4/0_200m	4.9571	2.776	0.000359000	0.012169000
3	AP15Km_CS4/0_250m	4.9843	3.484	0.000361000	0.015837000
4	AP15Km_CS4/0_300m	5.0114	4.196	0.000363000	0.019077000
5	AP15Km_CS3/0_150m	4.9384	2.453	0.000358000	0.011150000
6	AP15Km_CS3/0_200m	4.9754	3.285	0.000362000	0.014930000
7	AP15Km_CS3/0_250m	5.0071	4.124	0.000363000	0.018744000
8	AP15Km_CS3/0_300m	5.0472	4.975	0.000366000	0.022612000
9	AP15Km_CS2/0_150m	4.9603	2.926	0.000359000	0.013299000
10	AP15Km_CS2/0_200m	4.9981	3.921	0.000362000	0.017823000
11	AP15Km_CS2/0_250m	5.3424	4.924	0.000365000	0.022382000
12	AP15Km_CS2/0_300m	5.0829	5.945	0.000368000	0.027024000
13	AP15Km_CS#2_150m	5.0291	4.940	0.000364000	0.022455000
14	AP15Km_CS#2_200m	5.1011	6.647	0.000370000	0.030214000
15	AP15Km_CS#2_250m	5.1681	8.377	0.000374000	0.038078000
16	AP15Km_CS#2_300m	5.2379	10.138	0.000380000	0.046084000

Al tener los resultados de todas las combinaciones en los circuitos secundarios con un calibre de 2/0 para el alimentador primario, y de la misma forma para el calibre #2, procederemos a realizar casos específicos de estudio que se pueden presentar en la realidad de un sistema de distribución. Y así con el análisis de todos los escenarios, podremos identificar las diferencias que se presenten en el sistema al cambiar el calibre a uno más grande, y también determinar entre los dos cual es el más óptimo para el sistema.

### **3.3.1 CASO DE ESTUDIO 1: ALIMENTADOR PRIMARIO DE CALIBRE 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD DE 15 KM. Y VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 4/0 AWG ASCR.**

Los resultados presentados en la Tabla 3.5 son escenarios específicos de los resultados anteriores. En el caso del circuito de medio voltaje se presenta las caídas de voltaje para un calibre de 2/0 con longitud del tramo 15 km, realizando combinaciones en el circuito secundario con un calibre al azar que es el 4/0 para distancias de 150 m, 200 m, 250 m y 350 m.

**Tabla 3.5.** Caídas de voltaje para el caso de estudio 1.

Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje Primario [p.u]	Voltaje Secundario [p.u]
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>				
AP15Km_CS4/0_150m	1.7100	2.074	0.000123913	0.009427273
AP15Km_CS4/0_200m	1.7700	2.776	0.000128261	0.012618182
AP15Km_CS4/0_250m	1.7400	3.480	0.000126087	0.015818182
AP15Km_CS4/0_300m	1.7600	4.196	0.000127536	0.019072727

En los resultados de estas configuraciones dentro del sistema de distribución se observa que la menor caída de voltaje en el circuito de bajo voltaje, se da en la distancia más pequeña. Esto es debido a que cuando se aumenta la distancia también aumenta la impedancia del conductor. Entonces se puede determinar que para el calibre 2/0 AWG ASCR en el alimentador primario la menor caída de voltaje en el circuito secundario con calibre 4/0 AWG ACSR se da con la distancia de 150 m, cuyo valor está señalado en color verde dentro del grupo de caídas de voltaje, y se presenta con su valor obtenido en CYME y en por unidad, los cuales son  $\Delta V = 2.074 [V]$  y  $V = 0.09427273 [p.u]$  respectivamente.

### 3.3.2 CASO DE ESTUDIO 2: ALIMENTADOR PRIMARIO CON CALIBRE 2 AWG ASCR Y CAMBIO DE CALIBRE A 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD DE 15 KM. Y VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 1/0 AWG ASCR.

Los resultados presentados en la Tabla 3.6 son escenarios específicos de los resultados anteriores. En el caso del circuito de medio voltaje se presenta las caídas de voltaje para un calibre de 2 AWG ASCR y también las caídas con calibre 2/0 AWG ASCR, con la longitud del tramo de 15 km, realizando combinaciones en el circuito secundario, con un calibre al azar que es el 3/0 AWG ASCR y distancias de 200 m y 300 m.

**Tabla 3.6.** Caídas de voltaje para el caso de estudio 2.

Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje Primario [p.u]	Voltaje Secundario [p.u]
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>				
AP15Km_CS3/0_150m	4.9384	2.453	0.000358000	0.011150000
AP15Km_CS3/0_200m	4.9754	3.285	0.000362000	0.014930000
AP15Km_CS3/0_250m	5.0071	4.124	0.000363000	0.018744000
AP15Km_CS3/0_300m	5.0472	4.975	0.000366000	0.022612000
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>				
AP15Km_CS3/0_150m	1.7135	2.450	0.000124167	0.011136364
AP15Km_CS3/0_200m	1.7000	3.300	0.000123188	0.015000000
AP15Km_CS3/0_250m	1.7500	4.120	0.000126812	0.018727273
AP15Km_CS3/0_300m	1.7800	4.970	0.000128986	0.022590909

En los resultados de estas configuraciones dentro del sistema de distribución se observa que la menor caída de voltaje en el circuito de medio voltaje, se da en el calibre más grande. Esto es porque al aumentar el calibre, la impedancia del conductor disminuye. La caída de voltaje en el circuito secundario con una misma longitud, es muy similar para los dos calibres. Además, que la distancia del tramo secundario no influye de manera notoria en la caída del alimentador primario, ya que, al variar las distancias del circuito de bajo voltaje, para un mismo calibre del circuito de medio voltaje, las caídas de voltaje son aproximadamente las mismas.

Entonces se puede determinar que al cambiar el calibre del alimentador primario del 2 AWG ASCR, al 2/0 AWG ASCR la caída de voltaje disminuye notablemente. El valor de la menor caída de voltaje del lado de medio voltaje, está señalado en color verde dentro del grupo de resultados y se presenta con su valor obtenido en CYME y en por unidad, los cuales son  $\Delta V = 1.70 [V]$  y  $V = 0.000123188 [p.u]$  respectivamente.

### 3.3.3 CASO DE ESTUDIO 3: ALIMENTADOR PRIMARIO CON CALIBRE 2 AWG ASCR CON VARIACIÓN EN SU LONGITUD Y CAMBIO DE CALIBRE A 2/0 AWG ASCR, CON LONGITUD DE 15 KM. Y CIRCUITO SECUNDARIO DE CALIBRE 1/0 AWG ASCR CON UNA SOLA DISTANCIA.

Los resultados presentados en la Tabla 3.7 son escenarios específicos de los resultados anteriores. En el caso del circuito de medio voltaje se presenta las caídas de voltaje para un calibre de 2 AWG ASCR, pero realizando variaciones en su longitud de 10 km, 15 m, 20 km y 25 km. También se presenta la caída de voltaje con calibre 2/0 AWG ASCR, con una longitud del tramo de 15 km; en el circuito secundario, con un calibre al azar que es el 2/0 AWG ASCR y mantendremos la distancia de 200 m para todos los casos.

**Tabla 3.7.** Caídas de voltaje para el caso de estudio 3.

Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje Primario[p.u]	Voltaje Secundario [p.u]
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>				
AP10Km_CS2/0_200m	3.9925	3.9197	0.000289000	0.017817000
AP15Km_CS2/0_200m	4.9981	3.9211	0.000362000	0.017823000
AP20Km_CS2/0_200m	5.3424	3.9201	0.000387000	0.017819000
AP25Km_CS2/0_200m	5.0278	3.9209	0.000364000	0.017822000
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>				
AP15Km_CS2/0_200m	1.8100	4.370	0.000131159	0.019863636

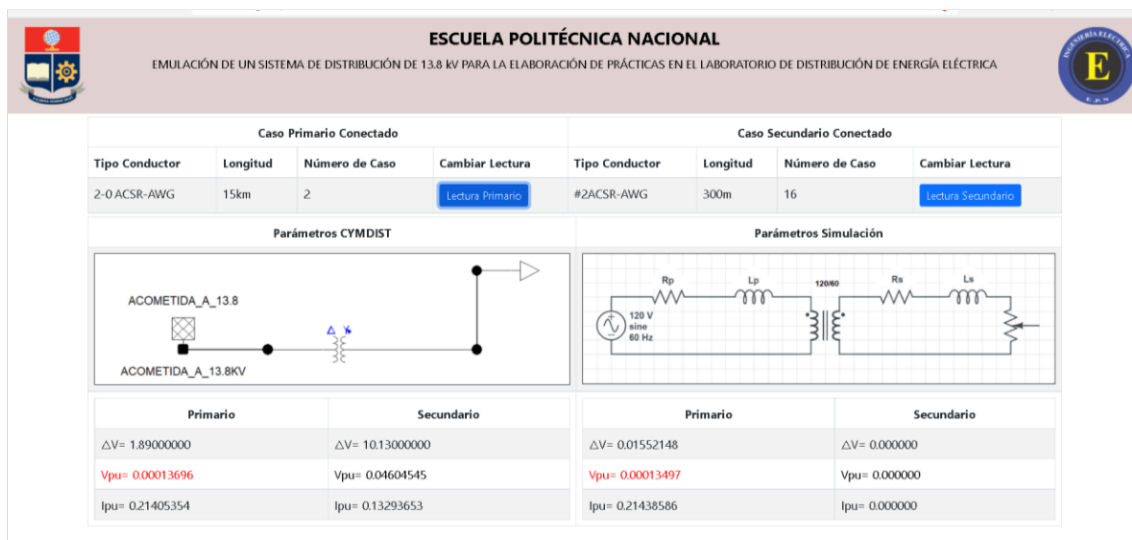
En los resultados de estas configuraciones dentro del sistema de distribución para el alimentador primario de calibre 2 AWG ASCR, la caída de voltaje se da en la distancia más pequeña de 10 km, sin embargo, aún la caída de voltaje en el alimentador primario de 15



km para un calibre 2/0 AWG ASCR es menor. Es por esto que se puede concluir que, para determinar la mínima caída de voltaje, se debe considerar la longitud del tramo y el calibre, ya que de estas dos características depende la impedancia del alimentador primario. Para este estudio la mínima caída de voltaje es con el calibre 2/0 y longitud de 15 km, señalada de color verde. Los valores obtenidos en CYME y en por unidad, son  $\Delta V = 1.81 [V]$  y  $V = 0.000131159 [p.u]$  respectivamente.

### 3.4 RESULTADOS DE CAÍDAS DE VOLTAJE DEL VOLTÍMETRO INALÁMBRICO TOMADAS EN EL MÓDULO EN TIEMPO REAL, Y VERIFICACIÓN DE LAS MISMAS CON LAS OBTENIDAS MEDIANTE SIMULACIÓN EN CYME

Al haber realizado las mediciones de caída de voltaje en el módulo del alimentador primario de calibre 2/0 AWG ASCR, y en los diferentes escenarios del sistema de distribución para circuitos secundarios, se procede a comparar con los resultados obtenidos mediante simulación en CYMDIST que ya se presentaron en el literal anterior. Las mediciones se presentan en la interfaz de manera digital, tanto para las mediciones de las caídas del alimentador primario como para las medidas del circuito secundario. En la figura 3.4 se muestra la nueva interfaz para el módulo de ampliación, que se llevó a cabo de acuerdo al proceso detallado en el capítulo anterior.



**Figura 3.4.** Interfaz para el módulo de ampliación del AP en el sistema de distribución.

Con el uso de esta interfaz se mostrará las medidas de las caídas de voltaje para cada escenario. Para esta componente del proyecto el número de caso para el alimentador primario será el 2, que representa el conductor 2/0 AWG ASCR de longitud de 15 km; en

cambio para los circuitos tomaremos los 16 casos que existen tanto al realizar variaciones en el calibre del conductor y las distancias, que ya se detallaron en resultados previos.

### 3.4.1 RESULTADOS DE LAS CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL CASO 2 DEL ALIMENTADOR PRIMARIO, CALIBRE 2/0 AWG ASCR, CON CASOS AL AZAR DEL CIRCUITO SECUNDARIO

En la Tabla 3.8 se presenta las medidas en tiempo real tomadas del número de caso 2 del módulo, realizando combinaciones con algunos números de caso del circuito secundario; también se muestran las medidas obtenidas mediante la simulación del sistema real, y su valor en por unidad para poder compararla con la caída de voltaje medida en el sistema a escala. Los datos de estas mediciones se evidencian en el ANEXO VI, mediante las capturas de cada resultado en la interfaz del sistema.

**Tabla 3.8.** Caídas de voltaje en el alimentador primario, tomadas del módulo en tiempo real.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	Voltaje Primario [p.u]	Voltaje Primario modulo [p.u]	Error %
<b>Numero de caso 2: Calibre 2/0 AWG ASCR</b>					
2	AP15Km_CS4/0_200m	1.77	0.00012826	0.00012509	2.47
6	AP15Km_CS3/0_200m	1.70	0.00012319	0.00012225	0.76
11	AP15Km_CS2/0_250m	1.82	0.00013188	0.00012905	2.15
16	AP15Km_CS#2_300m	1.89	0.00013696	0.00013497	1.45

Los errores que se presentan en las comparaciones de las medidas de caída de voltaje en el alimentador primario del sistema a escala, son valores bajos que no superan el 3%, Por lo que se puede determinar que el módulo del alimentador está correctamente construido de acuerdo a la escala calculada, además se determinó que los valores de las caídas de voltaje están por debajo del valor máximo que se permite en las normas de las empresas eléctricas del país, siendo así el calibre 2/0 AWG ASCR óptimo para el sistema de distribución de 13.8 kV.

### 3.4.2 RESULTADOS DE LAS CAÍDAS DE VOLTAJE EN TODOS LOS CASOS DEL CIRCUITO SECUNDARIO, CON EL CASO 2 DEL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA UN CALIBRE 2/0 AWG ASCR.

En la Tabla 3.9 se presenta las medidas en tiempo real tomadas de los 16 casos del circuito secundario que se presentan al variar calibre y longitud del circuito de bajo voltaje, teniendo como alimentador primario de calibre 2/0 AWG ASCR. También se muestran las medidas obtenidas mediante la simulación del sistema real, y su valor en por unidad para poder compararla con la caída de voltaje medida en el sistema a escala. Los datos de estas

mediciones se evidencian en el ANEXO VI mediante las capturas de cada resultado en la interfaz del sistema.

**Tabla 3.9.** Caídas de voltaje en el alimentador primario, tomadas del módulo en tiempo real.

No	Caso	$\Delta V$	Voltaje	Voltaje Secundario	Error %
		CS_CYME	Secundario [p.u]	Modulo [p.u]	
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>					
2	AP15Km_CS4/0_200m	2.776	0.012618182	0.012537370	0.64
3	AP15Km_CS4/0_250m	3.480	0.015818182	0.015111290	4.47
4	AP15Km_CS4/0_300m	4.196	0.019072727	0.018235170	4.39
5	AP15Km_CS3/0_150m	2.450	0.011136364	0.010830400	2.75
6	AP15Km_CS3/0_200m	3.300	0.015000000	0.014123380	5.84
7	AP15Km_CS3/0_250m	4.120	0.018727273	0.017475570	6.68
8	AP15Km_CS3/0_300m	4.970	0.022590909	0.022167390	1.87
10	AP15Km_CS2/0_200m	4.370	0.019863636	0.018680110	5.96
11	AP15Km_CS2/0_250m	4.920	0.022363636	0.022143300	0.99
12	AP15Km_CS2/0_300m	6.000	0.027272727	0.027632660	1.32
13	AP15Km_CS#2_150m	4.840	0.022000000	0.022302890	1.38
14	AP15Km_CS#2_200m	6.640	0.030181818	0.030238920	0.19
15	AP15Km_CS#2_250m	8.360	0.038000000	0.038429640	1.13
16	AP15Km_CS#2_300m	10.130	0.046045455	0.046674240	1.37

Los errores que se presentan en las comparaciones de las medidas de caída de voltaje en los circuitos de medio voltaje del sistema a escala, son valores son bajos sin embargo en algunos casos se supera el 3%, que se deben a la parte constructiva y a la escala de los elementos que construyeron para el prototipo de los circuitos secundarios, que se realizó en el proyecto del módulo del sistema de distribución a escala referenciado; aun así, los errores están en el límite permitido. Es importante también mencionar que para el caso 1 no se logró tomar una medida de voltaje, al ser el valor muy pequeño debido a que su configuración es con el calibre más grande y la distancia más pequeña. En el caso 9 se presenta una dificultad en su construcción desde la construcción del módulo del sistema de distribución, por lo que no es posible la alimentación del circuito secundario por lo que no se pudo tomar la caída de este caso.

También existen caídas de voltaje fuera de lo permitido para las empresas eléctricas, las cuales están señaladas en color naranja, que se da específicamente en los calibres más pequeños, por lo que se puede determinar que para cualquiera de las distancias del circuito secundario el calibre más óptimo es el 4/0 al ser de mayor tamaño y menor caída de voltaje en los circuitos de bajo voltaje del sistema a escala.

### 3.5 RESULTADOS DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA

De la misma forma que se obtuvo las mediciones de la caída de voltaje en diferentes puntos del sistema de distribución a escala, se presenta los valores de corriente de fase en el circuito de medio voltaje y en los diferentes casos de la configuración del circuito de bajo voltaje, que se determinan a través de la ecuación 3.12 con el voltaje medido y la impedancia serie de cada circuito, mostrando la corriente resultante en la interfaz del sistema a escala.

$$V_{drop} \cong Re(Z * I) \quad (3.12)$$

En la Tabla 3.10 se presenta los resultados determinados de corriente en por unidad en el circuito de medio voltaje de calibre 2/0 AWG ASCR, del sistema de distribución a escala, con algunos casos del circuito secundario; y en la Tabla 3.11 se presenta las corrientes en por unidad de todos los casos en el circuito de bajo voltaje, que se evidencian en las capturas de la interfaz del anexo 6 y anexo 7 respectivamente. Además, se verifica con los resultados de corriente determinados mediante la simulación en CYMDIST, que nos permitirá evidenciar el error de los valores prácticos con los valores teóricos.

**Tabla 3.10.** Corriente que circula por el circuito de medio voltaje

Configuración circuito secundario	Corriente de fase en el AP del sistema real [p.u]	Corriente de fase del AP del módulo [p.u]	Error %
<b>AP 2/0 AWG ASCR , L= 15 km</b>			
CS 4/0 AWG ASCR L=200m	0.212428298	0.21195757	0.22
CS 3/0 AWG ASCR L=200m	0.212523901	0.21285445	0.16
CS 2/0 AWG ASCR L=250m	0.212619503	0.21224602	0.18
CS #2 AWG ASCR L=300m	0.214053537	0.21438586	0.16

**Tabla 3.11.** Corriente que circula por el circuito de medio voltaje

Configuración circuito secundario	Corriente de fase en el CS del sistema real [p.u]	Corriente de fase del CS del sistema a escala [p.u]	Error [%]
<b>AP 2/0 AWG ASCR , L= 15 km</b>			
CS 4/0 AWG ASCR L=200m	0.128331911	0.12816900	0.22
CS 4/0 AWG ASCR L=250m	0.128741922	0.12856353	0.16
CS 4/0 AWG ASCR L=300m	0.129153457	0.12884813	0.18
CS 3/0 AWG ASCR L=150m	0.128143672	0.12827504	0.16
CS 3/0 AWG ASCR L=200m	0.128626844	0.12879158	0.13
CS 3/0 AWG ASCR L=250m	0.129112303	0.12936988	0.14

CS 3/0 AWG ASCR L=300m	0.129732655	0.12956145	0.24
CS 2/0 AWG ASCR L=200m	0.128995702	0.12919054	0.10
CS 2/0 AWG ASCR L=250m	0.129577186	0.12971927	0.13
CS 2/0 AWG ASCR L=300m	0.13032557	0.13019196	0.20
CS #2 AWG ASCR L=150m	0.129585569	0.12960543	0.13
CS #2 AWG ASCR L=200m	0.130734819	0.13088607	0.15
CS #2 AWG ASCR L=250m	0.131817766	0.13160967	0.11
CS #2 AWG ASCR L=300m	0.132936532	0.13269385	0.10

Los errores calculados en los valores de corriente tanto para el alimentador primario como para el circuito secundario son muy bajos, menor al 1 %, por lo que una vez más se comprueba que el modelo a escala del sistema de distribución se encuentra construido de manera acertada, y escalado los elementos de acuerdo al sistema real. Así el módulo permitirá realizar estudios y análisis al sistema de distribución de 13.8 kV y obtener resultados lo más acercados a la vida real.

### 3.6 CONCLUSIONES

- La ampliación del calibre 2/0 AWG ASCR en el alimentador primario del sistema de distribución a escala de 13.8 kV, permitirá realizar análisis más completos en cuanto al estudio de la distribución de energía eléctrica, con la implementación física realizada de un nuevo conductor, que influirá en el comportamiento del sistema en cuanto a caídas de voltaje y corrientes en los circuitos de medio y bajo voltaje, cuyos resultados se presentaran de manera digital en una interfaz adecuada para el uso de los estudiantes del Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica.
- Se determinó que uno de los factores de los cuales dependen las caídas de voltaje en los circuitos de medio y bajo voltaje, es el calibre del conductor, que se vio evidenciado en los resultados de aumentar el calibre del alimentador primario al 2/0 AWG ASCR, disminuyendo notablemente la caída de voltaje en los diferentes escenarios.
- La longitud del alimentador primario o del circuito secundario, afecta en cuanto a la caída de voltaje del circuito, ya que para un mismo calibre se vio evidenciado que la menor caída de voltaje se da en el tramo de menor longitud, sin embargo, como en el presente trabajo se varia el calibre del conductor del alimentador primario, se determinó que para la caída de voltaje se debe considerar todos los factores influyentes, ya que para el calibre más grande del alimentador aun con una distancia mayor a la del circuito del calibre menor, se sigue teniendo una caída de voltaje más pequeña.
- La matriz de impedancias por fase se determina de acuerdo a la disposición geométrica de los conductores, longitud y temperatura, por lo que si se varia de alguna manera la

estructura geométrica de estos circuitos, se debe calcular una nueva matriz de impedancias por fase, que influirá directamente en las caídas de voltaje de los alimentadores, determinándose la impedancia del conductor como factor que afecta a la caída del voltaje en el sistema de distribución.

- Se determinó que la forma más exacta para obtener los parámetros de la impedancia del alimentador, es mediante la simulación del sistema real en CYMDIST, ya que se considera como datos de ingreso, la conexión del transformador, distancia y configuración geométrica de los conductores, entre otros, acercándose así al comportamiento real del sistema y teniendo resultados más exactos en cuanto a caídas de voltaje y corrientes en los circuitos.
- Los valores de las caídas de voltaje obtenidos mediante el voltímetro inalámbrico del sistema de distribución a escala, y verificados mediante la simulación del sistema en CYMDIST, deben ser menores al 3%, que es lo que se estipula en las normas de regulación de las empresas eléctricas del país, dando un criterio para determinar el calibre óptimo entre los calibres 2/0 AWG ASCR y el 2 AWG ASCR.
- Se determinó que el conductor más óptimo para el sistema de distribución de 13.8 kV a escala es el de mayor calibre, con la longitud más pequeña, que, en este trabajo al incorporarse una sola distancia del conductor con calibre mayor, se concluye que la configuración óptima para el alimentador primario es de calibre 2/0 AWG ASCR con longitud de 15 km. Sin embargo, en el presente estudio no se consideran el estudio de costos de cada calibre, por lo que para un futuro trabajo se puede complementar el análisis con un estudio completo de costos del alimentador, y así determinar un calibre óptimo del conductor, cumpliendo de igual manera las caídas de voltaje de acuerdo a los márgenes estandarizados para las empresas eléctricas del país.
- La incorporación de una Tablet, en el módulo facilitara el acceso a la interfaz web, para los estudiantes en el laboratorio, permitiéndoles así realizar estudios y análisis en las diferentes prácticas con respecto al sistema de distribución a escala, con resultados en tiempo real en cuanto a caídas de voltaje y corrientes para los circuitos primarios y secundarios.
- Se determinó que la corriente mantiene un valor muy similar para todos los escenarios de estudio, es decir se mantiene constante, que se debe a que la carga que se usa para todos los casos es la misma.

- Se verifico los valores de corriente y voltaje medidos a través del voltímetro inalámbrico, con los valores obtenidos en CYMDIST, teniendo errores dentro del límite permisible, por lo que se puede determinar que el comportamiento del módulo de impedancia se compara al del sistema de distribución real.

### **3.7 RECOMENDACIONES**

- Es importante el uso de un sistema de refrigeración para las resistencias construidas para la impedancia del alimentador primario, ya que al circular corriente por las mismas, se genera calor cambiando su temperatura, produciéndose el efecto Joule pueden presentar variaciones en los valores de las impedancias y por tanto en las caídas de voltaje. Además, es importante que las resistencias sean elementos de potencia para evitar daños en las mismas por sobrecalentamiento o por fallas en el sistema que aumentan la cantidad de corriente que circula por el sistema.
- Para el lado de bajo voltaje se recomienda añadir una carga variable que es alimentada por el circuito secundario, ya que un futuro trabajo que pueda complementar este sistema de distribución, es el análisis de como varia la caída de voltaje al variar el valor de la carga a la cual se suministra energía.
- Al ser el alimentador primario considerado como línea corta, se usa los parámetros de la impedancia serie para el estudio de la caída voltaje, sin embargo al considerar la capacitancia se tendría un valor más exacto, por lo que un posible trabajo puede ser complementar un módulo de impedancia donde se analice como afecta la inclusión de la capacitancia en sus parámetros.
- Se recomienda el uso de protecciones en el sistema distribución a escala, tanto para la parte eléctrica y electrónica, para el cuidado y conservación de los elementos construidos, además de los equipos y placas de los circuitos que realizan la transferencia de datos de los parámetros del sistema a la interfaz. Adicional, es importante tener una tierra para los circuitos eléctricos y otra para los circuitos electrónicos, ya que los elementos de electrónica son sensibles a variaciones de corriente y voltaje, pudiendo causar daños en cualquiera de los circuitos electrónicos.
- Se recomienda usar un regulador de voltaje en la fuente de alimentación para un prototipo a escala, ya que la red de nuestro país presenta variaciones de voltaje que pueden influir con errores en la determinación de las caídas de voltaje.

- Se recomienda el uso del voltímetro inalámbrico con transferencia de datos mediante conexión Wifi, ya que para representar al modelo del sistema de distribución de 13.8 kV, el incluir algún equipo de medición tradicional representaría una carga adicional en el sistema que afectara de manera errónea en los resultados de las caídas de voltaje



## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Vergara y M. Poveda, «ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA PRIMARIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA S/E, RÍO COCA DE LA EEQ S.A.» Quito, Escuela Politécnica Nacional, 2010, p. 14.
- [2] D. Darío, «Diseño y análisis técnico económico de la red de distribución eléctrica subterránea de la AV. Manuel Cordóva para la Empresa Eléctrica Quito,» Quito, Escuela Politécnica Nacional, 2015, p. 5.
- [3] F. Itaz y H. Arcos, «DETERMINACIÓN DE RUTA ÓPTIMA DE ALIMENTADORES PRIMARIOS AÉREOS DE MEDIO VOLTAJE UTILIZANDO ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN,» Escuela Politécnica Nacional, 2019. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20397/1/CD%209870.pdf>. [Último acceso: 14 Enero 2022].
- [4] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, «Plan Maestro de Electricidad 2016-2025,» [En línea]. Available: <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>. [Último acceso: 15 Enero 2022].
- [5] J. Grainger y W. Stevenson, «Análisis de sistemas de potencia,» Primera ed., México, McGraw-Hill, 1996, pp. 133-135.
- [6] H. Jiménez y J. Llumiquinga, «EMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 kV PARA LA ELABORACIÓN DE PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» Escuela Politécnica Nacional, 2021. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21740/1/CD%2011229.pdf>. [Último acceso: 13 Enero 2022].
- [7] S. Ramírez, «Redes de Distribución de Energía,» tercera ed., Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2004, pp. 311-316.
- [8] J. Chasipanta y R. Canelos, «ESTUDIO PARA REPOTENCIACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PUCARÁ-MULALO A 138 kV UTILIZANDO EL CONDUCTOS MÁS ECONÓMICO,» Escuela Politécnica Nacional, 2011. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3949/1/CD-3717.pdf>. [Último acceso: 15 Enero 2022].

[9] W. Kersting, Distribution systema modelyng and analysis, Mexico: CRC Press, 2002, pp. 40-43.

## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Datos de los conductores de fase y neutro más usados en redes aéreas de distribución en alimentadores primarios.

ANEXO II. Procedimiento para simulación del sistema de distribución a escala en CYME.

ANEXO III. Caídas de voltaje para alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.

ANEXO IV. Corrientes en circuito de medio voltaje y bajo voltaje, para caso alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.

Anexo V. Caídas de voltaje para el alimentador primario de calibre 2 AWG ASCR para una longitud de 10, 20 y 25 km.

ANEXO VI. Capturas de la interfaz del módulo en el sistema de distribución a escala.

ANEXO VII. Fotos del desarrollo del módulo de impedancia y de su culminación.

ANEXO VIII. Manual de Usuario Módulo de Impedancia

Anexo IX. Casos de Simulación

Anexo X. Video Funcionamiento del módulo en el sistema de distribución a escala

**ANEXO I. Datos de los conductores de fase y neutro más usados en redes aéreas de distribución en alimentadores primarios**

**Tabla 5.1. Datos de conductores**

Calibre			DIÁMETRO	GMR	RES	CAPACIDAD
AWG	Clase	Material	Pulgadas	Pies	$\Omega$ /milla	Amperios
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
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

## ANEXO II. Procedimiento para simulación del sistema de distribución a escala en CYME

1. Se empieza creando un Nuevo Estudio en la pestaña *Archivo*.

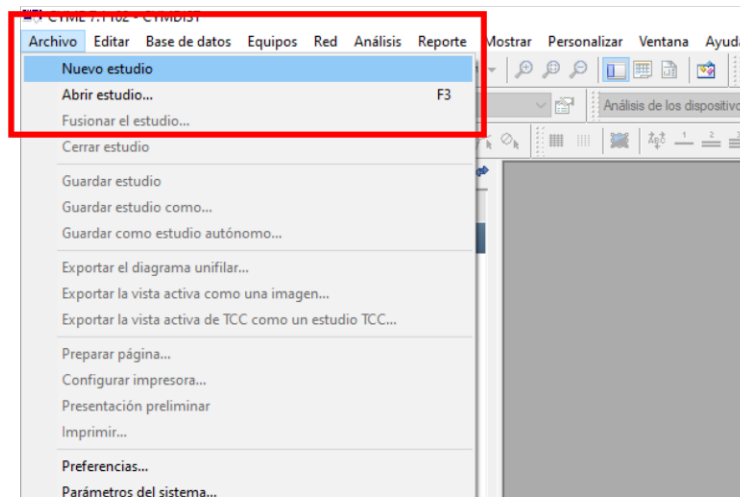


Figura 5.1. Nuevo estudio en CYME.

2. Al crear el estudio se presenta un modelo en blanco, con un bloque de elementos y equipos eléctricos en la parte izquierda de la pantalla para uso del usuario en el modelado de sistemas.

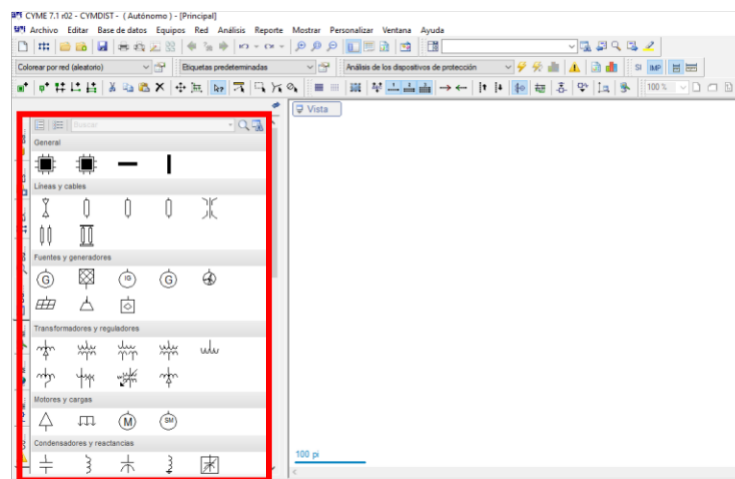
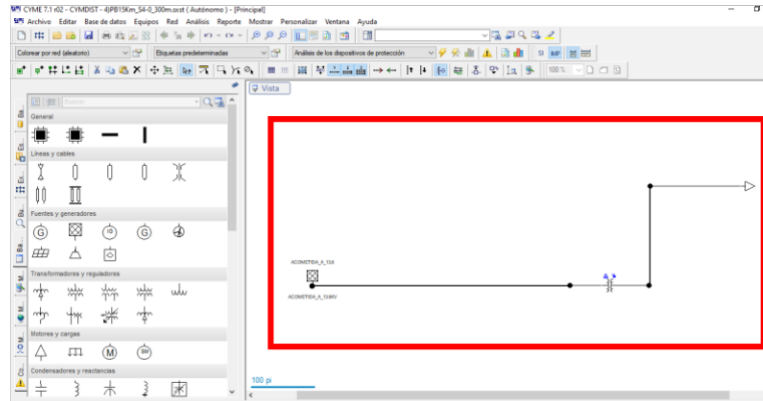


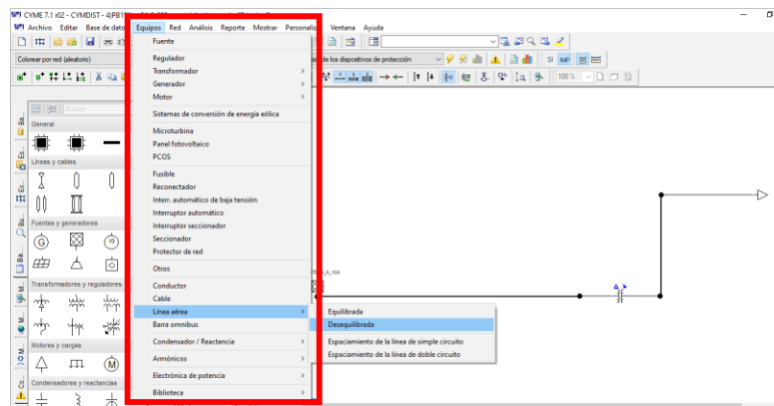
Figura 5.2. Bloque de elementos de un sistema eléctrico.

3. Se procede a armar el sistema de distribución con los elementos de acuerdo al modelo de la Figura 2.1.



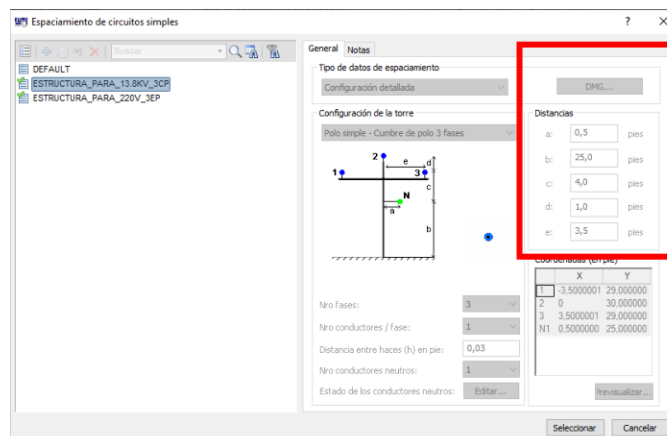
**Figura 5.3.** Armado del sistema de distribución.

- Ya teniendo interconectado el sistema, en la pestaña *Equipos* se despliega una lista de elementos que se usan para el sistema de distribución, que podremos elegir de manera individual e ingresar los parámetros de cada uno de ellos.



**Figura 5.4.** Elementos que constituyen el sistema de distribución.

- Se ingresa los parámetros de cada equipo y elemento dentro del sistema de distribución, como el transformador, alimentador primario, carga, entre otros.



**Figura 5.5.** Parametrización del alimentador primario

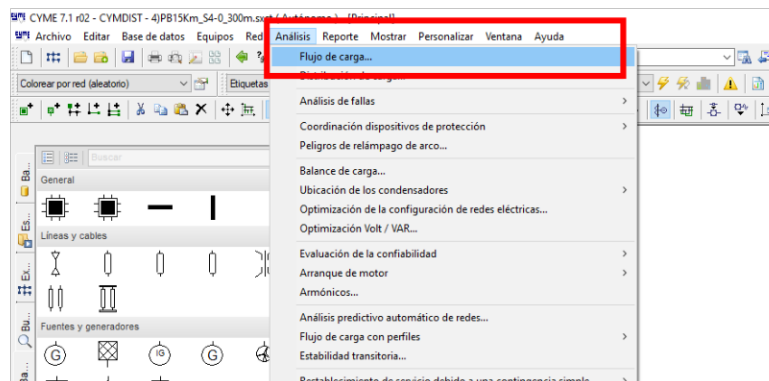
6. Al tener el sistema conectado y parametrizado, podemos obtener la matriz de impedancia por fase del alimentador primario en el lado de medio voltaje, al hacer doble clic sobre el mismo.

Impedancias equivalentes

	A	B	C	
Z [ABC] =	1,081 + j1,312	0,1892 + j0,4808	0,1892 + j0,4808	Ohmios/mi
	0,1892 + j0,4808	1,086 + j1,301	0,1892 + j0,4808	
	0,1892 + j0,4808	0,1892 + j0,4808	1,086 + j1,301	

**Figura 5.6.** Matriz de impedancia por fase en el alimentador primario.

7. Al igual con el sistema armado y parametrizado, se corre un *flujo de carga* para tener los resultados de corrientes y caídas de voltaje en el sistema de distribución tanto en medio voltaje como en bajo voltaje.



**Figura 5.7.** Flujo de carga en el sistema de distribución.

8. Para desplegar los resultados en la pestaña *Mostrar*, luego *Cuadro de Resultados* se encuentra la opción *Cuadro de Flujo de Carga*, que nos presentara un cuadro con las corrientes y caídas de voltaje.

Cuadro de flujo de carga

Línea aérea desequilibrada - 20

	V base	kVLL	kVLN	i (A)	kVA	kW	KVAR
A	119,98353097	13,79824090	7,96634025	0,44386247	3,53644484	2,03101488	-2,89506834
B	119,98533355	13,79815703	7,96645993	0,45979075	3,66335236	2,03350752	-3,04712942
C	119,98379691	13,79815812	7,96635790	0,44607138	3,55404414	2,03243148	-2,91555347
Total:					10,75326012	6,09695387	-8,85775122

**Figura 5.8.** Cuadro de resultados de la simulación del sistema de distribución.

**ANEXO III. Caídas de voltaje para alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.**

**Tabla 5.2.** Caídas de voltaje para alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario
Calibre 2/0 AWG ASCR					
1	AP15Km_CS4/0_150m	1.7100	2.074	0.000123913	0.009427273
2	AP15Km_CS4/0_200m	1.7700	2.776	0.000128261	0.012618182
3	AP15Km_CS4/0_250m	1.7400	3.480	0.000126087	0.015818182
4	AP15Km_CS4/0_300m	1.7600	4.196	0.000127536	0.019072727
5	AP15Km_CS3/0_150m	1.7135	2.450	0.000124167	0.011136364
6	AP15Km_CS3/0_200m	1.7000	3.300	0.000123188	0.015000000
7	AP15Km_CS3/0_250m	1.7500	4.120	0.000126812	0.018727273
8	AP15Km_CS3/0_300m	1.7800	4.970	0.000128986	0.022590909
9	AP15Km_CS2/0_150m	1.8000	2.900	0.000130435	0.013181818
10	AP15Km_CS2/0_200m	1.8100	4.370	0.000131159	0.019863636
11	AP15Km_CS2/0_250m	1.8200	4.920	0.000131884	0.022363636
12	AP15Km_CS2/0_300m	1.8300	6.000	0.000132609	0.027272727
13	AP15Km_CS#2_150m	1.7600	4.840	0.000127536	0.022000000
14	AP15Km_CS#2_200m	1.8000	6.640	0.000130435	0.030181818
15	AP15Km_CS#2_250m	1.8400	8.360	0.000133333	0.038000000
16	AP15Km_CS#2_300m	1.8900	10.130	0.000136957	0.046045455



**ANEXO IV. Corrientes en circuito de medio voltaje y bajo voltaje, para caso alimentador primario de calibre 2/0 de longitud de 15km.**

**Tabla 5.3.** Corrientes en MV y BV caso AP de calibre 2/0 de longitud de 15km.

<b>N o</b>	<b>Caso</b>	<b>I AP [p.u]</b>	<b>I C/S [p.u]</b>	<b>I AP CYME</b>	<b>I C/S CYME</b>
<b>Calibre 2/0 AWG ASCR</b>					
1	AP15Km_CS4/0_150m	0.212571702	0.127924948	0.4447	16.7858
2	AP15Km_CS4/0_200m	0.212428298	0.128331911	0.4444	16.8392
3	AP15Km_CS4/0_250m	0.212715105	0.128741922	0.4450	16.8930
4	AP15Km_CS4/0_300m	0.212141491	0.129153457	0.4438	16.9470
5	AP15Km_CS3/0_150m	0.212619503	0.128143672	0.4448	16.8145
6	AP15Km_CS3/0_200m	0.212523901	0.128626844	0.4446	16.8779
7	AP15Km_CS3/0_250m	0.212428298	0.129112303	0.4444	16.9416
8	AP15Km_CS3/0_300m	0.212332696	0.129732655	0.4442	17.0230
9	AP15Km_CS2/0_150m	0.212762906	0.128414218	0.4451	16.8500
10	AP15Km_CS2/0_200m	0.212667304	0.128995702	0.4449	16.9263
11	AP15Km_CS2/0_250m	0.212619503	0.129577186	0.4448	17.0026
12	AP15Km_CS2/0_300m	0.212667304	0.130325570	0.4449	17.1008
13	AP15Km_CS#2_150m	0.213432122	0.129585569	0.4465	17.0037
14	AP15Km_CS#2_200m	0.213671128	0.130734819	0.4470	17.1545
15	AP15Km_CS#2_250m	0.213862333	0.131817766	0.4474	17.2966
16	AP15Km_CS#2_300m	0.214053537	0.132936532	0.4478	17.4434

**Anexo V. Caídas de voltaje para el alimentador primario de calibre 2 AWG  
ASCR para una longitud de 10, 20 y 25 km.**

**Tabla 5.4.** Caídas de voltaje en alimentador primario de calibre #2 de longitud de 10km.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>					
1	AP10Km_CS4/0_150m	3.9478	2.0744	0.000286	0.009429
2	AP10Km_CS4/0_200m	3.9701	2.7701	0.000288	0.012591
3	AP10Km_CS4/0_250m	3.9837	3.4838	0.000289	0.015835
4	AP10Km_CS4/0_300m	4.0017	4.1966	0.000290	0.019075
5	AP10Km_CS3/0_150m	3.9567	2.4529	0.000287	0.011150
6	AP10Km_CS3/0_200m	3.9777	3.2845	0.000288	0.014930
7	AP10Km_CS3/0_250m	3.9988	4.1233	0.000290	0.018742
8	AP10Km_CS3/0_300m	4.0255	4.9743	0.000292	0.022610
9	AP10Km_CS2/0_150m	3.9677	2.9255	0.000288	0.013298
10	AP10Km_CS2/0_200m	3.9925	3.9197	0.000289	0.017817
11	AP10Km_CS2/0_250m	4.0174	4.9237	0.000291	0.022380
12	AP10Km_CS2/0_300m	4.0493	5.9447	0.000293	0.027021
13	AP10Km_CS#2_150m	4.0136	4.9402	0.000291	0.022455
14	AP10Km_CS#2_200m	4.0613	6.6455	0.000294	0.030207
15	AP10Km_CS#2_250m	4.1063	8.3765	0.000298	0.038075
16	AP10Km_CS#2_300m	4.1531	10.1381	0.000301	0.046082

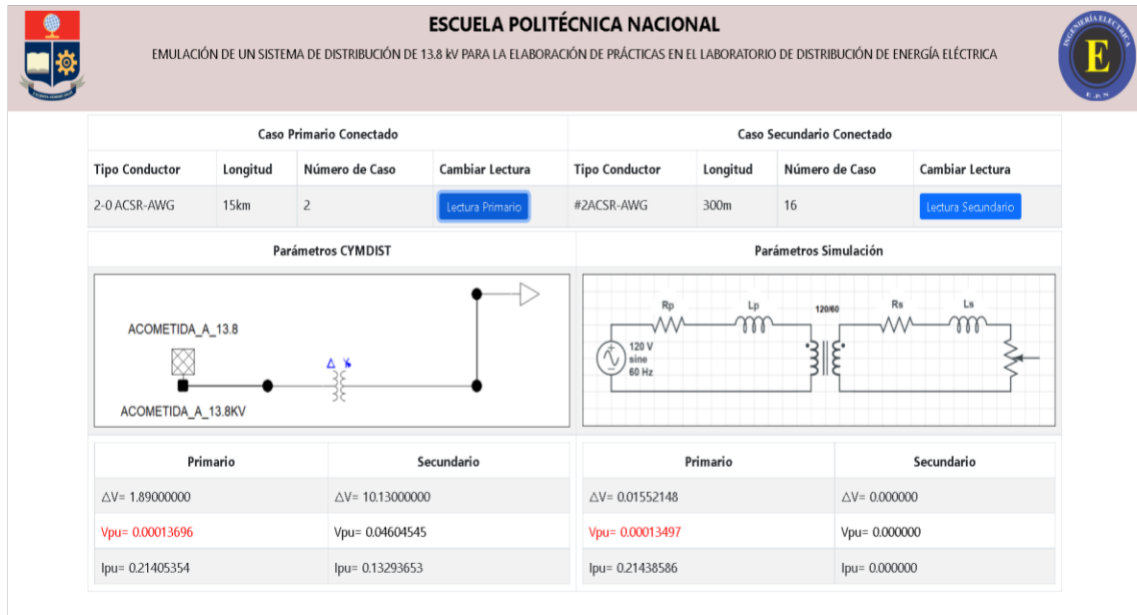
**Tabla 5.5.** Caídas de voltaje en alimentador primario de calibre #2 de longitud de 20km.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>					
1	AP20Km_CS4/0_150m	5.2261	2.0746	0.000379	0.009430
2	AP20Km_CS4/0_200m	5.2891	2.7761	0.000383	0.012619
3	AP20Km_CS4/0_250m	5.3251	3.4842	0.000386	0.015837
4	AP20Km_CS4/0_300m	5.3611	4.1971	0.000388	0.019078
5	AP20Km_CS3/0_150m	5.2709	2.4531	0.000382	0.128818
6	AP20Km_CS3/0_200m	5.3131	3.2851	0.000385	0.014932
7	AP20Km_CS3/0_250m	5.3551	4.1236	0.000388	0.018744
8	AP20Km_CS3/0_300m	5.4091	4.9751	0.000392	0.022614
9	AP20Km_CS2/0_150m	5.2931	2.9261	0.000384	0.013300
10	AP20Km_CS2/0_200m	5.3424	3.9201	0.000387	0.017819
11	AP20Km_CS2/0_250m	5.3923	4.9241	0.000391	0.022382
12	AP20Km_CS2/0_300m	5.4561	5.9451	0.000395	0.027023
13	AP20Km_CS#2_150m	5.3848	4.9408	0.000390	0.022458
14	AP20Km_CS#2_200m	5.4805	6.6466	0.000397	0.030212
15	AP20Km_CS#2_250m	5.5704	8.3775	0.000404	0.038080
16	AP20Km_CS#2_300m	5.2261	2.0746	0.000379	0.009430

**Tabla 5.6.** Caídas de voltaje en alimentador primario de calibre #2 de longitud de 25km.

No	Caso	$\Delta V$ AP_CYME	$\Delta V$ C/S_CYME	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario
<b>Calibre 2 AWG ASCR</b>					
1	AP25Km_CS4/0_150m	4.9161	2.0751	0.000356	0.009432
2	AP25Km_CS4/0_200m	4.9608	2.7767	0.000359	0.012621
3	AP25Km_CS4/0_250m	5.0060	3.4840	0.000363	0.015836
4	AP25Km_CS4/0_300m	5.0510	4.1970	0.000366	0.019077
5	AP25Km_CS3/0_150m	4.9384	2.4530	0.000358	0.011150
6	AP25Km_CS3/0_200m	4.9908	3.2847	0.000362	0.014930
7	AP25Km_CS3/0_250m	5.0440	4.1230	0.000366	0.018741
8	AP25Km_CS3/0_300m	5.1110	4.9750	0.000370	0.022614
9	AP25Km_CS2/0_150m	4.9660	2.9261	0.000360	0.013300
10	AP25Km_CS2/0_200m	5.0278	3.9209	0.000364	0.017822
11	AP25Km_CS2/0_250m	5.0901	4.9240	0.000369	0.022382
12	AP25Km_CS2/0_300m	5.1704	5.9443	0.000375	0.027020
13	AP25Km_CS#2_150m	5.0809	4.9406	0.000368	0.022457
14	AP25Km_CS#2_200m	5.2006	6.6469	0.000377	0.030213
15	AP25Km_CS#2_250m	5.3131	8.3774	0.000385	0.038079
16	AP25Km_CS#2_300m	5.4292	10.1388	0.000393	0.024678

**ANEXO VI. Capturas de la interfaz del módulo en el sistema de distribución a escala, con calibre 2/0 AWG ASCR en el alimentador primario.**



**Figura 5.9.** Interfaz web lecturas en el primario, caso décimo sexto en el secundario.



**Figura 5.10.** Interfaz web lecturas en el primario, caso décimo primero en el secundario.

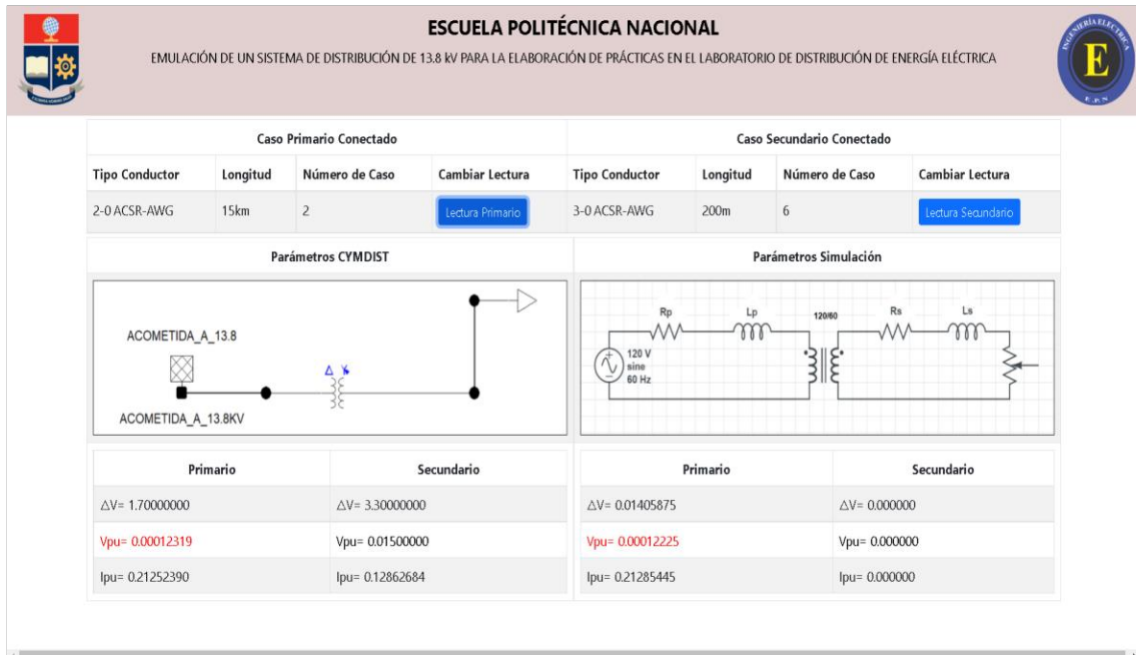


Figura 5.11. Interfaz web lecturas en el primario, caso sexto en el secundario.

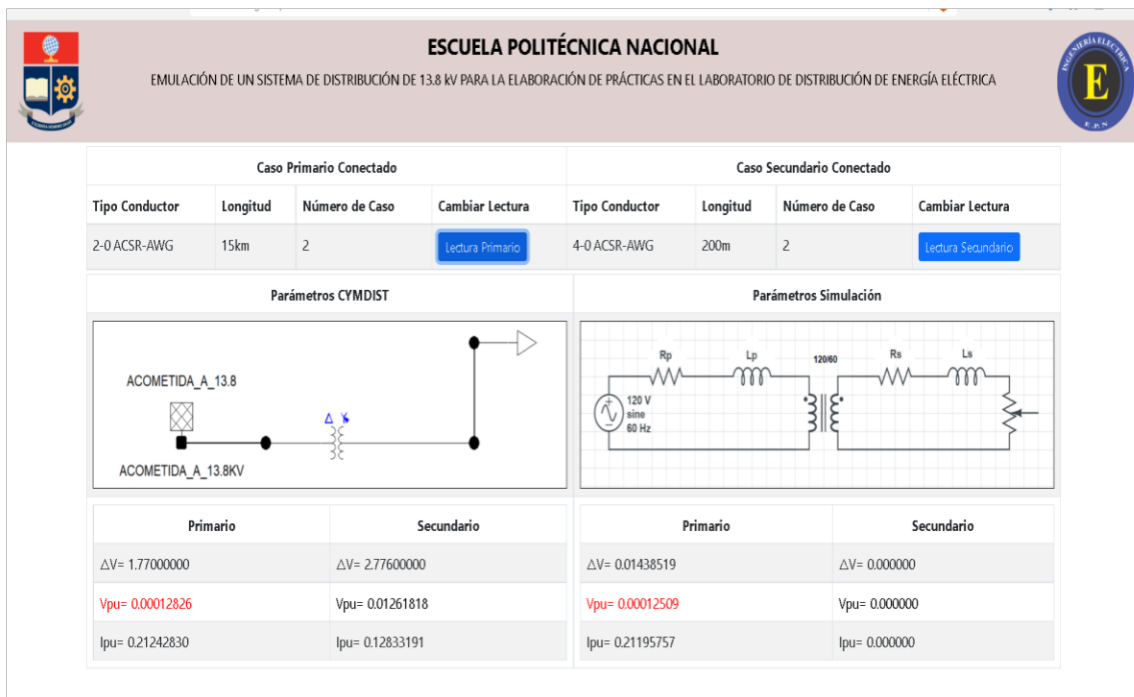
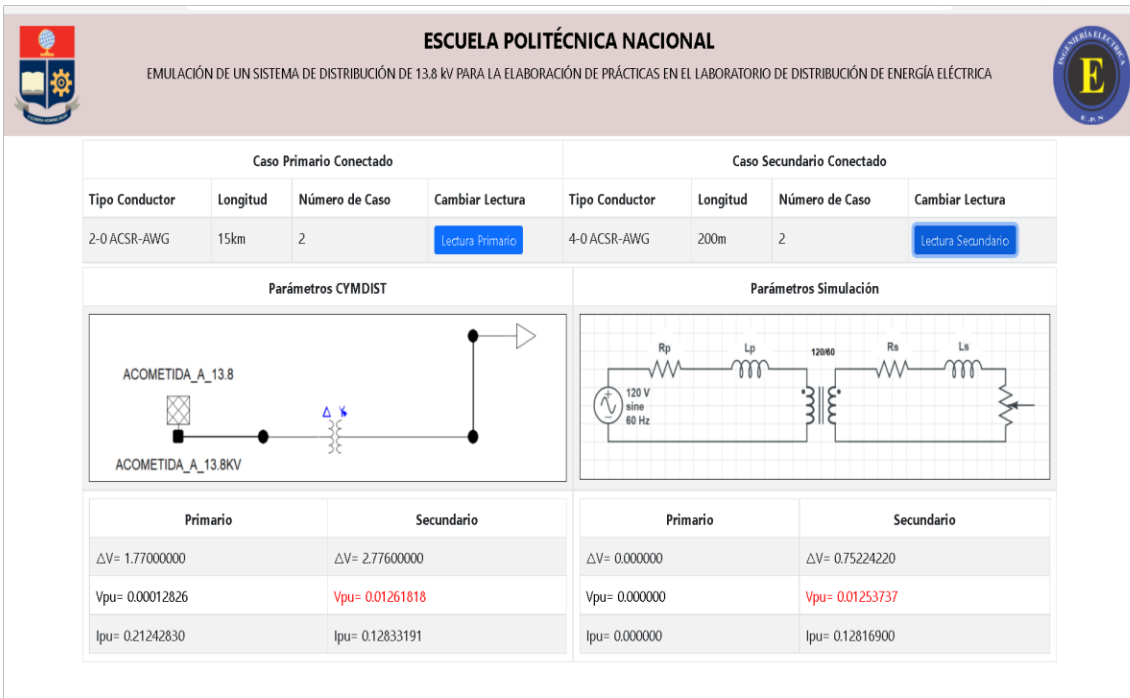
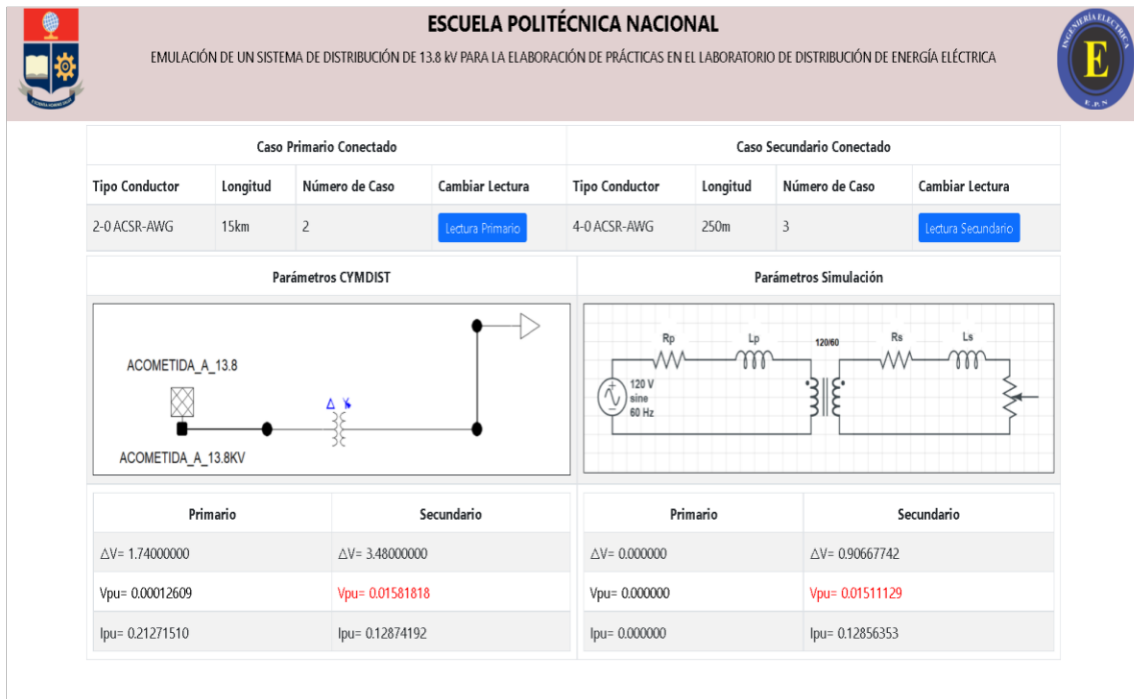


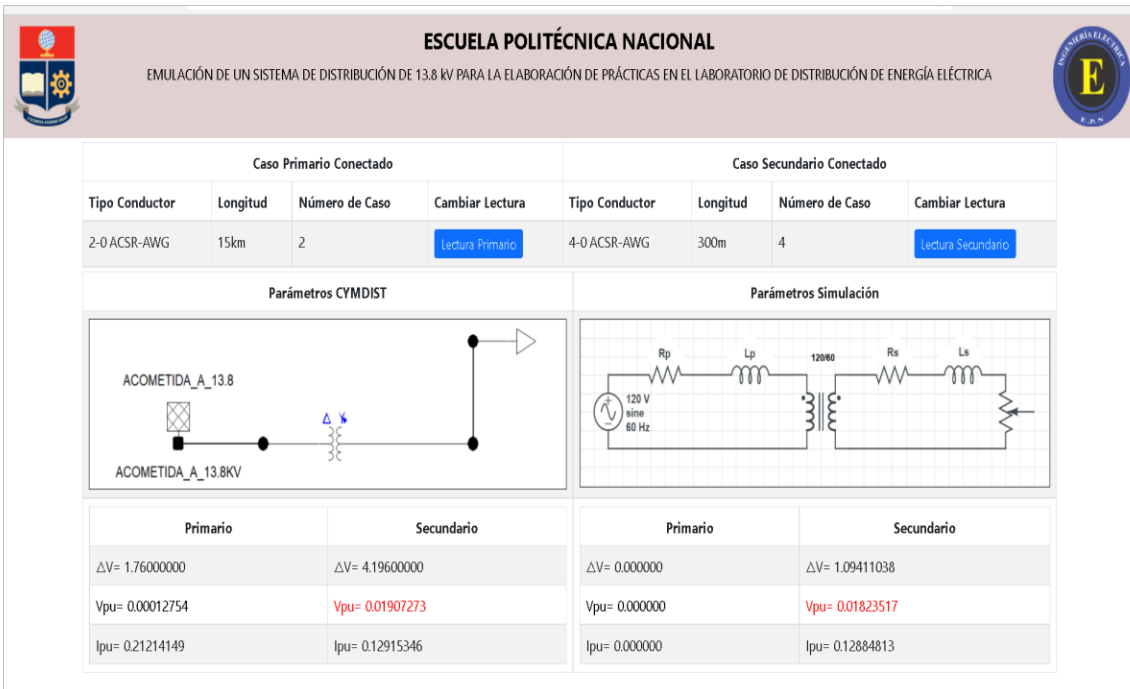
Figura 5.12. Interfaz web lecturas en el primario, caso segundo en el secundario.



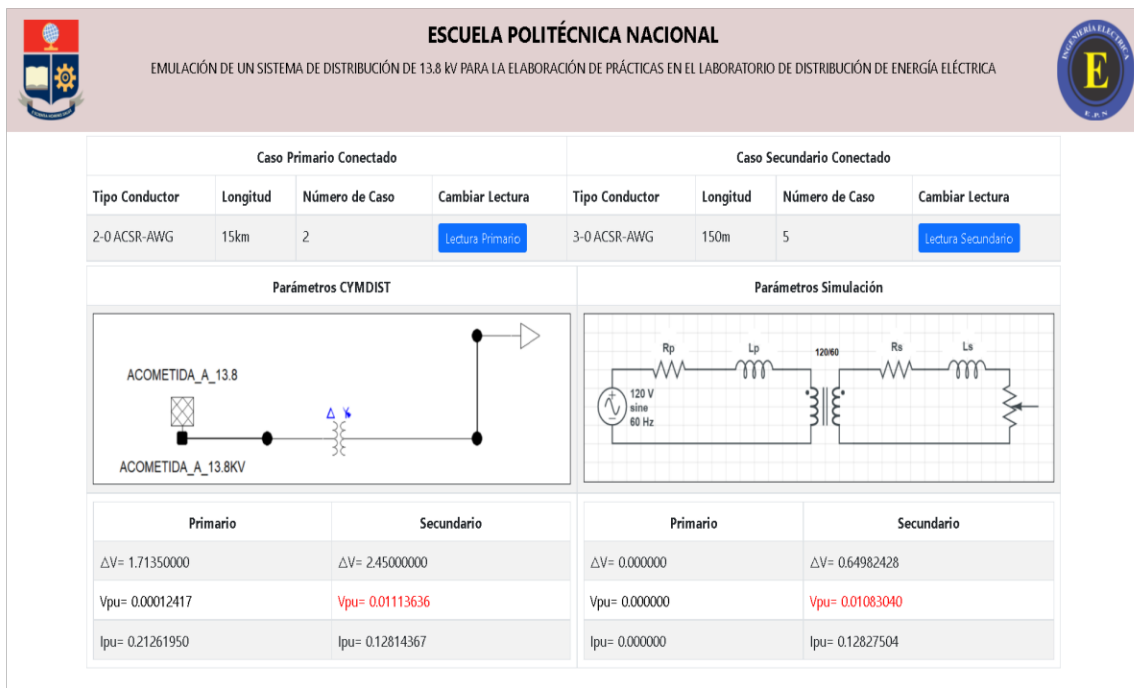
**Figura 5.13.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso segundo.



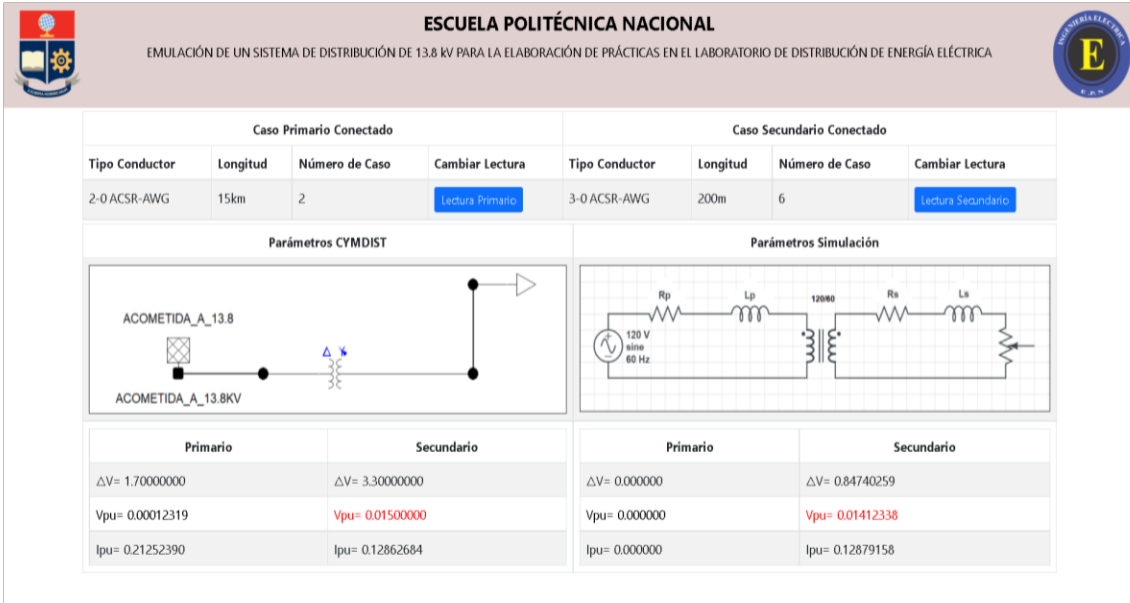
**Figura 5.14.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso tercero.



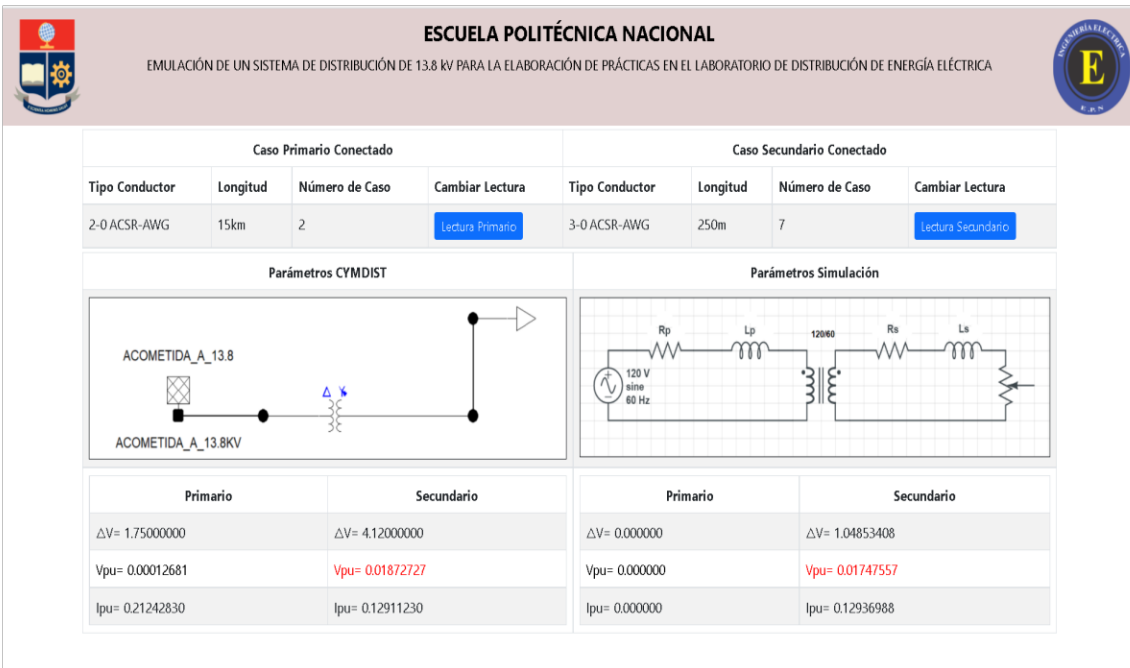
**Figura 5.15.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso cuarto..



**Figura 5.16.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso quinto.

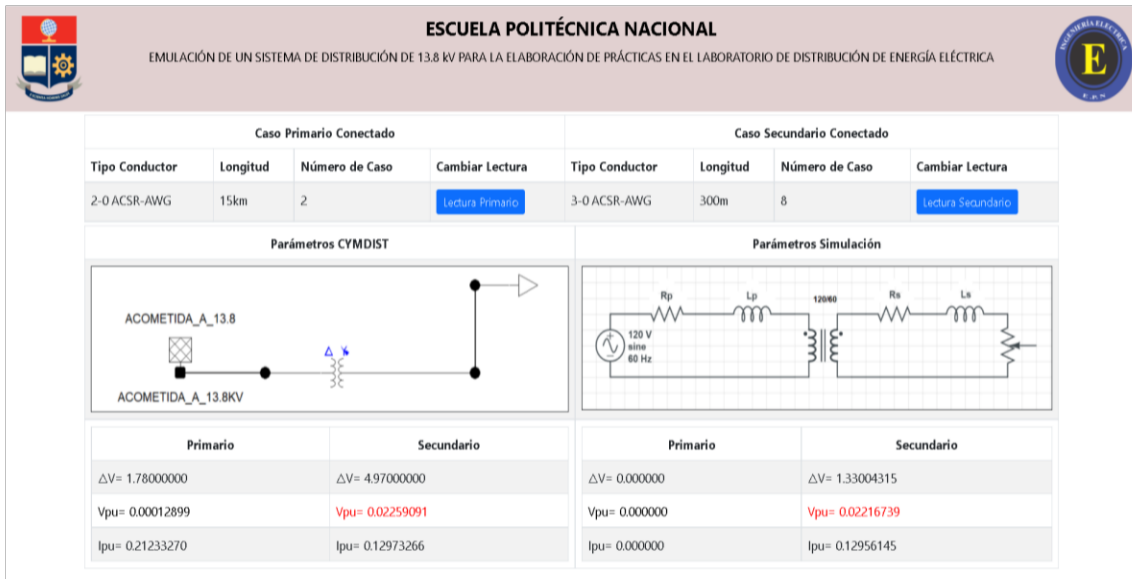


**Figura 5.17.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso sexto.

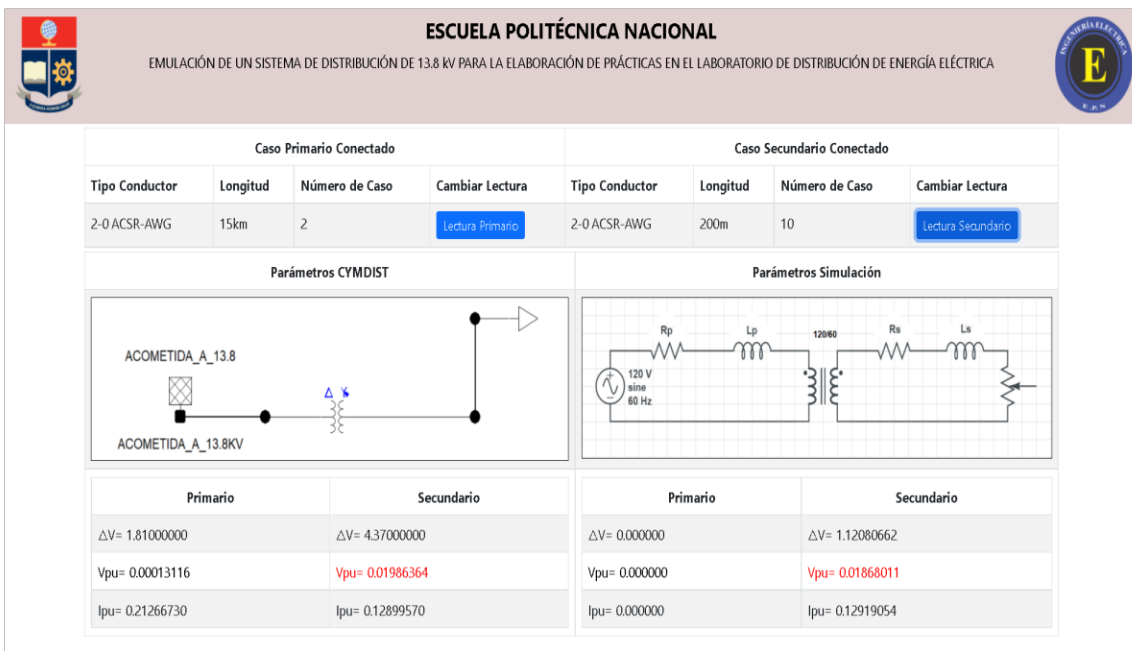


**Figura 5.18.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso septimo.

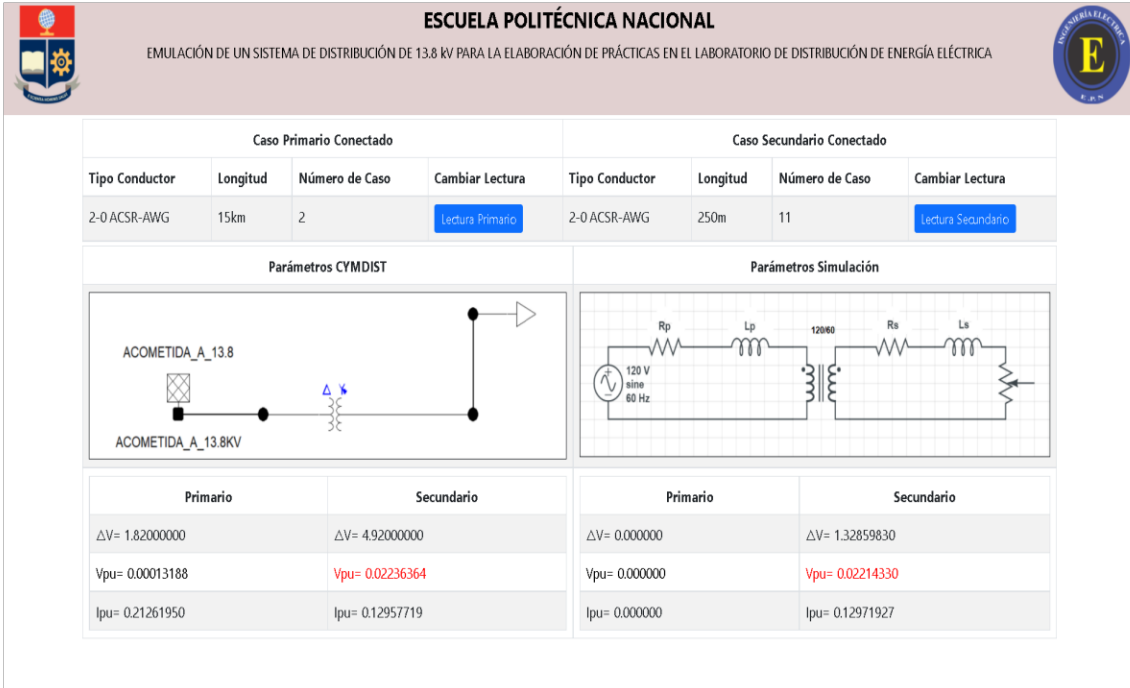




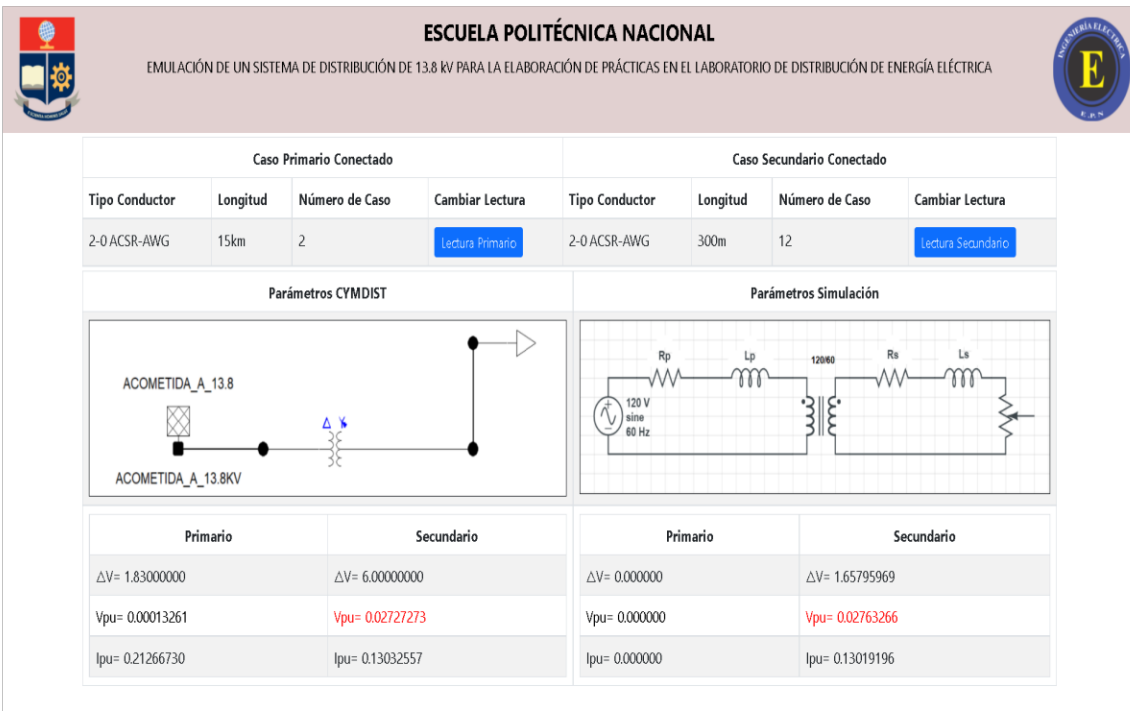
**Figura 5.19.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso octavo.



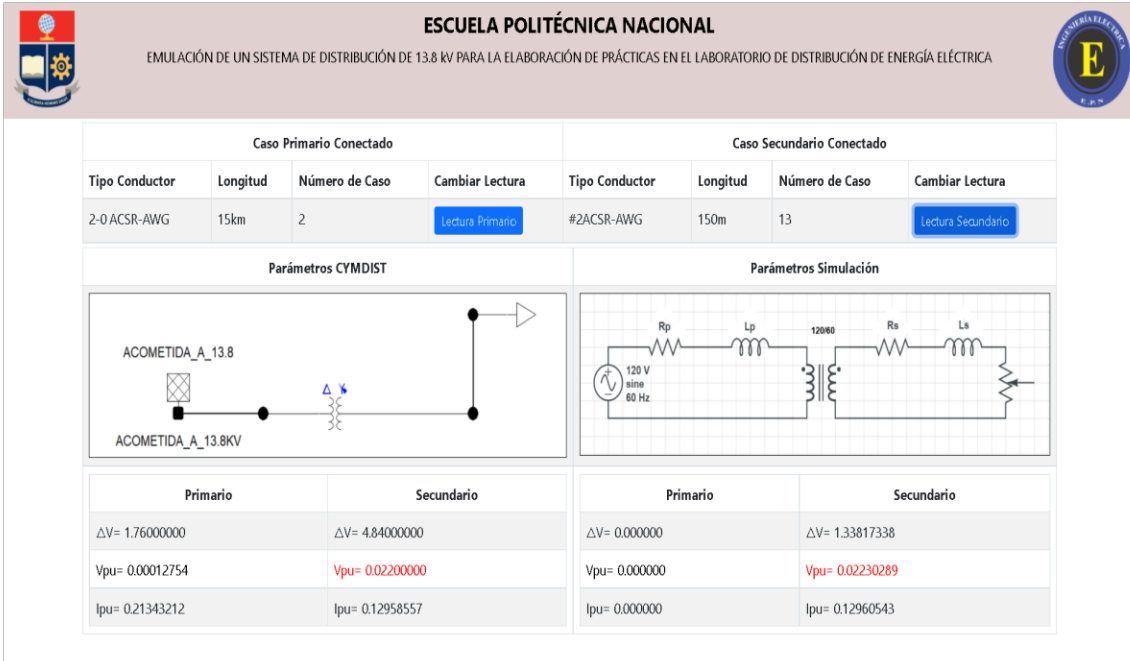
**Figura 5.20.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo.



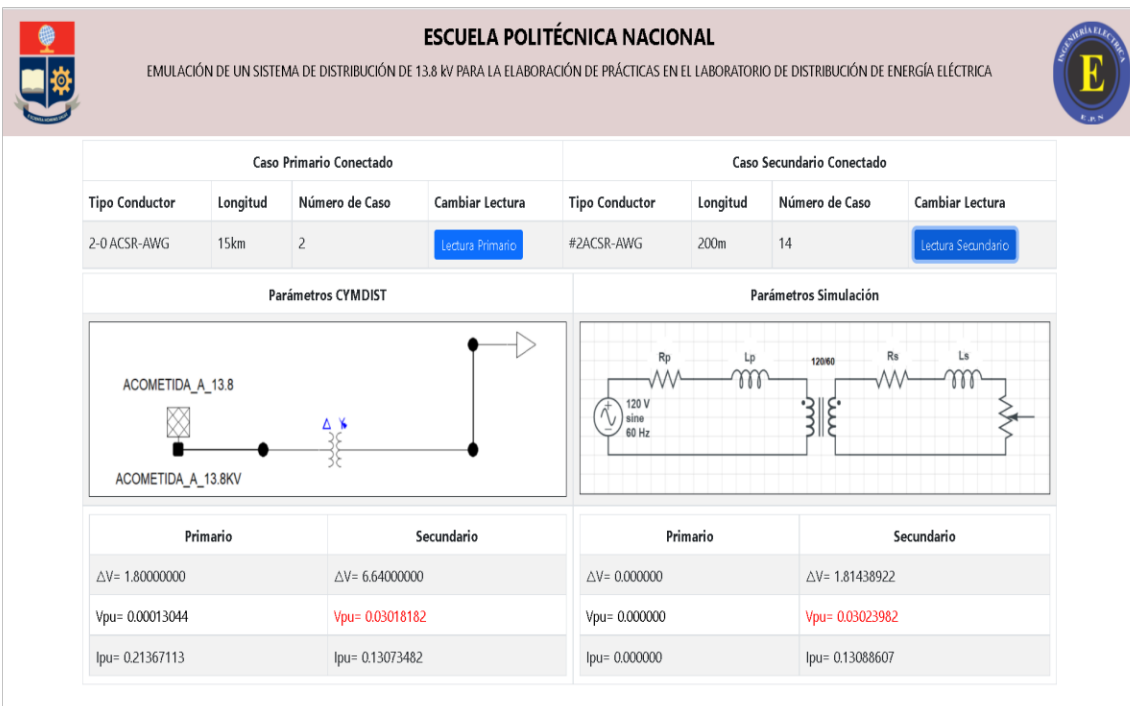
**Figura 5.21.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo primero.



**Figura 5.22.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo segundo.



**Figura 5.23.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo tercero.



**Figura 5.24.** Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo cuarto.



Figura 5.25. Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo quinto.



Figura 5.26. Interfaz web lecturas en el secundario, caso decimo sexto.

**ANEXO VII. Fotos del del módulo de impedancia y del prototipo del sistema a escala, al cual se acoplo.**

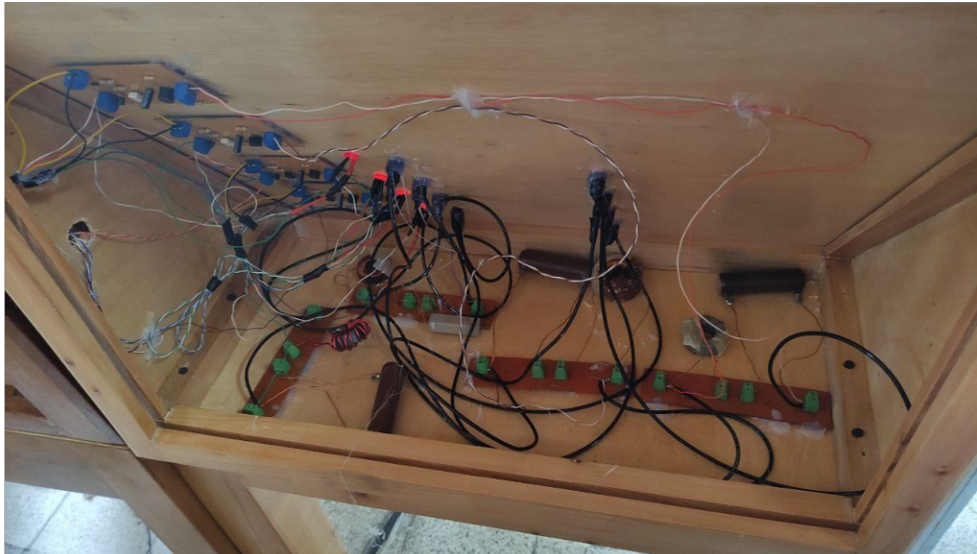


Figura 5.27. Conexión interna modulo de impedancia.

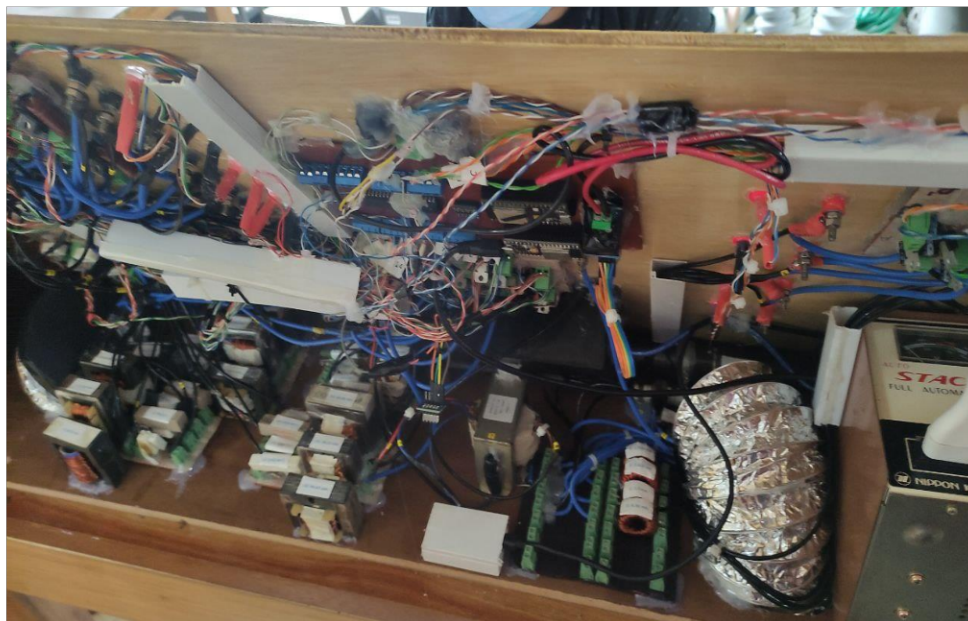


Figura 5.28. Conexión interna modulo del sistema de distribución escala.

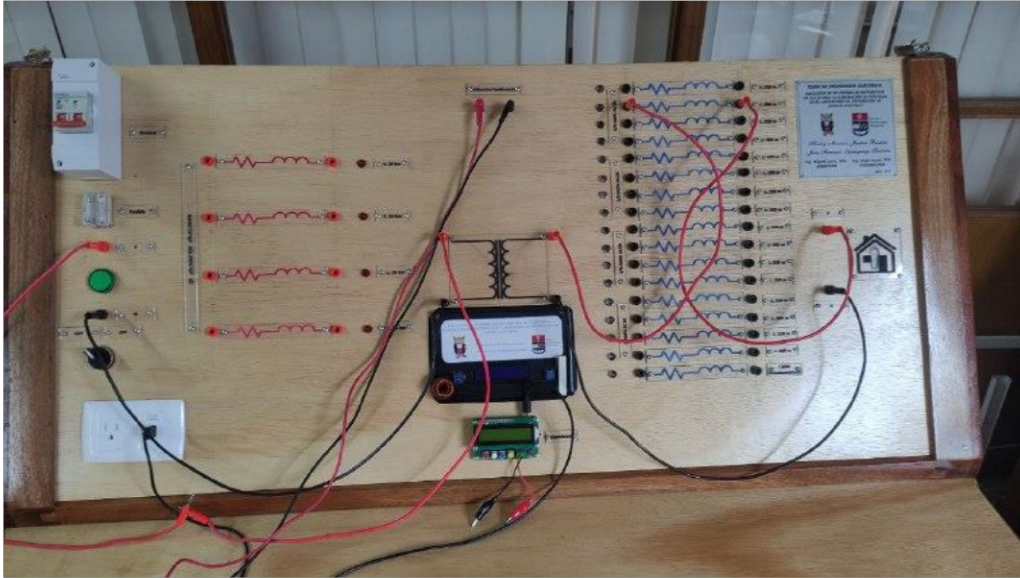


Figura 5.29. Prototipo del sistema a escala de 13.8 kV.

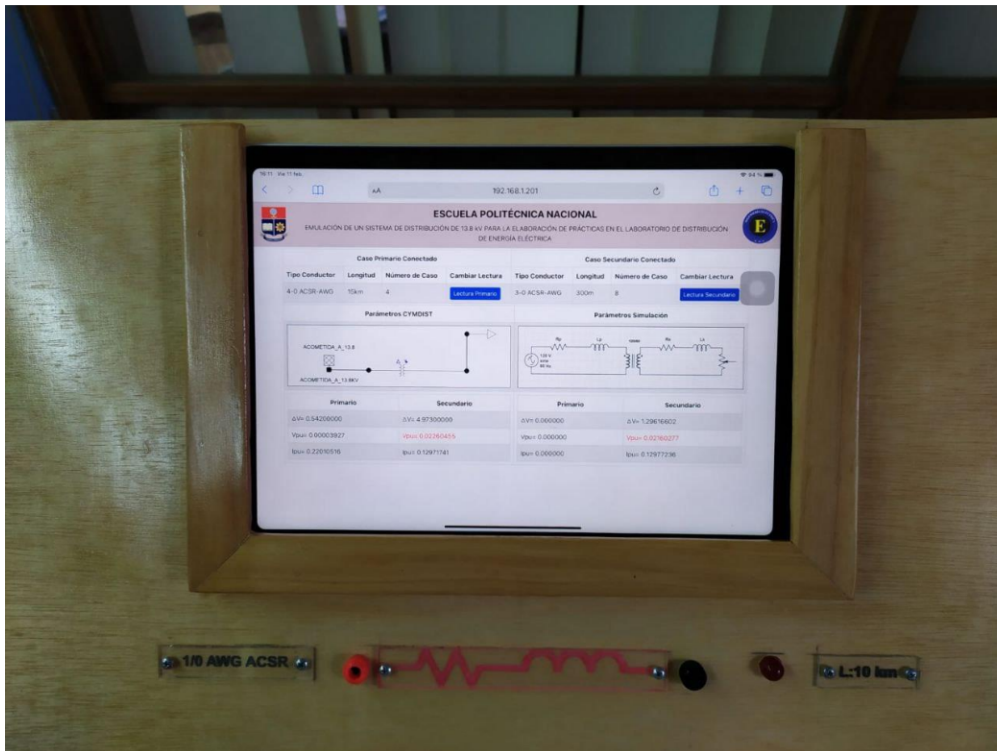
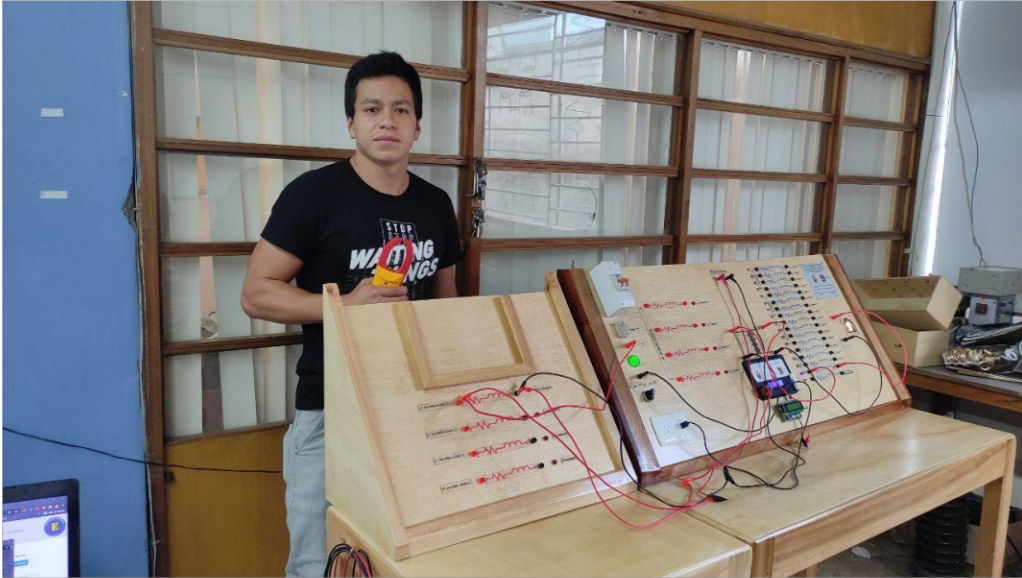


Figura 5.30. Interfaz del módulo de impedancia acoplada al sistema a escala.



**Figura 5.31.** Modulo de impedancia y prototipo del sistema a escala, acoplados.