

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

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

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

**AMPLIACIÓN DE EMULADOR DE A/P Y C/S CON CALIBRES DE  
CONDUCTORES ACSR # 1/0 AWG PARA A/P PARA EL  
LABORATORIO DE DISTRIBUCIÓN**

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

**SEBASTIÁN ALEJANDRO VALENCIA PÉREZ**

**sebastian.valencia@epn.edu.ec**

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

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

**Quito, Enero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Sebastián Alejandro Valencia Pérez 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.

---

**SEBASTIÁN ALEJANDRO VALENCIA PÉREZ**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Sebastián Alejandro Valencia Pérez, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Miguel Ángel Lucio Castro, M.Sc.**

**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.

Sebastián Alejandro Valencia Pérez

Miguel Ángel Lucio Castro

NOMBRE\_COLABORADOR(ES)

## DEDICATORIA

*A mis padres, Edgar y Sonia por siempre darme lo mejor de ellos, para poder ser mi mejor versión.*

*A mi hermana, Estefanía por siempre cuidar de mi y de mis sueños.*

*A mis abuelos, Baldomero y Nela que siempre estarán en mi corazón.*

*A mis abuelos, Jaime y Lola que fueron un ejemplo de complicidad y perseverancia.*

*A mi familia, por todo el cariño.*

*A mis amigos, por siempre estar ahí.*

*Sebastian Alejandro Valencia P.*



## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por siempre impulsarme a seguir luchando por lo que quiero y lo que merezco, aunque no creo en Dios, sé que los ángeles existen, ya que ustedes siempre fueron los míos, mostrándome que puedo ser fuerte, incluso más de lo que imagino; que soy capaz para lograr mis objetivos y que mis sueños son solo eso porque aún no me he decidido a cumplirlos. Ahora les demuestro que sus enseñanzas han sido oídas y aprendidas. Desde el fondo de mi ser solo les quiero decir gracias, por siempre creer en mí.

A mi hermana por estar en las buenas y en las malas, por ser ese oasis en mi vida para cuando me sentía vacío y melancólico, y darme esos sermones que me hacían abrir los ojos y encontrar el camino.

A mi tío Franklin, que en la vida ha sido uno de mis grandes maestros y que constantemente me motiva e insiste para buscar la excelencia en todo lo que me proponga. Por enseñarme que la victoria también requiere uno que otro fracaso, pero que al finalizar todo, no hay mejor sentimiento de satisfacción. Hoy te digo ñaño, se acabó y lo valió.

A mi primo Pancho, que a pesar de la distancia no hemos perdido la relación fraterna que siempre tuvimos y que en mis más oscuros momentos siempre me ayudó a buscar la luz.

A mi familia, por tanto cariño que he recibido a lo largo de mi vida, por siempre estar pendiente de mí, apoyando mis éxitos y ayudando a mejorar mi persona constantemente, sin ninguno de Uds. no sería quien soy al día de hoy.

A Álvaro, Sebastián, Daniel, Ángel, Alex y Juanpa que a lo largo de mi vida han sido parte fundamental y que el tiempo no ha cambiado la importancia que han tenido para mí, más que amigos, los considero hermanos.

A todos mis amigos, que todas las experiencias vividas se multipliquen y se goce como solo nosotros sabemos.

Al M.Sc. Miguel Lucio, por la guía y la confianza para poder realizar este proyecto.

Gracias por el cariño,

Sebastian Alejandro Valencia Pérez

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO .....	2
<b>1.4.1 CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4.2 CONSTITUCIÓN DE LOS CIRCUITOS PRIMARIOS .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4.2.1 Conductores en el sistema de distribución.....</b>	<b>3</b>
1.4.2.1.1 Conductor de Aluminio desnudo tipo ASC y AAC .....	3
1.4.2.1.2 Conductor de Aluminio desnudo tipo ACSR.....	4
1.4.2.1.3 Conductores de cobre desnudo.....	4
1.4.2.1.4 Conductores aislados.....	4
<b>1.4.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4.3.1 Resistencia .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4.3.2 Inductancia .....</b>	<b>5</b>
1.4.3.2.1 Reactancia inductiva .....	6
<b>1.4.3.3 Capacitancia.....</b>	<b>6</b>
1.4.3.3.1 Reactancia Capacitiva.....	6
<b>1.4.4 REPRESENTACION DE LINEAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA .....</b>	<b>6</b>
1.4.4.1 Línea corta (<80 km) .....	7
1.4.4.2 Línea media (80<L<240 km) .....	7
1.4.4.3 Línea larga (>240 km) .....	8
<b>1.4.5 TOPOLOGIAS DE REDES PRIMARIAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.6 SISTEMA POR UNIDAD.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.7 IMPEDANCIA SERIE EN LÍNEAS AÉREAS .....</b>	<b>11</b>
1.4.7.1 Ecuaciones de Carson .....	12
1.4.7.2 Matriz de impedancia primitiva.....	13
1.4.7.3 Reducción de Kron .....	14
<b>1.4.8 CAIDA DE VOLTAJE .....</b>	<b>16</b>
1.4.8.1 Primera aproximación usando factor K .....	17

1.4.8.2 Caídas de voltaje normalizadas por la E.E.Q.....	18
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO UNA LINEA CORTA.....</b>	<b>19</b>
2.1.1 ESTRUCTURAS DE UN ALIMENTADOR PRIMARIO.....	19
2.1.2 PARÁMETROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.....	20
<b>2.2 VALORES OBTENIDOS EN FUNCION DE LAS ECUACIONES DE CARSON Y REDUCCION DE KRON.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 ESCALAMIENTO DE UNIDADES.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 BASES DEL SISTEMA USANDO EL SISTEMA P.U. ....	24
2.3.2 CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE IMPEDANCIAS.....	25
2.3.3 CALCULO DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PROPIA DEL CONDUCTOR.....	25
<b>2.4 COMPARACIÓN DE CALCULOS CON EL SOFTWARE MATLAB.....</b>	<b>26</b>
2.4.1 MATRIZ PRIMITIVA CALCULADA.....	27
2.4.2 MATRIZ IMPEDANCIA DE FASES CALCULADA.....	27
2.4.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA LÍNEA.....	28
2.4.3.1 Sistema de 13.8 kV con el conductor ACSR 1/0 AWG.....	29
2.4.3.2 Módulo a escala para conductor ACSR 1/0 AWG.....	30
2.4.4 CAÍDAS DE VOLTAJE EN FUNCIÓN A LOS PARÁMETROS CALCULADOS.....	31
<b>2.5 MODELADO EN SOFTWARE CYME.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6 VALORES DE PARÁMETROS PARA PRIMERA APROXIMACIÓN DE CAÍDA DE VOLTAJE.....</b>	<b>34</b>
<b>2.7 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS.....</b>	<b>35</b>
2.7.1 CONSTRUCCIÓN DE RESISTENCIAS, INDUCTANCIAS Y PLACAS.....	35
2.7.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO.....	35
2.7.3 SISTEMA DE IDENTIFICADOR DE CASOS.....	37
2.7.4 MEDICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE.....	38
<b>3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1 PARAMETROS ELECTRICOS DEL SISTEMA A ESCALA CON CABLE ACSR 1/0 AWG.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2 PÉRDIDAS EN EL CONDUCTOR POR EFECTO JOULE.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3 MEDICION DE CORRIENTE.....</b>	<b>41</b>
3.1.3.1 Primera aproximación de caída de voltaje.....	43
<b>3.1.4 CAIDA DE VOLTAJE.....</b>	<b>44</b>
3.1.4.1 Caída de voltaje para un alimentador primario ACSR 1/0 AWG con distancia de 10 km y circuitos secundarios variables.....	44
3.1.4.1.1 Valores de caída voltaje obtenidos del modelo a escala.....	44
3.1.4.1.2 Valores de caída voltaje obtenidos de la primera aproximación.....	46
3.1.4.2 Comparación de valores de caída de voltaje con las normas propuestas en la EEQ.....	48

3.1.5 COMPARACIÓN DE CAÍDA DE VOLTAJE PARA LOS CONDUCTORES ACSR #2 Y 1/0 AWG EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO .....	50
3.1.6 RESULTADOS FINALES PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO .....	52
3.1.7 MODELO CONSTRUIDO .....	53
3.2 CONCLUSIONES .....	55
3.3 RECOMENDACIONES .....	56
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
5 ANEXOS.....	59

## RESUMEN

En el presente proyecto se ha diseñado e implementado una ampliación al emulador de escala reducida de un sistema de distribución (S/D) de 13.8 kV, cambiando el calibre del conductor de un ACSR #2 AWG a un conductor calibre ACSR #1/0 AWG para el alimentador Primario. El proyecto permite un mejor entendimiento de la teoría relacionada con: el modelo de una línea corta y caídas de voltaje en el S/D, debido a que el proyecto permite observar en tiempo real los valores de caída de voltaje y corriente que circulan por el alimentador primario el cual, considerando el distanciamiento propuesto de 10 km, se modela como una línea corta. Con esto es posible verificar la teoría con los estudios experimentales para el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

El proyecto toma mediciones de voltaje y corriente a tiempo real para identificar la caída de voltaje que se obtiene en función del calibre y la distancia considerada tanto para el alimentador primario como para el circuito secundario. Los valores obtenidos serán comparados con una aplicación del software CYMDIST de CYME para verificar su veracidad. Estos resultados se podrán observar mediante una interfaz gráfica en cualquier aparato digital con una conexión a una red inalámbrica, mediante una comunicación producida por el módulo original del modelo a escala.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de distribución (S/D), sistema a escala, caída de voltaje, alimentador primario (A/P), circuito secundario (C/S), sistema en por unidad (p.u), calibre ACSR 1/0 AWG, modelo a escala, sistema de 13.8 kV, medio voltaje (MV), bajo voltaje (BV).

## ABSTRACT

In the present project has been designed and implemented an extension to the 13.8 kV reduced-scale distribution system, changing the conductor gauge from an ACSR #2 AWG to an ACSR #1/0 AWG for the primary feeder. The project allows a better understanding of the theory related to: the model of a short line and the voltage drops in the distribution system, because the project allows to observe in real time the values of the voltage drop and the current that circulate through the primary feeder which, considering the proposed distance of 10 km, is modeled as a short line. With this it is possible to verify the theory with the experimental studies for the Electric Power Distribution Laboratory of the National Polytechnic School.

The project takes measurements of voltage and current in real time to identify the voltage drop obtained depending on the gauge and the distance considered for the primary feeder and the secondary circuit. The values obtained will be compared with a simulation software CYME CYMDIST to verify their accuracy. These results can be observed through a graphical interface in any digital device with a connection to a wireless network, through a communication produced by the original module of the scale model.

**KEYWORDS:** Distribution System, Scale system, voltage drop, primary feeder, secondary circuit, per-unit (p.u.) based scaling method, ACSR 1/0 AWG of gauge, scale model, 13.8 kV system, medium voltage, low voltage.

# 1 INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico se divide principalmente en Generación, Transmisión y Distribución, siendo el último el encargado directo de proveer de la energía eléctrica a los usuarios finales.

El sistema de distribución es el encargado de transportar la energía eléctrica en medio voltaje (MV) mediante alimentadores primario, los cuales se ramifican y luego mediante el uso de un transformador de distribución, el cual puede ser trifásico o monofásico, se baja el nivel de voltaje a 120 o 240 V, niveles de voltaje de consumo común en Bajo Voltaje (BV), para su distribución y entrega a los consumidores finales.

Un alimentador primario es una parte fundamental del sistema de distribución, el cual funge la función de transportar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los transformadores de distribución.

Debido a las propiedades internas de los conductores que sirven como alimentadores primarios existen efectos, los cuales denotan una disminución en la eficacia y eficiencia en la transmisión de la energía. Uno de los efectos más importantes a considerar es la caída de voltaje, la cual puede generar problemas considerables en la calidad del producto de no hacerse los análisis necesarios, y puede generar un descontento de los usuarios finales con la empresa distribuidora.

Con dicho argumento y con el fin de poder mostrar de manera didáctica en el laboratorio de distribución de energía eléctrica, se considera que un modelo a escala permitiría a los estudiantes entender de mejor manera dicho efecto. El proyecto original fue avalado y aprobado en su primera fase, por lo que para dar continuidad y fortalecer el entendimiento y practica didáctica se ha propuesto la ampliación del modelo a escala del sistema de 13.8 kV el cual permitirá observar de mejor manera el efecto antes mencionado.

La ampliación mencionada permitirá observar los cambios en sistema de distribución eléctrica cuando varía el calibre del alimentador primario, obteniendo cambios notorios en los resultados en la caída de voltaje y corriente. Por lo se puede observar cómo cambian los parámetros eléctricos tanto en el alimentador primario como en el circuito secundario.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo emulador para calibre ACSR 1/0 AWG en alimentador primario con una distancia de 10 km, para expandir el sistema de distribución a escala del

## **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 usa líneas cortas por sus longitudes.
2. Determinar los parámetros eléctricos del alimentador primario 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 de calibre ACSR #2 AWG a ACSR 1/0 AWG en el alimentador primario, tomando las mediciones de caída de voltaje y corriente que se evidenciaran en la simulación.
4. Realizar mediciones de caída de voltaje y corriente en puntos específicos del sistema usando el programa de medición inalámbrica del emulador.

## **1.3 ALCANCE**

Se entregará un módulo de impedancia construido que emula un A/P de conductor calibre ACSR 1/0 AWG, para ser acoplado eléctrica y físicamente al pupitre de pruebas elaborado por los Ings. Henry Jiménez y Fernando Llumiquinga.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

El sistema de distribución eléctrica es parte del sistema eléctrico de potencia (SEP) y es el encargado de suministrar energía desde una subestación de distribución hasta los consumidores finales. [1]

Está constituido por:

- Subestación de Distribución: es la instalación eléctrica que recibe la energía eléctrica de las líneas de subtransmisión y que contiene equipos robustos que permite la transformación de voltaje, de alto voltaje a medio voltaje, y que posteriormente será distribuida.
- Circuitos primarios: Son los encargados de transportar la energía eléctrica desde las Subestaciones de distribución hasta los transformadores de distribución.



Transportan la energía en voltajes tales como: 13.2 kV, 22.8kV, 7.62 kV, 6.3 kV, es decir en Medio voltaje. [2]

- Transformadores de distribución: son aquellos que reducen la tensión eléctrica de Medio voltaje a bajo voltaje, conectando el circuito primario al circuito secundario.
- Circuitos secundarios: Son quien distribuyen la energía a los consumidores con voltajes de 240/120 V o 220/127 V comúnmente. [1]

#### **1.4.2 CONSTITUCIÓN DE LOS CIRCUITOS PRIMARIOS**

Son los encargados del transporte de energía eléctrica en medio voltaje, son cables conductores denominados alimentadores primarios, los cuales pueden ser aéreos o subterráneos. [3]

Los circuitos primarios están constituidos por:

- Troncal: es quien transmite la energía eléctrica desde las subestaciones de distribución hasta los ramales. Son tramos de gran capacidad y generalmente más robustos que los ramales. Así mismo son tramos de grandes longitudes en comparación con los ramales.
- Ramal: son energizados por el troncal, y proveen energía a los transformadores de distribución y de algunos servicios particulares que requieran medio voltaje. [3]

Los alimentadores primarios se pueden clasificar por el número de hilos que posean: trifásico tres hilos (tres fases), trifásico cuatro hilos (tres fases y neutro), monofásico dos hilos (Una fase y neutro) y monofásico un hilo (solo una fase).

##### **1.4.2.1 Conductores en el sistema de distribución**

Los conductores utilizados en el sistema de distribución en Quito, para alimentadores primarios son principalmente aluminio para redes aéreas y cobre para redes subterráneas. Los conductores de aluminio serán principalmente ASC, AAC o ACSR y los conductores de cobre pueden ser desnudos o aislados. [2]

###### *1.4.2.1.1 Conductor de Aluminio desnudo tipo ASC y AAC*

Los conductores de aluminio desnudo tipo ASC (Aluminum Strand Conductor) o AAC (All Aluminum Conductor). Son conductores construidos con alambres de aleación y cableados concéntricamente. Se lo suele usar debido a que posee menor peso que los cables ACSR. Cumple con las designaciones ASTM 1350-H19, según la especificación B-231. [4]

#### 1.4.2.1.2 Conductor de Aluminio desnudo tipo ACSR

Los conductores de aluminio desnudo tipo ACSR (Aluminum Conductor Steel reinforced) son cables de aluminio de aleación con un alma de acero, y cableados concéntricamente. Cumple con las designaciones ASTM B232 y B498. [5]

#### 1.4.2.1.3 Conductores de cobre desnudo

El material será de cobre electrolítico estirado en frío cableado con capas concéntricas y debe satisfacer la norma ASTM B8-46.

Los conductores a utilizarse para el neutro en redes subterránea serán preferentemente de cobre estañado. [2]

#### 1.4.2.1.4 Conductores aislados

El material será de cobre electrolítico temple recocido o aluminio, con cableado concéntrico, y debe cumplir la norma ASTM B3. [2]

### 1.4.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Una línea eléctrica tiene 4 parámetros que afectan su capacidad para transmitir la energía: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. Los dos primeros parámetros mencionados conforman la impedancia serie del alimentador, mientras que los otros dos parámetros son los que se conocen de la rama paralela de la línea. [6]

#### 1.4.3.1 Resistencia

Este es el parámetro que tiene mayor influencia en la pérdida de potencia en las líneas de distribución y transmisión eléctrica, estas pérdidas se deben principalmente al efecto Joule, también conocida como resistencia efectiva, la cual se puede definir como:

$$R = \frac{\text{Pérdida de potencia en el conductor}}{|I|^2} \Omega \quad (1.1)$$

Donde la potencia está en Watts (W) e I es la corriente rms en el conductor en amperios (A). La resistencia efectiva es igual a la resistencia de corriente directa del conductor solo si la distribución de corriente a través del conductor es uniforme.

La resistencia de corriente directa está dada por la ecuación.

$$R_o = \frac{\rho * l}{A} \Omega \quad (1.2)$$

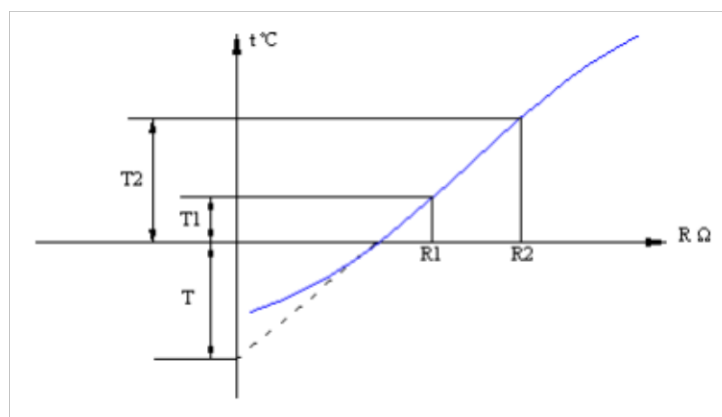
Donde  $\rho$  = resistividad del conductor [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,  $\Omega \cdot \text{cmil}/\text{ft}$ ]

$l$ = longitud [m, ft]

$A$ = área de la selección transversal [ $\text{mm}^2$ , cmil]

Un circular mil (cmil) es el área que tiene un diámetro de 1 mil. Un mil es  $10^{-3}$  pulgadas.

La resistencia tiene una variación prácticamente lineal con respecto al cambio de temperatura en el rango de operación normal. Al hacer una gráfica resistencia vs temperatura se obtiene un método conveniente para hacer la corrección de la resistencia por variación de temperatura. El punto de intersección de la extensión de la línea con el eje de la temperatura a resistencia cero, es una constancia del material. [6]



**Figura 1.1.** Curva de variación de la resistencia en función a la temperatura. [1]

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+T_2}{T+T_1} \quad (1.3)$$

Donde  $R_1$  y  $R_2$  son las resistencias del conductor a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T$  es la constante del material determinada de la gráfica.

Conforme aumenta la frecuencia de la corriente alterna, la no uniformidad de la energía eléctrica se hace más pronunciada, provocando un origen de una densidad de corriente no uniforme, a este fenómeno se lo denomina como Efecto Piel. Generalmente la densidad de corriente incrementa desde el interior hacia la superficie en un conductor circular. El incremento de la resistencia debido al efecto piel usualmente es entre el 1-2% de la resistencia en corriente directa de la ecuación (1.2), es decir antes de hacer la corrección por temperatura. [6]

### 1.4.3.2 Inductancia

Cuando circula una corriente de magnitud variable con el tiempo por un conductor aparece un flujo magnético variable, el cual se enlaza con los conductores cercanos del circuito. [1]

La corriente sinusoidal produce flujos que también son sinusoidales en fase con la corriente, y los enlaces de flujo resultantes se expresan como el fasor  $\lambda$  y la inductancia al ser un enlace de flujos por ampere, se puede definir como: [6]

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (1.4)$$

#### 1.4.3.2.1 Reactancia inductiva

Dada la frecuencia del sistema (f) aparece la reactancia inductiva ( $X_L$ ) que es la oposición a la corriente alterna, producida por una inductancia, es la suma de la inductancia interna y externa del conductor. [1]

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1.5)$$

Que mediante operaciones matemáticas se puede dejar en función a la distancia media geométrica (DMG) y al radio medio geométrico (RMG).

$$X_L = 0.11736 * \log\left(\frac{DMG}{RMG}\right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1.6)$$

#### 1.4.3.3 Capacitancia

Es el resultado de la relación de la carga (q) con la diferencia de potencial (v) entre los conductores. [6]

$$C = \frac{q}{v} \quad [\text{F/m}] \quad (1.7)$$

#### 1.4.3.3.1 Reactancia Capacitiva

Dada la frecuencia del sistema (f) un capacitor sometido a una corriente alterna, tiene una oposición a la misma, y es inversamente proporcional a la frecuencia de la corriente.

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad [\Omega * \text{km}] \quad (1.8)$$

$X_C$  representa la reactancia capacitiva, mediante artificios matemáticos se puede obtener la reactancia en función de la distancia equivalente de conductores ( $D_{eq}$ ) y el radio externo del conductor para una línea que tiene un conductor por fase ( $D_{sc}$ ). [6]

$$X_C = 4.77 * 10^4 * \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{sc}}\right) \quad [\Omega * \text{km}] \quad (1.9)$$

### 1.4.4 REPRESENTACION DE LINEAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA

Las ecuaciones que relacionan voltaje y corriente en una línea eléctrica, establecen que los parámetros establecidos anteriormente están distribuidos de manera uniforme. Sin embargo, dependiendo de la distancia de las líneas se deben hacer cálculos y aproximaciones diferentes para poder representarlas con mayor exactitud. [6]

#### 1.4.4.1 Línea corta (<80 km)

Son líneas que transmiten energía eléctrica con voltajes menores a 50 kV por lo su capacitancia es depreciable.

Su representación es un circuito serie entre la resistencia y la reactancia inductiva, teniendo así, que la corriente se mantiene en todo el circuito constante ( $I$ ) y el voltaje de entrada ( $V_s$ ) es la suma del voltaje de salida ( $V_r$ ) y el voltaje en la impedancia de la línea ( $Z$ ).

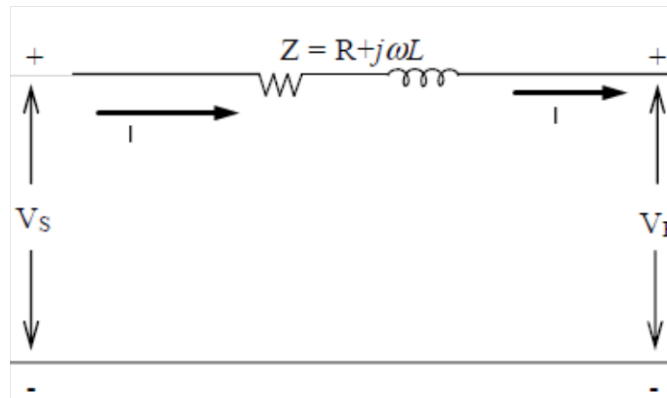


Figura 1.2. Representación de una línea corta. [6]

Con esto se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$I_s = I_r = I \quad (1.10)$$

$$V_s = V_r + Z * I \quad (1.11)$$

$$Z = R + j * \omega * L = R + j * 2 * \pi * f * L \quad (1.11)$$

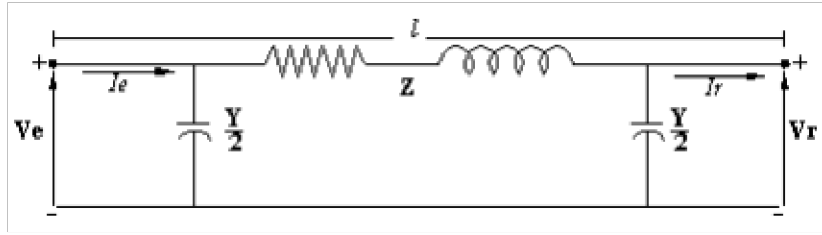
#### 1.4.4.2 Línea media (80<L<240 km)

Son aquellas que transmiten la energía eléctrica en voltajes de transmisión y subtransmisión, es decir Alto voltaje, su capacitancia no es depreciable, pero no tiene gran complejidad para ser calculado. [1]

##### 1.4.4.2.1 modelo $\pi$

Es el modelo más utilizado para la representación de la línea media. Mantiene la rama serie ( $Z$ ) en su totalidad y se usa la admitancia ( $Y$ ), la cual es el inverso de la reactancia

capacitiva ( $X_c$ ), dividida en dos partes iguales y colocadas al inicio y final de la rama serie. [6]



**Figura 1.3.** Representación de línea media modelo  $\pi$ . [6]

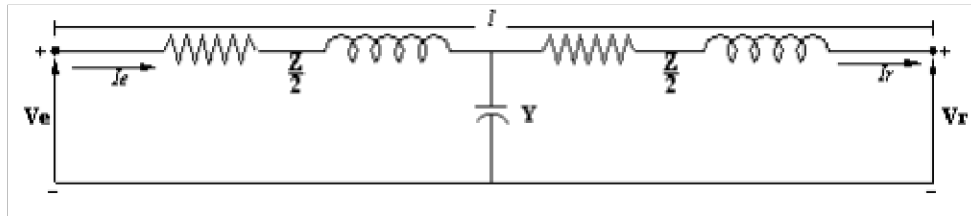
Las ecuaciones obtenidas son:

$$V_e = \left( Z * \frac{Y}{2} + 1 \right) * V_r + Z * I_r \quad (1.12)$$

$$I_e = Y * \left( 1 + \frac{Z*Y}{4} \right) * V_r + \left( Z * \frac{Y}{2} + 1 \right) * I_r \quad (1.13)$$

#### 1.4.4.2.2 Modelo T

En este modelo a diferencia del anterior se divide la rama serie ( $Z$ ) en dos partes iguales, mientras que a la admitancia ( $Y$ ) se lo mantiene en su totalidad.



**Figura 1.4.** Representación de línea media modelo T. [6]

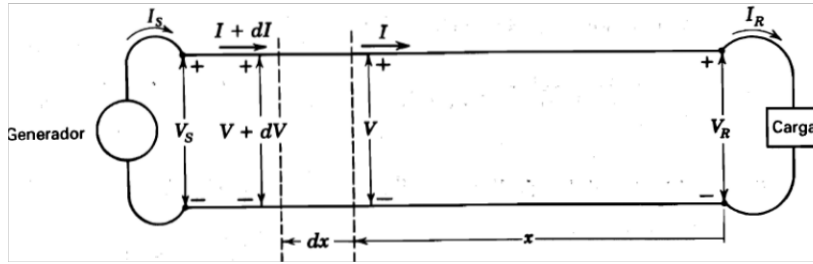
Las ecuaciones resultantes son:

$$V_e = \left( Z * \frac{Y}{2} + 1 \right) * V_r + Z * \left( 1 + \frac{Z*Y}{4} \right) * I_r \quad (1.14)$$

$$I_e = Y * V_r + \left( Z * \frac{Y}{2} + 1 \right) * I_r \quad (1.15)$$

#### 1.4.4.3 Línea larga (>240 km)

Son las que transmiten la energía eléctrica en voltajes de transmisión y grandes distancias y la capacitancia tiene más relevancia por lo que no es depreciable y requiere cálculos rigurosos. [1]



**Figura 1.5.** Representación de línea larga. [6]

Las ecuaciones resultantes son:

$$\begin{pmatrix} V_S \\ I_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma * l) & Z_c * \sinh(\gamma * l) \\ \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_c} & \cosh(\gamma * l) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_R \\ I_R \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

Donde:

$$\gamma = \sqrt{Z * Y} = \sqrt{(R + j * (2 * \pi * f * L)) * (2 * \pi * f * C)} \quad (1.17)$$

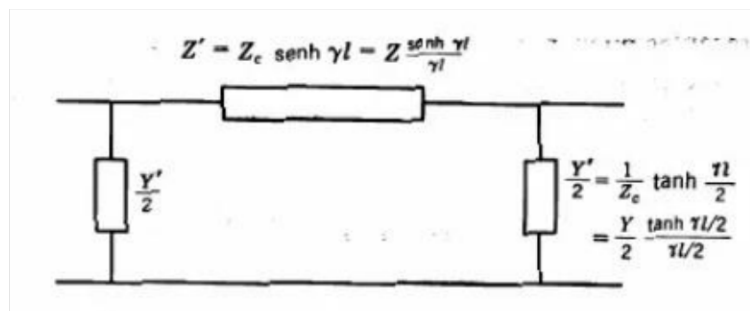
$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j * (2 * \pi * f * L)}{2 * \pi * f * C}} \quad (1.18)$$

Considerando R=0

$$\gamma = \sqrt{(2 * \pi * f * L) * (2 * \pi * f * C)} = 2 * \pi * f * \sqrt{L * C} \quad (1.19)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{2 * \pi * f * L}{2 * \pi * f * C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.20)$$

Para simplificar un poco más, se puede usar el modelo  $\pi$  usando ciertas aproximaciones.



**Figura 1.6.** Representación de línea larga equivalente con el modelo  $\pi$ . [6]

Donde:

$$Z' = Z_c * \sinh(\gamma * l) = Z * \frac{\sinh(\gamma * l)}{\gamma * l} \quad (1.21)$$

$$Y' = \frac{1}{z_c} * \tanh\left(\gamma * \frac{l}{2}\right) = \frac{Y}{2} * \frac{\tanh(\gamma * l/2)}{\gamma * l/2} \quad (1.22)$$

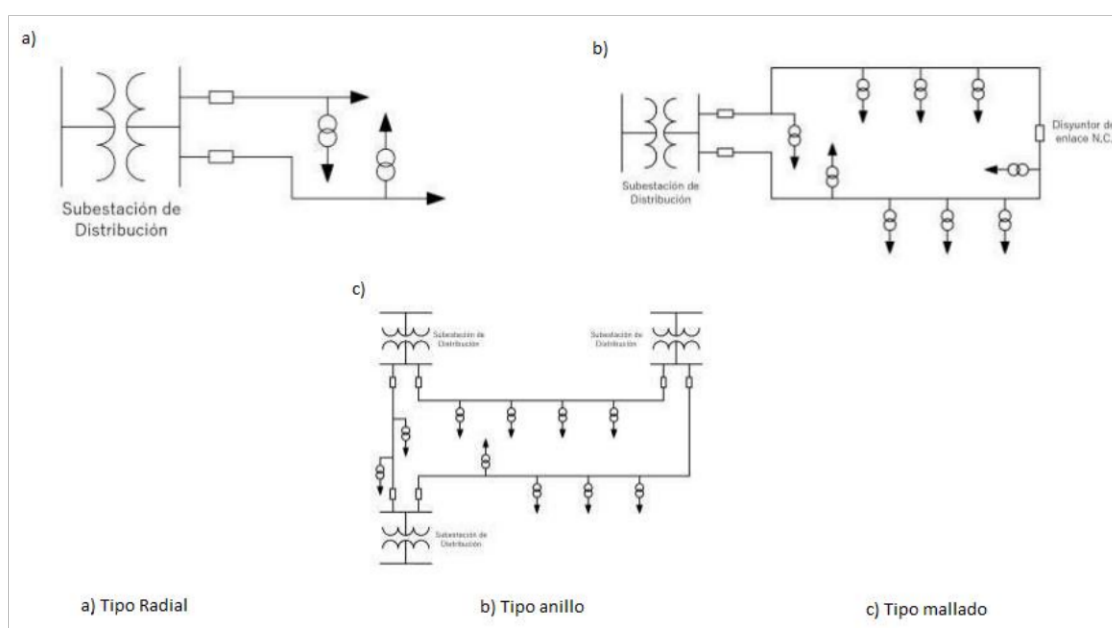
Estas aproximaciones se pueden reemplazar en las ecuaciones (1.12) y (1.13), para calcular con el modelo  $\pi$  de la línea media, los parámetros de la línea larga. [6]

### 1.4.5 TOPOLOGIAS DE REDES PRIMARIAS

La topología de redes es la estructura y la manera en la que están organizados y conectados los circuitos de energía eléctrica, desde la fuente de suministro hasta el consumidor final. [7]

Las topologías básicas para los circuitos primarios son:

- Tipo radial: es el más sencillo y el de menor costo, solo posee un camino para el flujo de potencia. Se usan en zonas de densidad de carga baja, como por ejemplo una zona rural
- Tipo anillo: posee dos trayectorias paralelas desde una misma subestación de distribución y es operado con interruptores de enlace. Es más costoso que sistema radial, pero de mayor confiabilidad
- Tipo mallado: los alimentadores primarios son alimentados por varias subestaciones de distribución y son operados con interruptores de enlace. Son mucho más costosas que las de tipo radial, pero provee mayor calidad y confiabilidad del servicio. Se usan en zonas de densidad de carga alta o muy alta. [7]





**Figura 1.7.** Topologías de redes primarias [7]

#### **1.4.6 SISTEMA POR UNIDAD**

Para poder ver los parámetros del sistema de distribución a una diferente escala, la cual se adapte al emulador construido, se utiliza el sistema por unidad, quien permite representar como una fracción decimal a cualquier parámetro en función de una base adecuadamente escogida. [8]

Parámetros tales como: voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, Potencia total, resistencia, reactancia, impedancia, conductancia, susceptancia y admitancia, son transformables al sistema por unidad mediante la siguiente ecuación

$$\text{Valor en por unidad} = \frac{\text{Valor Real}}{\text{Valor Base}} \quad (1.23)$$

Donde el valor real es aquel valor medido y/o calculado en Voltios, amperios, Vatios, Voltio-Amperios, ohms. Mientras que el valor base es un valor arbitrariamente escogido, en la misma unidad de medida que el valor real. [8]

$$S_{base}, P_{base}, Q_{base} = V_{base} * I_{base}$$

$$Z_{base}, R_{base}, X_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \quad (1.24)$$

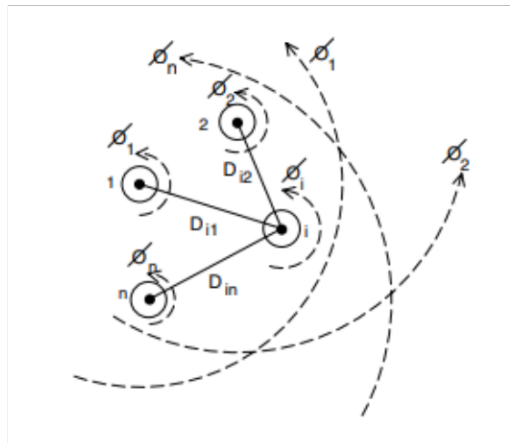
En un sistema en por unidad se escogen arbitrariamente dos parámetros bases, generalmente la potencia total (S) o activa (P) y el voltaje (V), el resto de valores base pueden calcularse mediante a las leyes eléctricas habituales. [8]

#### **1.4.7 IMPEDANCIA SERIE EN LÍNEAS AÉREAS**

La determinación de la impedancia serie para una línea aérea es esencial para poder realizar los análisis necesarios. Esta impedancia en serie consiste en la resistencia del conductor y una inductancia propia y mutua resultantes del campo magnético alrededor del conductor. [9]

La reactancia inductiva se genera debido a los campos magnéticos del conductor, por lo que, a mayor número de conductores, mayor número de campos habrá. Considerando esto

se puede decir que la inductancia mutua y propia de un conductor se debe a la interacción de los campos magnéticos con el resto de conductores cercanos.



**Figura 1.8.** Campos magnéticos en un haz de conductores [9]

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

$$\lambda_i = 2 \cdot 10^{-7} * [I_1 * \ln\left(\frac{1}{D_{i1}}\right) + I_2 * \ln\left(\frac{1}{D_{i2}}\right) + \dots + I_i * \ln\left(\frac{1}{GMR_i}\right) + \dots + I_n * \ln\left(\frac{1}{D_{in}}\right)] \left(\frac{Wb-t}{m}\right) \quad (1.25)$$

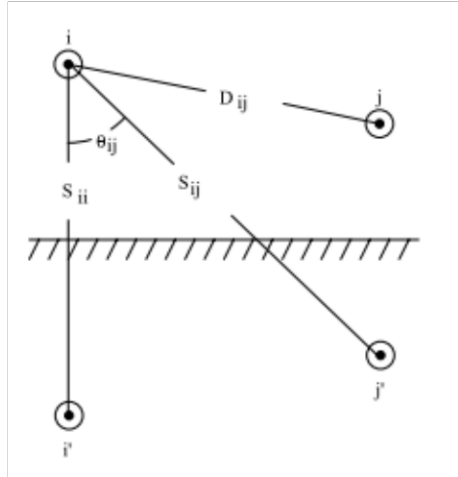
Donde:

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

$GMR_i$ : radio geométrico del conductor i

#### 1.4.7.1 Ecuaciones de Carson

Debido a que un alimentador se encuentra intrínsecamente desequilibrado, es decir se asume que no existe espacio entre conductores, y que no se puede fijar el tamaño de conductor, Jhon R. Carson plantea un método para que las impedancias propias y mutuas de "n" conductores puedan ser determinadas, asumiendo que la tierra es un sólido infinito con resistencia constante y eliminando la frecuencia en altas potencias. Para esto la tierra funciona a manera de espejo y se asume que existen conductores bajo el suya y con la misma distancia sobre o bajo el suelo. [9]



**Figura 1.9.** Conductores e imágenes bajo el suelo [9]

Mediante cálculos matemáticos, se han obtenido las ecuaciones de Carson modificadas.

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.0953 + j * 0.12134 * \left[ \ln \left( \frac{1}{GMR_i} \right) + 7.93402 \right] \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.26)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.0953 + j * 0.12134 * \left[ \ln \left( \frac{1}{D_{ij}} \right) + 7.93402 \right] \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.27)$$

Donde:

$\hat{z}_{ii}$ : Impedancia propia del conductor i en  $\left( \frac{\Omega}{milla} \right)$

$r_i$ : Resistencia del conductor i en  $\left( \frac{\Omega}{milla} \right)$

$GMR_i$ : Radio medio geométrico del conductor i en pies

$\hat{z}_{ij}$ : Impedancia mutua entre los conductores i y j en  $\left( \frac{\Omega}{milla} \right)$

$D_{ij}$ : Distancia entre los conductores i y j en pies. [10]

#### 1.4.7.2 Matriz de impedancia primitiva

Basados en las ecuaciones anteriores (1.26) y (1.27) es posible armar una matriz cuadrada de n conductores. Para el caso de una red aérea de cuatro conductores y conectado a tierra, la matriz resultante será una 4x4. Para una red subterránea conectado a tierra, consta con tres cables concéntricos de neutro, el resultado es una matriz 6x6. La matriz de impedancias primitivas para un sistema trifásico con m neutros tendrá la siguiente forma. [9]

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \vdots & \hat{z}_{an1} & \hat{z}_{an2} & \hat{z}_{anm} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \vdots & \hat{z}_{bn1} & \hat{z}_{bn2} & \hat{z}_{bnm} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \vdots & \hat{z}_{cn1} & \hat{z}_{cn2} & \hat{z}_{cnm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{z}_{n1a} & \hat{z}_{n1b} & \hat{z}_{n1c} & \vdots & \hat{z}_{n1n1} & \hat{z}_{n1n2} & \hat{z}_{n1nm} \\ \hat{z}_{n2a} & \hat{z}_{n2b} & \hat{z}_{n2c} & \vdots & \hat{z}_{n2n1} & \hat{z}_{n2n2} & \hat{z}_{n2nm} \\ \hat{z}_{nma} & \hat{z}_{nmb} & \hat{z}_{nmc} & \vdots & \hat{z}_{nmn1} & \hat{z}_{nmn2} & \hat{z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

### 1.4.7.3 Reducción de Kron

La matriz de impedancias primitiva se debe reducir a una matriz cuadrada 3x3 para poder utilizarla. Esta matriz resultante consiste en el equivalente propio y mutuo de las impedancias de las tres fases. Un método es el de Kron, el cual asume que la línea de neutro tiene múltiples conexiones a tierra y que es un neutro común. [9]

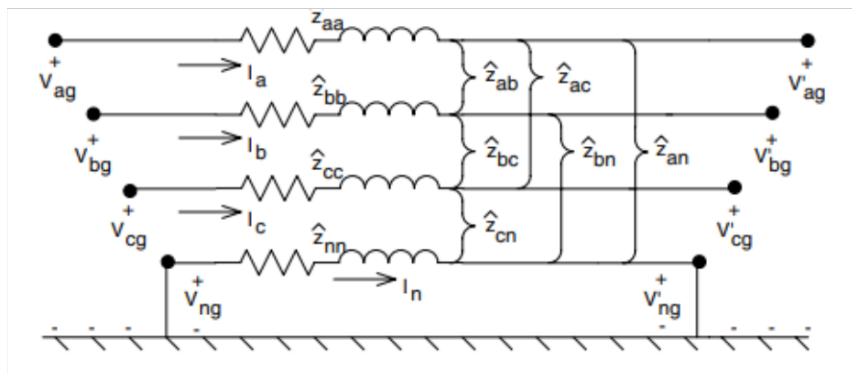


Figura 1.10. Red aérea de 4 hilos con neutro común. [9]

El método de Kron usa las leyes de voltaje de Kirchoff para obtener una ecuación que usa la matriz de impedancias primitiva, con la cual se puede obtener la corriente y caída de voltaje para cierto tramo de la red. [9]

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \hat{z}_{an} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bn} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cn} \\ \hat{z}_{na} & \hat{z}_{nb} & \hat{z}_{nc} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Reduciendo y separando las fases de neutro se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Desarrollando se obtiene:

$$[\hat{Z}_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] * [\hat{Z}_{nn}]^{-1} * [\hat{Z}_{nj}] \quad (1.32)$$

La matriz resultante de la ecuación (1.32) es una matriz cuadrada 3x3 y se conoce como la matriz impedancia por fase. La matriz impedancia por fase se caracteriza de la forma:

$$[\hat{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (1.33)$$

Donde:

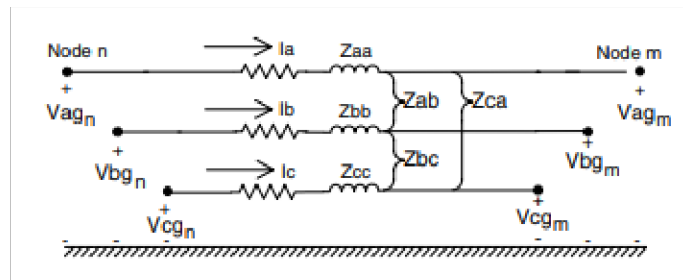
$\hat{Z}_{ii}$ : Impedancia propia del conductor i en  $(\Omega/\text{milla})$

$\hat{Z}_{ij}$ : Impedancia mutua entre el conductor i y j en  $(\Omega/\text{milla})$

Un circuito monofásico puede ser representado únicamente por la impedancia propia de una fase. Por ejemplo, un circuito monofásico con la fase A

$$[\hat{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (1.34)$$

La impedancia propia de la fase A,  $\hat{Z}_{aa}$ , puede ser usada para encontrar caídas de voltajes, siempre y cuando las corrientes sean conocidas. Por facilidad el resto de elementos de la matriz por fase es cero, obteniendo la impedancia de la fase A. al aplicar las ecuaciones de Carson con esta matriz se obtiene un modelado más exacto del segmento de la línea estudiada. [9]



**Figura 1.11.** Red aérea modelada. [9]

Aplicando nuevamente las leyes de voltaje de Kirchoff se encuentra que:

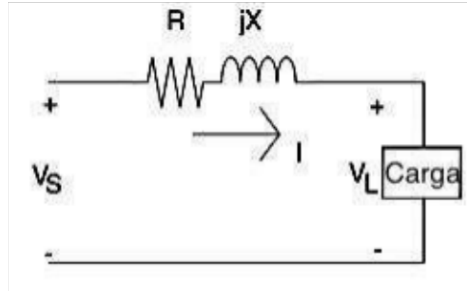
$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Reduciendo y simplificando se obtiene:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [\hat{Z}_{abc}] * [I_{abc}] \quad (1.36)$$

### 1.4.8 CAIDA DE VOLTAJE

Mediante un circuito equivalente línea-neutro de un segmento de una línea trifásica, que suministra energía a una carga trifásica balanceada es mostrada en la Figura 1.12. [9]



**Figura 1.12.** Circuito Equivalente línea-neutro. [9]

La ley de voltaje de Kirchoff al circuito da como resultado:

$$V_s = V_L + (R + j * X_L) * I \quad (1.37)$$

Donde:

$V_s$ : voltaje de la fuente

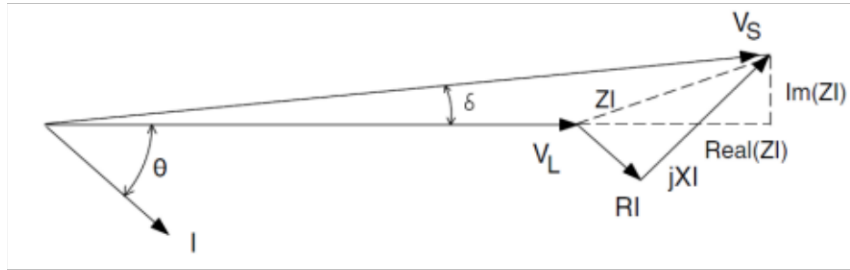
$V_L$ : voltaje de la carga

$R$ : resistencia equivalente por fase

$X_L$ : reactancia inductiva del equivalente línea-neutro

$I$ : corriente que absorbe la carga

Al descomponer la ecuación (1.37) en un diagrama de fasores, se puede observar que el fasor para la caída de voltaje debido a la resistencia es el que multiplica la Resistencia con la corriente ( $RI$ ), mostrando que está en fase con el fasor de la corriente, y el fasor de caída de voltaje debido a la reactancia se adelanta 90 grados en relación al fasor de corriente. Las líneas entrecortas representan las partes reales e imaginarias de la caída de la impedancia. [9]



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

La caída de voltaje en la línea es definida como la diferencia entre las magnitudes de voltaje entre la fuente y la carga. [9]

$$\Delta V = V_{drop} = |V_s| - |V_L| \quad (1.38)$$

Donde:

$\Delta V, V_{drop}$ : caída de voltaje

$V_s$ : voltaje de la fuente

$V_L$ : voltaje de la carga

#### 1.4.8.1 Primera aproximación usando factor K

El ángulo entre los fasores de voltaje de la fuente y el voltaje de la carga ( $\delta$ ) es pequeño. Por esto, la caída de voltaje entre la fuente y la carga es aproximadamente igual a la parte real de la caída de impedancia. La ecuación (1.39) es la que se considera la primera aproximación. [9]

$$\Delta V = V_{drop} \cong Re(Z * I) \quad (1.39)$$

Una aproximación más cercana de la caída de voltaje se da al emplear el factor K de caída de voltaje,  $K_{drop}$ , el cual usa la ecuación anterior y se define de la siguiente manera

$$K_{drop} = \frac{Re(Z * I)}{V_{LN}} * 100 \left[ \frac{\% \text{ caída de voltaje}}{kVA * milla} \right] \quad (1.40)$$

Donde el  $V_{LN}$  es el voltaje línea neutro medido en Voltios.

El factor  $K_{drop}$  puede ser usado para hacer cálculos aproximados de caída de voltaje, para una sección de una línea. De manera que se puede representar la caída de voltaje en esa sección de la línea con la ecuación: [9]

$$V_{drop}[\%] = K_{drop} * kVA * milla \quad (1.41)$$

Donde:

*kVA*: potencia en kVA que es suministrado por el conductor al final de la sección de la línea.

*milla*: distancia en millas de la sección del conductor. [9]

#### 1.4.8.2 Caídas de voltaje normalizadas por la E.E.Q.

El sistema de distribución debe cumplir con ciertos parámetros de calidad de servicio y producto, por lo que se han normado las caídas de voltaje máximo que son permitidas en la red. Los límites de caída de voltaje, dependen de si es un alimentador primario, un circuito secundario o de si existe un cambiador de taps bajo carga en una subestación. [2]

**Tabla 1.1.** Caída Máxima de Voltaje [2]

Componentes del sistema de Distribución	Alimentador	
	Urbano	Rural
	Caída de Voltaje	Caída de Voltaje
Alimentador Primario S/E sin cambiador de taps bajo carga	3,00%	3,50%
Alimentador Primario S/E con cambiador de taps bajo carga	3,50%	4%
Alimentador Secundario	2,50%	3%



## 2 METODOLOGÍA

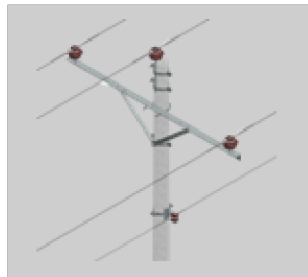
En este capítulo se puede observar ciertas condiciones asumidas para poder realizar los cálculos necesarios y posteriormente obtener los datos para el diseño y construcción del módulo a escala del sistema de distribución de 13.8 kV.

### 2.1 EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO UNA LINEA CORTA

En los sistemas de distribución no existen líneas medias o largas debido a que los alimentadores primarios, en zona urbana, deben estar contruidos con una topología tipo mallado, es decir que los circuitos primarios pueden ser alimentados por varias subestaciones de distribución.

#### 2.1.1 ESTRUCTURAS DE UN ALIMENTADOR PRIMARIO

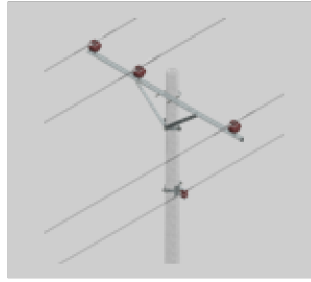
En Ecuador existen varias estructuras para poder colocar un sistema de medio voltaje. Estos tienen normalizados distanciamientos y elementos necesarios para una red eléctrica, ya sea de 22 kV o de 13.8 kV.



**Figura 2.1.** Estructura 3CP [11]

Las estructuras se dividen principalmente en:

- Estructura Monofásica: Existen cerca de 10 estructuras básicas monofásicas.
- Estructura Trifásica: Existen 19 estructuras básicas trifásicas. De las cuales en el presente trabajo de titulación se menciona el 3SP, Estructura trifásica Semicentrada Pasante, y principalmente se usó el 3CP, Estructura trifásica Centrada Pasante. [11]



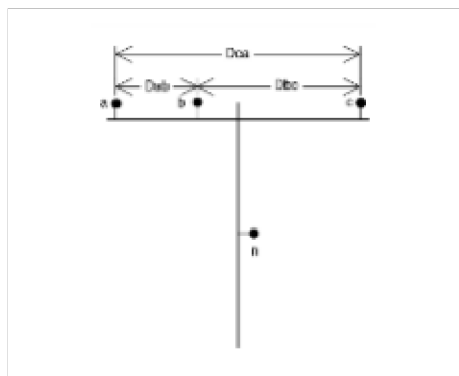
**Figura 2.2.** Estructura 3SP [11]

### 2.1.2 PARÁMETROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA

En el punto 1.4.4.1 se ve el circuito equivalente de una línea corta, así como las fórmulas para el cálculo de corrientes, voltajes e impedancia, las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12 respectivamente.

A su vez las ecuaciones desde la ecuación 1.1 hasta la ecuación 1.9 muestran los cálculos para los parámetros de los conductores. Desde la ecuación 1.1 hasta la 1.3 son para resistencia. Mientras que desde la ecuación 1.4 hasta la 1.6 representan la inductancia. Por último los parámetros de la capacitancia se observan desde la ecuación 1.7 hasta la 1.9, pero estos últimos no se utilizan debido a que en la representación de la línea corta la capacitancia se desprecia.

Sin embargo, para realizar una aproximación cercana a la línea de distribución, se asume que la línea tiene transposición. De esta manera la impedancia de secuencia negativa y cero son despreciables y solo se considera la impedancia de secuencia positiva. Para la representación de la configuración de la línea de distribución trifásica se usa la Figura 2.3. la cual muestra una estructura de configuración semicentrada, y a su vez se define la impedancia de dicha línea. [9]



**Figura 2.3.** Configuración semicentrada de una línea trifásica. [9]

$$Z = R + j * 0.07533 * \ln \left( \frac{D_{eq}}{RMG} \right) \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.1)$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} * D_{bc} * D_{ca}}$$

Donde:

$Z$ : Impedancia de Línea

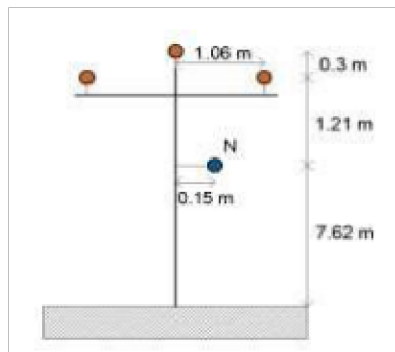
$R$ : Resistencia en ohmios por millas del conductor

$RMG$ : Radio Medio Geométrico

$D_{eq}$ : Distancia equivalente entre conductores [9]

## 2.2 VALORES OBTENIDOS EN FUNCION DE LAS ECUACIONES DE CARSON Y REDUCCION DE KRON

La estructura usada para realizar los cálculos es una Estructura Trifásica Centrada Pasante (3CP), la cual es una de las más comunes para los sistemas de distribución con niveles de voltaje de 13.8 kV. La distribución de longitudes se puede apreciar en la Figura 2.3, mientras que los parámetros del conductor de calibre ACSR 1/0 AWG están presentes en la tabla 2.1.



**Figura 2.3.** Estructura centrada pasante de una línea trifásica. [9] [11]

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

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

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

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

$$D_{bn} = \sqrt{0.1524^2 + (1.2192 + 0.3048)^2} = 1.531601 \text{ m} = 5.0249'$$

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

**Tabla 2.1.** Parámetros de un conductor ACSR 1/0 AWG [9]

Tamaño	Clase	Material	Diámetro [Pulgadas]	GMR [Pies]	Resistencia [ $\Omega$ /milla]	Capacidad [A]
1/0	7/1	ACSR	0.398	0.00446	1.12	230

Aplicando la ecuación de Carson para la impedancia propia, se obtienen los elementos de la diagonal principal de la matriz de impedancia primitiva.

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.0953 + j * 0.12134 * \left[ \ln \left( \frac{1}{GMR_i} \right) + 7.93402 \right] \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.26.)$$

Usando los valores de la tabla 2.1 y haciendo el cálculo de la ecuación anterior para la fase "A":

$$\hat{z}_{aa} = 1.12 + 0.0953 + j * 0.12134 * \left[ \ln \left( \frac{1}{0.00446} \right) + 7.93402 \right] \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\hat{z}_{aa} = 1.2153 + j1.619752 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

Debido a que las tres fases y el neutro tienen el mismo conductor se obtiene que:

$$\hat{z}_{aa} = \hat{z}_{bb} = \hat{z}_{cc} = \hat{z}_{nn} = 1.2153 + j1.619752 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (2.2)$$

De manera similar la ecuación de Carson para impedancia mutua calcula los valores fuera de la diagonal, para la matriz de impedancia primitiva.

$$\hat{z}_{ij} = 0.0953 + j * 0.12134 * \left[ \ln \left( \frac{1}{D_{ij}} \right) + 7.93402 \right] \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \quad (1.27)$$

De esta forma se pasa a calcular todos los elementos fuera de la diagonal, y estos dependen únicamente de la distancia entre los conductores, por lo que se toma de referencia los calculados en el trabajo de titulación previo. [9] [7]

$$\hat{z}_{ab} = 0.0953 + j0.8059 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\hat{z}_{ac} = 0.0953 + j0.7266 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\hat{z}_{an} = 0.0953 + j0.7524 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\hat{z}_{ba} = 0.0953 + j0.8059 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$\begin{aligned}
\hat{z}_{bc} &= 0.0953 + j0.8059 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{bn} &= 0.0953 + j0.7668 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{ca} &= 0.0953 + j0.7266 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{cb} &= 0.0953 + j0.8059 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{cn} &= 0.0953 + j0.7674 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{na} &= 0.0953 + j0.7524 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{nb} &= 0.0953 + j0.7668 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \\
\hat{z}_{nc} &= 0.0953 + j0.7674 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) [7]
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Con los valores calculados se puede obtener la matriz de impedancia primitiva

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.7524 \\ 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7668 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.7674 \\ 0.0953 + j0.7524 & 0.0953 + j0.7668 & 0.0953 + j0.7674 & 1.2153 + j1.6198 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \tag{2.4}$$

Al tener esta matriz se puede usar la reducción de Kron mediante la ecuación (1.32), para así obtener la matriz de impedancia por fases  $[\hat{Z}_{abc}]$ . Para poder realizar el cálculo se divide la matriz primitiva de la manera mencionada en el capítulo anterior y se obtiene:

$$[\hat{Z}_{ij}] = \begin{bmatrix} 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 \\ 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

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

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

$$[\hat{Z}_{nn}] = [1.2153 + j1.6198] \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

$$[\hat{Z}_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] * [\hat{Z}_{nn}]^{-1} * [\hat{Z}_{nj}] \tag{1.32}$$

$$[\hat{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.323741 + j1.357221 & 0.2064097 + j0.538682 & 0.206521 + j0.459187 \\ 0.2064097 + j0.538682 & 1.32914 + j1.347766 & 0.209254 + j0.533715 \\ 0.206521 + j0.459187 & 0.209254 + j0.533715 & 1.329368 + j1.3437368 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \tag{2.5}$$

## 2.3 ESCALAMIENTO DE UNIDADES

Un modelo a escala del sistema de 13.8 kV no se puede medir con los mismos parámetros del sistema original de 13.8 kV, debido a que la red a la que está conectado el módulo del modelo a escala recibe 120V proporcionados por la red. Por lo tanto, para poder hacer las comparaciones necesarias, todo el sistema debe verse en el sistema por unidad. Con esto el fenómeno de la caída de voltaje en el modelo a escala se puede comparar con las caídas de voltaje del sistema real. Las diferencias en las mediciones serán debido a los valor y parámetros reales de los elementos que componen el modelo a escala.

### 2.3.1 BASES DEL SISTEMA USANDO EL SISTEMA P.U.

Para poder obtener los valores en el sistema en por unidad, primero se necesitan de dos bases arbitrariamente escogidas para que faciliten a los cálculos.

Para el sistema de 13.8kV, el cual es el que se tiene en los sistemas eléctricos en la realidad, usaremos las siguientes bases:

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

$$V_{Base\ real} = 13.8\ kV$$

Y haciendo uso de la ecuación (1.24) se obtiene el valor base para el sistema real de 13.8 kV

$$Z_{Base\ real} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \quad (1.24)$$

$$Z_{Base\ real} = \frac{(13.8\ kV)^2}{50\ kVA}$$

$$Z_{Base\ real} = 3808.8\ \Omega \quad (2.6)$$

Para el modelo a escala el cual representa el sistema de medio voltaje las siguientes bases son las escogidas:

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

$$V_{Base\ protoMV} = 120\ V$$

Estos valores base se tomaron debido a que el módulo a escala posee un regulador de voltaje de 120V y la potencia de 50 VA están dentro del rango operativo del mismo regulador de voltaje. [7]

Usando la ecuación (1.24) nuevamente se halla el valor base para el prototipo en el lado que simula el medio voltaje.

$$Z_{Base\ protoMV} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \quad (1.24)$$

$$Z_{Base\ protoMV} = \frac{(13.8\ kV)^2}{50\ kVA}$$

$$Z_{Base\ protoMV} = 288\ \Omega \quad (2.7)$$

### 2.3.2 CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE IMPEDANCIAS

Para poder comparar el sistema real de 13.8 kV con el del modelo a escala se debe considerar que los valores en por unidad de cada sistema deben ser el mismo. Con esto se puede deducir las equivalencias entre los sistemas y así poder relacionarlos.

$$Z_{p.u.\ real} = Z_{p.u.\ protoMV}$$

En función de la ecuación (1.23) se dice que:

$$\frac{Z_{real}}{Z_{Base\ real}} = \frac{Z_{protoMV}}{Z_{Base\ protoMV}}$$

De esta manera se encuentra la relación entre impedancias:

$$Z_{protoMV} = \frac{Z_{Base\ protoMV}}{Z_{Base\ real}} * Z_{real}$$

Aplicando las ecuaciones (2.6) y (2.7) se logra tener la relación entre las impedancias reales del sistema de 13.8 kV con la impedancia del modelo a escala con valores numéricos.

$$Z_{protoMV} = \frac{288}{3808.8} * Z_{real}$$

$$Z_{protoMV} = 0.075614 * Z_{real} \quad (2.8)$$

### 2.3.3 CALCULO DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA PROPIA DEL CONDUCTOR

Para determinar los valores de resistencia e inductancias para el modelo a escala, se toma un valor representativo de la matriz impedancia de fases (ecuación 2.5), considerando que se puede representar un sistema monofásico tomando en cuenta únicamente un valor de la diagonal principal, como lo indica la ecuación (1.34). Se toma como valor representativo el correspondiente al valor de la fase A.

$$Z_{real} = 1.323741 + j1.357221 \left( \frac{\Omega}{milla} \right)$$

De este valor se procede a calcular el equivalente para el modelo a escala, sin embargo, el primer calculo requerido es multiplicar por la distancia asignada, es decir 10 km, para poder tener así los valores de impedancia en ohmios y facilitar los cálculos.

$$Z_{real} = 1.323741 + j1.357221 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) \cdot \frac{1milla}{1609.34m} \cdot 10000m$$

$$Z_{real} = 8.226975 + j8.432028 (\Omega) \quad (2.9)$$

Con este valor, en función a la reactancia inductiva se obtiene el valor de la inductancia L en henrios, usando la ecuación (1.5).

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (1.5)$$

$$8.432028 = 2 * \pi * 60 * L_{real}$$

$$L_{real} = 22.366649 [mH] \quad (2.10)$$

Usando la ecuación (2.8) y (2.9) se encuentra el valor de la impedancia en el modelo a escala.

$$Z_{protoMV} = 0.075614 * (8.226975 + j8.432028)$$

$$Z_{protoMV} = 0.620078 + j0.637582 (\Omega) \quad (2.11)$$

Dado el valor de la reactancia inductiva, se puede calcular el valor de la inductancia L en henrios.

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (1.5)$$

$$0.637582 = 2 * \pi * 60 * L_{protoMV}$$

$$L_{protoMV} = 1.691239 [mH] \quad (2.12)$$

## 2.4 COMPARACIÓN DE CALCULOS CON EL SOFTWARE MATLAB

Mediante el software de simulación MatLab se ha creado un programado usando la herramienta Script, el cual ayuda a calcular los datos anteriormente mencionados y así corroborar la veracidad y exactitud de los cálculos realizados. El programa está presente en el Anexo I. Al obtener valores obtenidos de una simulación se los considera como los valores reales para poder hacer las comparaciones y cálculos de errores.



### 2.4.1 MATRIZ PRIMITIVA CALCULADA

La matriz de impedancias primitiva representada en la ecuación (2.4) y mostrando su contraparte simulada en la figura 2.4.

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.7524 \\ 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.8059 & 0.0953 + j0.7668 \\ 0.0953 + j0.7266 & 0.0953 + j0.8059 & 1.2153 + j1.6198 & 0.0953 + j0.7674 \\ 0.0953 + j0.7524 & 0.0953 + j0.7668 & 0.0953 + j0.7674 & 1.2153 + j1.6198 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.4)$$

```
Zprimitiva =
4x4 single matrix

1.2153000 + 1.6194797i  0.0953000 + 0.8059428i  0.0953000 + 0.7265972i  0.0953000 + 0.7524478i
0.0953000 + 0.8059428i  1.2153000 + 1.6194797i  0.0953000 + 0.8059428i  0.0953000 + 0.7668211i
0.0953000 + 0.7265972i  0.0953000 + 0.8059428i  1.2153000 + 1.6194797i  0.0953000 + 0.7674248i
0.0953000 + 0.7524478i  0.0953000 + 0.7668211i  0.0953000 + 0.7674248i  1.2153000 + 1.6194797i
```

**Figura 2.4.** Matriz de impedancias primitivas obtenidas del software MatLab.

Para evaluar la exactitud de los cálculos originales se han tomado 7 valores, los cuales son: uno de la diagonal principal y seis fuera de esta, estos 6 valores representan la totalidad de la matriz debido a la simetría de la matriz de impedancias primitiva.

**Tabla 2.2.** Errores porcentuales de la matriz impedancia primitiva.

Matriz de impedancias Primitiva						
	R simulado	R calculado	Error [%]	Xl simulado	Xl calculado	Error [%]
Valores de la Diagonal Principal	1,2153	1,2153	0	1,6194797	1,6198	0,01977796
Valores Fuera de la Diagonal Principal	0,0953	0,0953	0	0,8059428	0,8059	0,00531055
	0,0953	0,0953	0	0,7265972	0,7266	0,00038536
	0,0953	0,0953	0	0,7524478	0,7524	0,0063526
	0,0953	0,0953	0	0,8059428	0,8059	0,00531055
	0,0953	0,0953	0	0,7668211	0,7668	0,00275162
	0,0953	0,0953	0	0,7674248	0,7674	0,00323159

Los elementos de la matriz impedancia primitiva muestran un error menos al 0.02% por lo cual se puede aseverar de que los datos calculados son muy cercanos a los simulados.

### 2.4.2 MATRIZ IMPEDANCIA DE FASES CALCULADA

La matriz de impedancias de fases está representada en la ecuación (2.5), el valor obtenido en la simulación de MatLab se puede apreciar en la figura 2.5.

$$[\hat{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.323741 + j1.357221 & 0.2064097 + j0.538682 & 0.206521 + j0.459187 \\ 0.2064097 + j0.538682 & 1.32914 + j1.347766 & 0.209254 + j0.533715 \\ 0.206521 + j0.459187 & 0.209254 + j0.533715 & 1.329368 + j1.3437368 \end{bmatrix} \left( \frac{\Omega}{\text{milla}} \right) \quad (2.5)$$

```
Zabc =
3x3 single matrix

1.3237913 + 1.3568977i 0.2064562 + 0.5386825i 0.2065681 + 0.4591404i
0.2064562 + 0.5386825i 1.3291824 + 1.3474594i 0.2092968 + 0.5337226i
0.2065681 + 0.4591404i 0.2092968 + 0.5337226i 1.3294115 + 1.3470594i
```

**Figura 2.5.** Matriz de impedancias de fases obtenidas del software MatLab.

Para la evaluación de los elementos, se toma toda la matriz principal y solamente tres valores de los elementos fuera de la diagonal principal, debido a que la matriz impedancia de fases es una matriz simétrica, por lo que al evaluar tres valores fuera de la diagonal se han comparado todos los elementos fuera de la diagonal.

**Tabla 2.3.** Errores porcentuales de la matriz impedancia de fases.

Matriz de impedancias de Fases						
	R simulado	R calculado	Error [%]	Xl simulado	Xl calculado	Error [%]
Valores de la Diagonal Principal	1,3237913	1,323741	0,00379969	1,3568977	1,357221	0,02382641
	1,3291824	1,32914	0,00318993	1,3474594	1,347766	0,02275393
	1,3294115	1,329368	0,00327212	1,3470594	1,3437368	0,24665579
Valores Fuera de la Diagonal Principal	0,2064562	0,2064097	0,02252294	0,5386825	0,538682	9,2819E-05
	0,2065681	0,206521	0,0228012	0,4591404	0,459187	0,0101494
	0,2092968	0,209254	0,02044943	0,5337226	0,533715	0,00142396

Los elementos calculados para la matriz de impedancia de fases poseen un error menor al 0.3%, lo cual muestra que los datos calculados se pueden considerar de gran exactitud y por ello se los puede usar para simulaciones siguientes o para la construcción física de los elementos.

### 2.4.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA LÍNEA

Los parámetros eléctricos de la línea son la resistencia (R) y la inductancia (L), los cuales han sido calculados mediante las ecuaciones (1.5) para el caso de la inductancia, mientras que para la resistencia se toma en función de la impedancia debido a que la resistencia es la parte real de la impedancia.

$$Z = R + j * (X_L + X_C)$$

$$R = Re(Z) \tag{2.13}$$

### 2.4.3.1 Sistema de 13.8 kV con el conductor ACSR 1/0 AWG

Los parámetros eléctricos correspondientes al sistema de 13.8 kV son obtenidos de las ecuaciones (2.9) y (2.10) para la resistencia e inductancia, respectivamente. Estos valores son importantes de corroborar para poder verificar la caída de voltaje que se presenta en el sistema mediante una simulación siguiente.

$$Z_{real} = 8.226975 + j8.432028 (\Omega) \tag{2.9}$$

```
Rreal =
8.225677796463609
```

**Figura 2.6.** Valor de la resistencia para el sistema de 13.8 kV obtenidas del software MatLab.

$$L_{real} = 22.366649 [mH] \tag{2.10}$$

```
Lreal =
22.364962454028117
```

**Figura 2.7.** Valor de la inductancia para el sistema de 13.8 kV obtenidas del software MatLab.

**Tabla 2.4.** Errores porcentuales de los parámetros eléctricos para el sistema de 13.8kV.

Parámetros reales del sistema de 13,8 kV		
R simulado [Ω]	R calculado [Ω]	Error [%]
8,225677796	8,226975	0,015770172
L simulado [mH]	L calculado [mH]	Error [%]
22,36496245	22,366649	0,007541019

El error porcentual es menor al 0.02% por lo que los valores calculados muestran una gran exactitud y se pueden usar para el modelado de simulaciones.

### 2.4.3.2 Módulo a escala para conductor ACSR 1/0 AWG

Los parámetros eléctricos correspondientes al módulo a escala para el sistema de 13.8 kV son obtenidos de las ecuaciones (2.11) y (2.13) para la resistencia y de la ecuación (2.12) para la inductancia. Estos valores serán los que se usarán en el modelamiento de una simulación posterior para poder verificar la caída de voltaje y que, en sistema por unidad, sea el mismo del sistema real de 13.8kV.

$$Z_{protoMV} = 0.620078 + j0.637582 (\Omega) \quad (2.11)$$

```
RprotoMV =
0.621979417501974
```

**Figura 2.8.** Valor de la resistencia para el modelo a escala del sistema de 13.8 kV obtenidas del software MatLab.

$$L_{protoMV} = 1.691239 [mH] \quad (2.12)$$

```
LprotoMV =
1.691112472894375
```

**Figura 2.9.** Valor de la inductancia para el modelo a escala del sistema de 13.8 kV obtenidas del software MatLab.

**Tabla 2.5.** Errores porcentuales de los parámetros eléctricos para el módulo a escala del sistema de 13.8kV.

Parámetros para el módulo a escala del sistema de 13,8 kV		
R simulado [Ω]	R calculado [Ω]	Error [%]
0,621979418	0,620078	0,305704248
L simulado [mH]	L calculado [mH]	Error [%]
1,691112473	1,691239	0,007481886

El error porcentual es menor al 0.4% por lo que los valores calculados muestran una buena exactitud y se pueden usar para el modelado de simulaciones y para la construcción física de los elementos para el modelo físico.

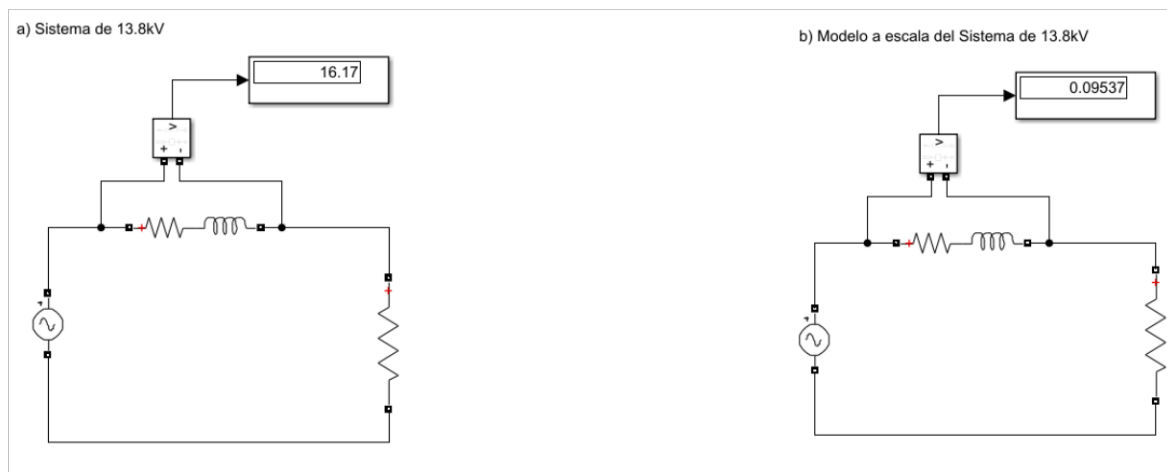
## 2.4.4 CAÍDAS DE VOLTAJE EN FUNCIÓN A LOS PARÁMETROS CALCULADOS

En la figura 1.12 se muestra el circuito equivalente para el cálculo de caída de voltajes, en el sistema estudiado, el voltaje de entrada es el que provee la subestación de distribución, y la carga será representada por un equivalente el cual considera, el transformador de distribución, el circuito secundario y la carga del consumidor final.

Para poder observar las caídas de voltaje se usó la herramienta Simulink de MatLab, el cual permite hacer una programación gráfica y así poder ver los resultados de caídas de voltaje. Los parámetros eléctricos usados son los obtenidos y dados en las ecuaciones (2.9) y (2.10) para el sistema real de 13.8 kV, mientras que los parámetros para el modelo a escala son los de las ecuaciones (2.11) y (2.12).

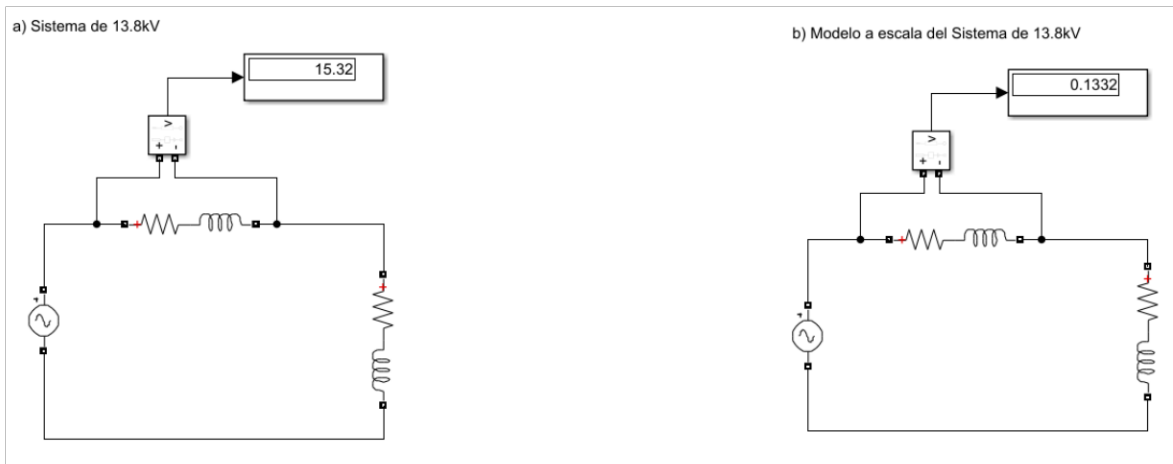
Los valores de las fuentes y cargas para la simulación están detallados en el Anexo II.

Para verificar de manera más eficiente los valores de la caída de voltaje se ha usado dos circuitos, el primero considerando que la carga es netamente resistiva como se muestra en la figura 2.10. y el segundo circuito ya siendo más realistas una carga RL como se ve en la figura 2.11.



**Figura 2.10.** Valores de caída de voltaje con carga resistiva para el sistema de 13.8 kV y su modelo a escala

El modelo de carga RL representa las inductancias que existen en el conductor del circuito secundario, el transformador y en la carga del usuario final



**Figura 2.10.** Valores de caída de voltaje con carga RL para el sistema de 13.8 kV y su modelo a escala.

En la tabla 2.6 se puede apreciar los resultados dados de la simulación y en sistema por unidad se puede apreciar que la diferencia entre los valores

**Tabla 2.6.** Caídas de voltaje simuladas en V y en p.u.

Caída de voltaje Simulada				
	Sistema de 13,8 kV		Modelo a escala	
	Voltaje [V]	Voltaje [pu]	Voltaje [V]	Voltaje [pu]
Carga Resistiva	16,17	0,00117174	0,9537	0,0079475
Carga RL	15,32	0,00111014	0,1332	0,00111

Se puede apreciar que la diferencia con carga resistiva y RL es considerable, por lo que todo sistema simulado debe ser considerado con carga RL

## 2.5 MODELADO EN SOFTWARE CYME

Mediante el software de simulación CYMDIST de CYME se modela el sistema de 13.8 kV sujeto a los parámetros de eléctricos y estructurales que se pueden encontrar en la realidad, por lo que al emular los elementos que se encuentran en la vida real, se puede obtener varios valores para comparar con el modelo a escala que se encuentra físicamente en el laboratorio de máquinas eléctricas de la EPN.

El modelo a escala existente está compuesto por una acometida de alimentador primario para 13.8 kV con un conductor de calibre ACSR 2 AWG para varias longitudes, un transformador reductor de 13.8 kV a 220 V y varios circuitos secundarios, quienes poseen diferentes tipos de calibres o distancias para poder emular el sistema de distribución con



mayor eficiencia y una carga que representa al usuario final. Siendo un conductor de calibre ACSR 1/0 AWG con una distancia de diez kilómetros en el alimentador primario el usado para la expansión del modelo a escala, el cual será usado en vez del conductor ACSR 2 AWG del modelo a escala original. Por lo que el sistema se puede representar como muestra la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Sistema de distribución de 13.8 kV simulado en CYME

Para obtener los parámetros que se encuentran en el A/P se procede a realizar la simulación del sistema en CYMDIST. Con esto se logra encontrar las caídas de voltaje y las corrientes que se encuentran en el A/P y el C/S y la matriz impedancia por fases. En el caso de las caídas de voltaje obtenidos de la simulación serán las comparadas con el modelo físico implementado. El procedimiento para obtener estos resultados se describe en el Anexo III.

El valor de la matriz de impedancia para el alimentador primario con un conductor ACSR 1/0 AWG obtenido mediante la simulación en el software CYMDIST se muestra en la Figura 2.12.

	A	B	C	
Z [ABC] =	1,324 + j1,357	0,2074 + j0,5105	0,2074 + j0,5105	Ohmios/mi
	0,2074 + j0,5105	1,329 + j1,347	0,2074 + j0,5105	
	0,2074 + j0,5105	0,2074 + j0,5105	1,329 + j1,347	

**Figura 2.12.** Matriz impedancia de fase para alimentador primario con conductor ACSR 1/0 obtenido de CYMDIST.

En la Figura 2.5 y en la ecuación (2.5) se puede verificar que la matriz obtenida con el programa de simulación CYME es igual de exacta pero la visualización de la matriz tiene menor precisión debido a que solo muestra tres decimal en comparación a la obtenida con MatLab.

La tabla de los resultados obtenidos en la simulación de CYME se encuentran en el Anexo IV.

## 2.6 VALORES DE PARÁMETROS PARA PRIMERA APROXIMACIÓN DE CAÍDA DE VOLTAJE.

Usando la ecuación (1.39) la cual es la primera aproximación de la caída de voltaje y usando el parámetro de la Tabla 2.1 para la resistencia que está dada en  $\Omega$ /milla se puede deducir que:

$$\Delta V = V_{drop} \cong Re(Z * I) \quad (1.39)$$

$$\Delta V = V_{drop} \cong R * I$$

$$\Delta V = V_{drop} \cong 1.12 \left( \frac{\Omega}{milla} \right) * I (A) * \frac{1 \text{ milla}}{1.609344 \text{ km}} * 10 \text{ km}$$

$$\Delta V = V_{drop} \cong 6.959357 * I \quad (2.14)$$

Con esta ecuación en función de la corriente medida en el A/P. Con las corrientes obtenidas de la simulación de CYME y que están presente en el Anexo IV, es posible calcular la primera aproximación de caída de voltaje para todos los casos.

**Tabla 2.7.** Valores de caída de voltaje según la primera aproximación

No	Caso	I_CYME_primario [A]	Resistencia [ $\Omega$ ]	$\Delta V_{Pri\_1ra}$ Aproximación [V]
1	PA10Km_S4-0_150m	0,3281	6,959357	2,283365032
2	PA10Km_S4-0_200m	0,3279	6,959357	2,28197316
3	PA10Km_S4-0_250m	0,327961	6,959357	2,282397681
4	PA10Km_S4-0_300m	0,3279	6,959357	2,28197316
5	PA10Km_S3-0_150m	0,3283	6,959357	2,284756903
6	PA10Km_S3-0_200m	0,3284	6,959357	2,285452839
7	PA10Km_S3-0_250m	0,3283	6,959357	2,284756903
8	PA10Km_S3-0_300m	0,3285	6,959357	2,286148775
9	PA10Km_S2-0_150m	0,3286	6,959357	2,28684471
10	PA10Km_S2-0_200m	0,3288	6,959357	2,288236582
11	PA10Km_S2-0_250m	0,3291	6,959357	2,290324389
12	PA10Km_S2-0_300m	0,32944	6,959357	2,29269057
13	PA10Km_S#2_150m	0,3306	6,959357	2,300763424
14	PA10Km_S#2_200m	0,3316	6,959357	2,307722781
15	PA10Km_S#2_250m	0,3326	6,959357	2,314682138
16	PA10Km_S#2_300m	0,3337	6,959357	2,322337431



Con la Tabla 2.7 se puede apreciar que la caída de voltaje en el A/P no varía mucho, debido a que el menor de los valores obtenidos es de 2.28197 V, mientras que el valor que presenta mayor voltaje es de 2.32234 V, por lo cual se deduce que las variaciones obtenidas son por el cambio de conductores y las distancias del mismo en el C/S.

## 2.7 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS

El alimentador primario construido que sirve para la emulación del sistema de distribución de 13.8 kV con un conductor de 10 km de calibre ACSR 1/0 AWG posee los parámetros eléctricos de resistencia e inductancia, ya que por su corta distancia se lo considera una línea corta.

### 2.7.1 CONSTRUCCIÓN DE RESISTENCIAS, INDUCTANCIAS Y PLACAS

La resistencia e inductancia se construyeron en función a de la tabla 2.5 en la cual se muestra tanto los valores calculados, como los valores simulados. Considerando que los elementos estar conectados a la red, deben ser capaces de soportar una gran potencia, por lo que se utilizó elementos con 100W de potencia máxima.

Las placas utilizadas para la emulación del alimentador primario utilizan borneras para colocar los valores de resistencia e inductancia construidos. Como se ha mencionado, el sistema al ser una línea corta se requiere que la inductancia y la resistencia estén conectadas en serie.



**Figura 2.13.** Placa instalada con la resistencia e inductancia construidas.

### 2.7.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO

Dado que el módulo nuevo es la extensión de otro, aumentando más circuitos en el lado de medio voltaje, se realizó un tablero para que la manipulación de los A/P sea de manera más sencilla y cómoda para el usuario que lo utiliza. Para la elaboración del tablero, se uso un modelo de madera, el cual combina con el modelo de tablero previo.



**Figura 2.14.** Modelo de la mesa para la instalación del tablero

Finalmente, al modelo de madera se le realizó las modificaciones pertinentes para poder tener el tablero finalizado donde se podrá manipular para poder hacer las conexiones necesarias en los alimentadores primarios.

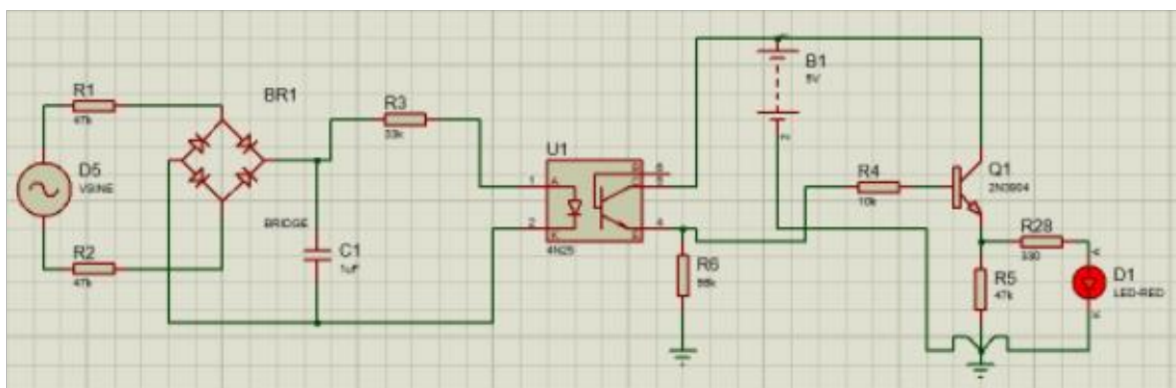


**Figura 2.15.** Montaje del tablero para A/P

### 2.7.3 SISTEMA DE IDENTIFICADOR DE CASOS

El presente trabajo es uno de los cuatro componentes a realizar en la ampliación del emulador con A/P, por lo que se requiere un sistema que determine el caso de A/P se encuentra conectado el módulo en el momento de estar energizar.

El circuito identificador de casos está conectado en paralelo al arreglo serie de resistencia e inductor. El sistema identificador una vez que identifica el caso en uso, prende una luz piloto que se ubica a lado de cada caso, mostrando así el caso utilizado.



**Figura 2.16** Circuito esquemático de detección de casos en PROTEUS

El circuito de la figura 2.16 muestra la construcción en ISIS de PROTEUS y como se observa se aísla la parte DC con un optoacoplador el cual en la figura es mostrada como el componente U1.

En el Anexo IV se puede visualizar el modelo en ARES del software PROTEUS para el diseño de la placa y de la misma manera se puede visualizar un modelo 3D de la placa terminada.

### 2.7.4 MEDICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE.

Usando el voltímetro inalámbrico existente en el modelo a escala de 13.8 kV se conecta en los dos puntos necesarios para la medición de voltaje y mediante una interfaz que es visible en cualquier dispositivo con conexión wifi, se podrá encontrar los datos censados en ese instante.



Figura 2.17. Visualización de mediciones en MV.

Como se muestra en la figura 2.17 en la interfaz se muestra el caso en el que se encuentra el sistema, tanto para el A/P como para los C/S, los distanciamientos de los conductores en el lado de medio y bajo voltaje. De la misma manera se puede observar que en la parte izquierda de la interfaz se encuentran los valores que se obtuvieron en la simulación tanto para el lado del A/P como para el C/S. En el lado derecho se puede ver que también existen valores para los alimentadores primarios y circuito secundarios, sin embargo, los valores que se presentaran en esta zona de la interfaz son referentes a lo censado por el voltímetro inalámbrico.

# 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 3.1 RESULTADOS

### 3.1.1 PARAMETROS ELECTRICOS DEL SISTEMA A ESCALA CON CABLE ACSR 1/0 AWG

Usando los valores de resistencia e inductancia calculados y simulados para corroborar la veracidad y la exactitud mostrados en el capítulo anterior, se procedió a la construcción y montaje del circuito en serie y debido a que son parámetros con valores de más de cuatro decimales, la construcción se obtuvieron valores lo más cercanos posibles, por lo que los parámetros reales constructivos difieren de lo calculado y lo simulado. La tabla 3.1 muestra los valores teóricos considerando la simulación en MatLab con cuatro decimales como lo real, los valores obtenidos de la construcción de los elementos que representan a la línea de A/P con un cable ACSR 1/0 AWG y con una distancia total de 10 km para el modelo a escala y el error porcentual existente.

Los errores porcentuales se calculan con la ecuación:

$$E_{\%} = \frac{|V_{teorico} - V_{experimental}|}{V_{teorico}} * 100 \quad (3.1)$$

Donde:

$E_{\%}$ : error porcentual.

$V_{teorico}$ : valor teórico considerado como verdad, valor obtenido mediante simulación.

$V_{experimental}$ : valor obtenido mediante cálculos o construcción. [13]

**Tabla 3.1.** Resultados de medición de los parámetros eléctricos en el A/P

Alimentador Primario			
	Teórico	Experimental	Error [%]
Resistencia [Ω]	0,6220	0,6185	0,56
Inductancia [mH]	1,6911	1,7614	4,16

Es posible observar que los valores obtenidos experimentalmente en la construcción de los elementos no superan un valor del cinco por ciento de error por lo que se los puede

considerar óptimos para poder representar el sistema de 13.8 kV en el sistema a escala. La inductancia muestra un mayor error que la resistencia, por lo que se puede definir que en el caso de calcular la potencia aparente el error presente se puede deber principalmente a la acumulación de errores debido a que la potencia reactiva presentará mayor error que la activa.

Los resultados obtenidos mediante el módulo a escala se presentan en el Anexo V, y en el presente capítulo se usaron los valores de dicho anexo, y del Anexo IV para poder realizar las comparaciones necesarias.

### 3.1.2 PÉRDIDAS EN EL CONDUCTOR POR EFECTO JOULE

El efecto Joule expresa la relación entre las pérdidas generadas a manera de calor y la corriente eléctrica que circula por un conductor en un determinado tiempo. La resistencia propia del conductor es quien está relacionado con el calor por lo que el efecto Joule se lo define como en la ecuación (3.2). [12]

$$P = I^2 * R \quad (3.2)$$

Donde: la potencia disipada por el efecto Joule es P, la corriente eléctrica es I y la resistencia del conductor es R.

Mediante la Ley de Ohm definida en la ecuación (3.3) se puede relacionar el voltaje (V), la resistencia y la corriente eléctrica.

$$V = R * I \quad (3.3)$$

Despejando y reemplazando en la ecuación (3.1) se obtiene:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.4)$$

Con esta fórmula se puede encontrar las pérdidas que el presenta el alimentador primario experimental, ya que al tener la caída de voltaje presente en el conductor obtenido en el sistema por unidad y multiplicarlo por la base para el prototipo en Medio voltaje que es de 120 V, y la resistencia construida, es posible calcular las pérdidas en vatios para cada escenario.

**Tabla 3.2.** Cálculo de Potencia disipada en el A/P del modelo a escala

No	Caso	Resistencia [Ω]	Voltaje Obtenido [p.u.]	Voltaje Obtenido [V]	Perdidas [W]
1	PA10Km_S4-0_150m	0,6185	0,00017375	0,02085	0,00070287



2	PA10Km_S4-0_200m	0,6185	0,00017869	0,0214428	0,0007434
3	PA10Km_S4-0_250m	0,6185	0,00018108	0,0217296	0,00076342
4	PA10Km_S4-0_300m	0,6185	0,00018571	0,0222852	0,00080296
5	PA10Km_S3-0_150m	0,6185	0,00018128	0,0217536	0,00076511
6	PA10Km_S3-0_200m	0,6185	0,00017821	0,0213852	0,00073941
7	PA10Km_S3-0_250m	0,6185	0,00017836	0,0214032	0,00074066
8	PA10Km_S3-0_300m	0,6185	0,0001872	0,022464	0,0008159
9	PA10Km_S2-0_150m	0,6185	0,0001741	0,020892	0,0007057
10	PA10Km_S2-0_200m	0,6185	0,00017676	0,0212112	0,00072743
11	PA10Km_S2-0_250m	0,6185	0,00018671	0,0224052	0,00081163
12	PA10Km_S2-0_300m	0,6185	0,00018627	0,0223524	0,00080781
13	PA10Km_S#2_150m	0,6185	0,00017809	0,0213708	0,00073842
14	PA10Km_S#2_200m	0,6185	0,00018031	0,0216372	0,00075694
15	PA10Km_S#2_250m	0,6185	0,00017948	0,0215376	0,00074999
16	PA10Km_S#2_300m	0,6185	0,00018293	0,0219516	0,0007791

Con esto se observa que la potencia disipada a manera de calor es relativamente baja, sin embargo, si el módulo llegase a trabajar en un régimen de largos periodos de tiempo, la potencia aumentaría proporcionalmente, y considerando que el modelo trabaja con el prototipo que contienen los C/S, las pérdidas se irían acumulando.

### 3.1.3 MEDICION DE CORRIENTE.

En la interfaz muestra los valores en por unidad de los resultados tanto de voltaje como de corriente. Con esto y con los datos de la simulación se puede encontrar los errores porcentuales para los parámetros eléctricos obtenidos.

El alimentador primario se mantiene fijo, mientras que el C/S varía entre 16 casos, por lo que los datos tomados en la tabla 3.3 son los obtenidos en la medición en el lado de medio voltaje y variando el C/S entre los 16 casos mencionados.

**Tabla 3.3** Error porcentual de la corriente obtenida del modelo a escala del A/P.

No	Caso	Primario		
		lp.u_primario	Corriente p.u Obtenido	Error [%]
1	PA10Km_S4-0_150m	0,156835564	0,1572093	0,23829799
2	PA10Km_S4-0_200m	0,156739962	0,15694237	0,12913618
3	PA10Km_S4-0_250m	0,156769120	0,15676313	0,00382091
4	PA10Km_S4-0_300m	0,156739962	0,15677813	0,02435116
5	PA10Km_S3-0_150m	0,156931166	0,15654229	0,24780036
6	PA10Km_S3-0_200m	0,156978967	0,15669388	0,18160841
7	PA10Km_S3-0_250m	0,156931166	0,15712857	0,12579018
8	PA10Km_S3-0_300m	0,157026769	0,15740018	0,23780086

9	PA10Km_S2-0_150m	0,157074570	0,15657835	0,31591365
10	PA10Km_S2-0_200m	0,157170172	0,15703192	0,08796326
11	PA10Km_S2-0_250m	0,157313576	0,15735736	0,02783231
12	PA10Km_S2-0_300m	0,157476099	0,15709932	0,23926107
13	PA10Km_S#2_150m	0,158030593	0,15804416	0,00858505
14	PA10Km_S#2_200m	0,158508604	0,15886792	0,22668549
15	PA10Km_S#2_250m	0,158986616	0,15902418	0,02362715
16	PA10Km_S#2_300m	0,159512428	0,15966105	0,09317268

Las corrientes simuladas y obtenidas muestran una gran semejanza en el lado de medio voltaje, debido a que el mayor error porcentual obtenido es del 0.32% por lo que es posible deducir que el modelo a escala simula con gran exactitud el sistema de 13.8 kV en lo referente a las corrientes.

Para la tabla 3.4 se han tomado las medidas de corriente en cada uno de los 16 casos de C/S.

**Tabla 3.4** Error porcentual de la corriente obtenida del del modelo a escala del C/S

		Secundario		
No	Caso	Ip.u_secundario	Corriente p.u Obtenido	Error [%]
1	PA10Km_S4-0_150m	0,1279462870	0,12785071	0,07470088
2	PA10Km_S4-0_200m	0,1283395320	0,12842358	0,06548878
3	PA10Km_S4-0_250m	0,1287495430	0,12876502	0,01202101
4	PA10Km_S4-0_300m	0,1291610780	0,1294285	0,20704535
5	PA10Km_S3-0_150m	0,1218152055	0,12818901	5,23235541
6	PA10Km_S3-0_200m	0,1286344650	0,12862931	0,00400748
7	PA10Km_S3-0_250m	0,1291199240	0,12925865	0,10743965
8	PA10Km_S3-0_300m	0,1297326550	0,12952223	0,16219895
9	PA10Km_S2-0_150m	0,1284264110	0,12842018	0,00485181
10	PA10Km_S2-0_200m	0,1290033230	0,12901773	0,01116793
11	PA10Km_S2-0_250m	0,1295855690	0,12971178	0,09739588
12	PA10Km_S2-0_300m	0,1303324290	0,13038812	0,04272996
13	PA10Km_S#2_150m	0,1295878550	0,12987358	0,22048748
14	PA10Km_S#2_200m	0,1307386290	0,1309508	0,16228639
15	PA10Km_S#2_250m	0,1318253870	0,13203227	0,15693715
16	PA10Km_S#2_300m	0,1329106210	0,13275319	0,11844877

Los errores porcentuales en los circuitos secundarios, a excepción del caso 5, muestran una gran exactitud, ya que presentan errores menores al 0.25% por lo que se puede decir que el modelo a escala representa de manera precisa al sistema de 13.8kV en los circuitos de bajo voltaje o C/S. Para el caso 5 en el que es el único error con más del 5% puede



deberse a un error constructivo ya que puede que hayan aparecido corrientes de Foucault en los momentos de la toma de medida.

### 3.1.3.1 Primera aproximación de caída de voltaje

En la tabla 2.7 se encontró los valores de caída de voltaje mediante los valores de las simulaciones, por lo que obtenidos los valores de corrientes reales que fueron censados por el modelo a escala, es posible encontrar la caída de voltaje mediante la primera aproximación.

En la ecuación (2.14) se puede encontrar la relación para encontrar la caída de voltaje en el sistema de 13.8 kV por lo que se requerirá hacer una leve modificación para poder calcular todo en el sistema por unidad en el que se trabajó.

$$\Delta V = V_{drop} \cong 6.959357 * I \quad (2.14)$$

$$\Delta V = V_{drop} \cong 6.959357 \cdot \frac{1}{3808.8} * I_{pu}$$

$$\Delta V = V_{drop} \cong 0.00182718 * I_{pu} [p.u.] \quad (3.5)$$

Con este valor se puede encontrar la primera aproximación de caída de voltaje, el cálculo se obtendrá en el sistema p.u. y para poder comparar con el sistema de 13.8 kV se lo multiplica por el voltaje base para el lado de medio voltaje, es decir por 13800 Voltios.

**Tabla 3.5** Error porcentual de la corriente obtenida del del modelo a escala del C/S

No	Caso	Corriente p.u. Obtenido	Resistencia [p.u.]	1ra aprox obtenida [p.u.]	1ra aprox obtenida [V]
1	PA10Km_S4-0_150m	0,12785071	0,00182718	0,00023361	3,22376353
2	PA10Km_S4-0_200m	0,12842358	0,00182718	0,00023465	3,23820848
3	PA10Km_S4-0_250m	0,12876502	0,00182718	0,00023528	3,24681791
4	PA10Km_S4-0_300m	0,1294285	0,00182718	0,00023649	3,2635476
5	PA10Km_S3-0_150m	0,12818901	0,00182718	0,00023422	3,23229378
6	PA10Km_S3-0_200m	0,12862931	0,00182718	0,00023503	3,24339597
7	PA10Km_S3-0_250m	0,12925865	0,00182718	0,00023618	3,25926482
8	PA10Km_S3-0_300m	0,12952223	0,00182718	0,00023666	3,26591101
9	PA10Km_S2-0_150m	0,12842018	0,00182718	0,00023465	3,23812275
10	PA10Km_S2-0_200m	0,12901773	0,00182718	0,00023574	3,25319001
11	PA10Km_S2-0_250m	0,12971178	0,00182718	0,00023701	3,27069052
12	PA10Km_S2-0_300m	0,13038812	0,00182718	0,00023824	3,28774448
13	PA10Km_S#2_150m	0,12987358	0,00182718	0,0002373	3,27477032
14	PA10Km_S#2_200m	0,1309508	0,00182718	0,00023927	3,30193249

15	PA10Km_S#2_250m	0,13203227	0,00182718	0,00024125	3,32920182
16	PA10Km_S#2_300m	0,13275319	0,00182718	0,00024256	3,34737986

### 3.1.4 CAIDA DE VOLTAJE

La caída de voltaje es uno de los parámetros más utilizados para poder determinar un calibre óptimo en el sistema de distribución. A su vez el cambio de calibre en el A/P por uno de mejores capacidades se denomina repotenciación del conductor, para esto se realizan los estudios necesarios para verificar que existan menores pérdidas y menor caída de voltaje para el conductor repotenciado y con esto a largo plazo se compense el costo de la inversión del cambio de calibre.

#### 3.1.4.1 Caída de voltaje para un alimentador primario ACSR 1/0 AWG con distancia de 10 km y circuitos secundarios variables.

Usando los valores obtenidos en la simulación y detallados en el Anexo IV, se han creado varias tablas mostrando los errores porcentuales entre los valores obtenidos en el modelo a escala o mediante la primera aproximación, siendo los valores simulados los considerados como reales.

##### 3.1.4.1.1 Valores de caída voltaje obtenidos del modelo a escala

Como se mencionó en el anterior capítulo, para poder comparar el sistema real de 13.8 kV y el modelo a escala, se deben realizar las comparaciones en el sistema por unidad, por lo que los voltajes simulados se trasladaron a sistema p.u. mientras que el modelo a escala mediante programación ya realiza la conversión y en la interfaz presentada solo muestra los valores en el sistema p.u.

El alimentador primario se mantiene fijo con un calibre de conductor ACSR 1/0 AWG y una distancia fija de 10 km, mientras que el circuito secundario varía tanto en calibre como en distanciamiento, teniendo así cuatro tipos de calibres distintos y cuatro distanciamientos diferentes, teniendo un total de 16. Los calibres usados para el C/S son ACSR 4/0, 3/0, 2/0 y #2 AWG, mientras que las distancias usadas son: 150, 200, 250 y 300 m.

La tabla 3.3 muestra los valores de caída de voltaje medidos en el alimentador primario, es decir la caída de voltaje en el lado de Medio Voltaje del sistema.

**Tabla 3.6.** Error porcentual de la caída de voltaje obtenido del modelo a escala del A/P.

No	Caso	Primario		
		Voltaje p.u. Simulado	Voltaje p.u. Obtenido	Error [%]

1	PA10Km_S4-0_150m	0,000177536	0,00017375	2,13265306
2	PA10Km_S4-0_200m	0,000178986	0,00017869	0,16510121
3	PA10Km_S4-0_250m	0,000181159	0,00018108	0,04384
4	PA10Km_S4-0_300m	0,000185507	0,00018571	0,10929688
5	PA10Km_S3-0_150m	0,000181159	0,00018128	0,06656
6	PA10Km_S3-0_200m	0,000182609	0,00017821	2,40880952
7	PA10Km_S3-0_250m	0,000180435	0,00017836	1,14987952
8	PA10Km_S3-0_300m	0,000189855	0,0001872	1,39847328
9	PA10Km_S2-0_150m	0,000181884	0,0001741	4,27968127
10	PA10Km_S2-0_200m	0,000181159	0,00017676	2,42848
11	PA10Km_S2-0_250m	0,000188406	0,00018671	0,90007692
12	PA10Km_S2-0_300m	0,00018913	0,00018627	1,51241379
13	PA10Km_S#2_150m	0,000182609	0,00017809	2,47452381
14	PA10Km_S#2_200m	0,000184058	0,00018031	2,03629921
15	PA10Km_S#2_250m	0,000186159	0,00017948	3,5880109
16	PA10Km_S#2_300m	0,000188406	0,00018293	2,90638462

Se observa que el porcentaje de error es bajo, siendo el más alto del 4.27% y el menor del 0.04%, mostrando que la construcción del modelo representa de manera precisa el sistema de 13.8kV en el lado de Medio Voltaje

La tabla 3.7 muestra los valores de caída de voltaje medidos en los circuitos secundarios, es decir la caída de voltaje en el lado de Bajo Voltaje del sistema.

**Tabla 3.7.** Error porcentual de la caída de voltaje obtenido del modelo a escala del C/S.

No	Caso	Secundario		
		Voltaje p.u. Simulado	Voltaje p.u. Obtenido	Error%
1	PA10Km_S4-0_150m	0,009409091	0,00898787	4,47674396
2	PA10Km_S4-0_200m	0,012636364	0,01274962	0,89627338
3	PA10Km_S4-0_250m	0,015818182	0,01575728	0,38501149
4	PA10Km_S4-0_300m	0,019090909	0,01851818	3,00000952
5	PA10Km_S3-0_150m	0,011363636	0,01118734	1,551408
6	PA10Km_S3-0_200m	0,014954545	0,01528601	2,21648024
7	PA10Km_S3-0_250m	0,018727273	0,01964923	4,92307282
8	PA10Km_S3-0_300m	0,022909091	0,02210507	3,50961508
9	PA10Km_S2-0_150m	0,013045455	0,01241298	4,8482262
10	PA10Km_S2-0_200m	0,017818182	0,01609548	9,66822449
11	PA10Km_S2-0_250m	0,022377273	0,02018297	9,80594353
12	PA10Km_S2-0_300m	0,026818182	0,02457349	8,37003729
13	PA10Km_S#2_150m	0,022454545	0,01994413	11,1799879
14	PA10Km_S#2_200m	0,030227273	0,02913066	3,62789173
15	PA10Km_S#2_250m	0,038068182	0,03747599	1,55560836

16	PA10Km_S#2_300m	0,045909091	0,03256615	29,0638317
----	-----------------	-------------	------------	------------

Se observa que en su mayoría los valores presentan un bajo porcentaje de error, sin embargo, existen 5 valores donde la caída de voltaje ha superado el 5%. Para los casos 10, 11, 12 y 13 el porcentaje de error sigue en buenos valores debido a que son menores al 12% y ya que son resistencias creadas mediante combinaciones de serie-paralelo este error es aceptable, la falla se puede deber a factores constructivos, debido a que las resistencias se calentaron debido al uso continuo del módulo y en función a la ecuación (1.3), el aumento en la temperatura de las resistencias representa un aumento del valor de la misma resistencia. El caso 16 es un caso atípico, presenta un error del 29.06 %, este error podría darse debido a la falla constructiva anteriormente mencionada, pero gracias al alto valor de error porcentual es poco probable, el alto valor de error obtenido puede deberse a una mala comunicación del módulo con la interfaz.

### 3.1.4.1.2 Valores de caída voltaje obtenidos de la primera aproximación

Los valores obtenidos en la tabla 2.7 para la caída de voltaje según la primera aproximación, la cual es obtenida con los valores de la simulación de CYME, se los compara con los valores simulados en CYME de caída de voltaje para poder obtener el valor del error porcentual. Los valores tanto de la simulación en CYMDIST como de los cálculos de la primera aproximación están en voltios.

**Tabla 3.8.** Error porcentual de la caída de voltaje obtenido de la primera aproximación con los valores simulados en el A/P.

No	Caso	$\Delta V_{Pri\_CYME}$ [V]	$\Delta V_{Pri\_1ra}$ Aprox sim [V]	Error 1ra aprox sim [%]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,45	2,283365032	6,8014
2	PA10Km_S4-0_200m	2,47	2,28197316	7,6124
3	PA10Km_S4-0_250m	2,5	2,282397681	8,7041
4	PA10Km_S4-0_300m	2,56	2,28197316	10,8604
5	PA10Km_S3-0_150m	2,5	2,284756903	8,6097
6	PA10Km_S3-0_200m	2,52	2,285452839	9,3074
7	PA10Km_S3-0_250m	2,49	2,284756903	8,2427
8	PA10Km_S3-0_300m	2,62	2,286148775	12,7424
9	PA10Km_S2-0_150m	2,51	2,28684471	8,8906
10	PA10Km_S2-0_200m	2,5	2,288236582	8,4705
11	PA10Km_S2-0_250m	2,6	2,290324389	11,9106
12	PA10Km_S2-0_300m	2,61	2,29269057	12,1574
13	PA10Km_S#2_150m	2,52	2,300763424	8,6999



14	PA10Km_S#2_200m	2,54	2,307722781	9,1448
15	PA10Km_S#2_250m	2,569	2,314682138	9,8995
16	PA10Km_S#2_300m	2,6	2,322337431	10,6793

Como Muestra la tabla 3.8 todos los valores obtenidos de la simulación con la primera aproximación superan el error del 5%, se tiene un error máximo del 12.74% y un error mínimo del 6.80%, sin embargo se puede notar que la caída de voltaje simulada tiene valores entre 2.45 y 2.62 Voltios mientras que la caída de voltaje según la primera aproximación no supera los 2.4 Voltios, y considerando que los valores son en el A/P quien posee un voltaje nominal de 13.8 kV, este error es despreciable, por tanto la primera aproximación en un A/P es una herramienta de gran eficacia.

Con los valores de la tabla 3.5 se puede encontrar el error porcentual de la caída de voltaje de primera aproximación obtenida mediante la medición de la corriente en el modelo a escala del sistema de 13.8 kV

**Tabla 3.9.** Error porcentual de la primera aproximación de caída de voltaje obtenida del modelo a escala

No	Caso	$\Delta V_{Pri\_CYME}$ [V]	1ra obt Aproximación [V]	Error 1ra aproximación [%]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,45	3,22376353	31,5821849
2	PA10Km_S4-0_200m	2,47	3,23820848	31,10155789
3	PA10Km_S4-0_250m	2,5	3,24681791	29,8727164
4	PA10Km_S4-0_300m	2,56	3,2635476	27,48232813
5	PA10Km_S3-0_150m	2,5	3,23229378	29,2917512
6	PA10Km_S3-0_200m	2,52	3,24339597	28,70618929
7	PA10Km_S3-0_250m	2,49	3,25926482	30,89416948
8	PA10Km_S3-0_300m	2,62	3,26591101	24,65309198
9	PA10Km_S2-0_150m	2,51	3,23812275	29,0088745
10	PA10Km_S2-0_200m	2,5	3,25319001	30,1276004
11	PA10Km_S2-0_250m	2,6	3,27069052	25,79578923
12	PA10Km_S2-0_300m	2,61	3,28774448	25,96722146
13	PA10Km_S#2_150m	2,52	3,27477032	29,95120317
14	PA10Km_S#2_200m	2,54	3,30193249	29,99734213
15	PA10Km_S#2_250m	2,569	3,32920182	29,5913515
16	PA10Km_S#2_300m	2,6	3,34737986	28,74537923

Los errores porcentuales para la primera aproximación calculada son considerablemente altos ya están entre el 28 y 31%, aunque debido a la diferencia del voltaje base de 13800

voltios contra los obtenidos mediante el modelo a escala, son alrededor del 3.2 V por lo que se podrían considerarse despreciables. Dado que la tabla 3.9 presenta errores altos y la tabla 3.8 presenta menos porcentaje de error, se usará la tabla 3.8 como los resultados de la primera aproximación de caída de voltaje en caso de ser necesario.

### 3.1.4.2 Comparación de valores de caída de voltaje con las normas propuestas en la EEQ

En la tabla 1.1 dado en el capítulo del marco teórico, es posible observar cuales son los valores máximos permitidos para caída de voltaje por la Empresa Eléctrica Quito para zonas rurales y urbanas y para alimentadores primarios y circuitos secundarios. En la tabla 3.10. se puede observar el porcentaje de caída permitido por la EEQ trasladado a valores en voltios y en por unidad en función de las bases del sistema simulado, es decir en el lado de medio voltaje 13.8 kV y en bajo voltaje 220 V.

**Tabla 3.10.** Valores de caída de voltaje en función de la norma de la EEQ.

	voltaje nominal [V]	caída [%]	caída [V]	caída [p.u.]
Primario	13800	3,50%	483	0,035
Secundario	220	2,50%	5,5	0,025

Con estos valores referenciales para observar la máxima caída de voltaje permitida por la empresa distribuidora se puede comparar los valores obtenidos en el modelo a escala y al comparar se puede observar si los conductores tanto para el A/P y C/S cumplen o no con la normativa.

**Tabla 3.11.** Valores de caída de voltaje obtenidos del modelo a escala.

No	Caso	Primario	Secundario
		Voltaje p.u. Obtenido	Voltaje p.u. Obtenido
1	PA10Km_S4-0_150m	0,00017375	0,00898787
2	PA10Km_S4-0_200m	0,00017869	0,01274962
3	PA10Km_S4-0_250m	0,00018108	0,01575728
4	PA10Km_S4-0_300m	0,00018571	0,01851818
5	PA10Km_S3-0_150m	0,00018128	0,01118734
6	PA10Km_S3-0_200m	0,00017821	0,01528601
7	PA10Km_S3-0_250m	0,00017836	0,01964923
8	PA10Km_S3-0_300m	0,0001872	0,02210507
9	PA10Km_S2-0_150m	0,0001741	0,01241298
10	PA10Km_S2-0_200m	0,00017676	0,01609548
11	PA10Km_S2-0_250m	0,00018671	0,02018297

12	PA10Km_S2-0_300m	0,00018627	0,02457349
13	PA10Km_S#2_150m	0,00017809	0,01994413
14	PA10Km_S#2_200m	0,00018031	0,02913066
15	PA10Km_S#2_250m	0,00017948	0,03747599
16	PA10Km_S#2_300m	0,00018293	0,03256615

Como muestra la tabla 3.11. los casos 14, 15 y 16 los cuales están construidos con un conductor ACSR #2 AWG para los circuitos secundarios conectados a una carga simulada de 2 kW y con distancias de 200, 250 y 300 m no cumplen con la norma en los C/S.

Para verificar que los valores de la tabla 3.11. no cumplen la norma y no por fallos en la toma de medición se realiza la tabla 3.12. en la cual se compara los valores de caída de voltaje obtenidos en la simulación del software CYME con los valores máximos de caída de voltaje normada según la EEQ.

**Tabla 3.12.** Valores de caída de voltaje simulados en CYME.

No	Caso	Primario	Secundario
		$\Delta V_{Pri\_CYME}$ [V]	$\Delta V_{Scu\_CYME}$ [V]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,45	2,07
2	PA10Km_S4-0_200m	2,47	2,78
3	PA10Km_S4-0_250m	2,5	3,48
4	PA10Km_S4-0_300m	2,56	4,2
5	PA10Km_S3-0_150m	2,5	2,5
6	PA10Km_S3-0_200m	2,52	3,29
7	PA10Km_S3-0_250m	2,49	4,12
8	PA10Km_S3-0_300m	2,62	5,04
9	PA10Km_S2-0_150m	2,51	2,87
10	PA10Km_S2-0_200m	2,5	3,92
11	PA10Km_S2-0_250m	2,6	4,923
12	PA10Km_S2-0_300m	2,61	5,9
13	PA10Km_S#2_150m	2,52	4,94
14	PA10Km_S#2_200m	2,54	6,65
15	PA10Km_S#2_250m	2,569	8,375
16	PA10Km_S#2_300m	2,6	10,1

La simulación muestra que los casos 14, 15 y 16 efectivamente no cumplen la normativa, además el caso 12 tampoco cumple por lo cual se observa que en la tabla 3.11. cumplió la norma por coincidencia y debido al error del 8.37% que muestra la tabla 3.7. El caso 12

muestra un C/S con calibre de conductor ACSR 2/0 AWG y una distancia de 200m y conectado a una carga de 2 kW.

Observando los valores resultantes de la primera aproximación y comparándola con la normativa para caída de voltaje, se puede observar que los valores están dentro de los parámetros, por ende, la caída de voltaje calculada con la primera aproximación, para el alimentador primario cumple con la norma.

**Tabla 3.13.** Valores de caída de voltaje obtenidos de la primera aproximación.

No	Caso	$\Delta V_{Pri\_1ra}$ Aproximación Sim [V]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,283365032
2	PA10Km_S4-0_200m	2,28197316
3	PA10Km_S4-0_250m	2,282397681
4	PA10Km_S4-0_300m	2,28197316
5	PA10Km_S3-0_150m	2,284756903
6	PA10Km_S3-0_200m	2,285452839
7	PA10Km_S3-0_250m	2,284756903
8	PA10Km_S3-0_300m	2,286148775
9	PA10Km_S2-0_150m	2,28684471
10	PA10Km_S2-0_200m	2,288236582
11	PA10Km_S2-0_250m	2,290324389
12	PA10Km_S2-0_300m	2,29269057
13	PA10Km_S#2_150m	2,300763424
14	PA10Km_S#2_200m	2,307722781
15	PA10Km_S#2_250m	2,314682138
16	PA10Km_S#2_300m	2,322337431

### 3.1.5 COMPARACIÓN DE CAÍDA DE VOLTAJE PARA LOS CONDUCTORES ACSR #2 Y 1/0 AWG EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO.

El comparar las caídas de voltaje que ocurren en dos conductores de diferente calibre y con la misma distancia, sirve para realizar un estudio económico que relaciona los costos a corto, mediano y largo plazo con la reducción de las pérdidas de potencia y mejora en la calidad del producto que una empresa distribuidora entrega al sistema.

Los voltajes usados para la comparación son los obtenidos de manera práctica, con el calibre ACSR #2 AWG se obtuvieron de las caídas de voltajes de la tabla 3.17 para los valores de caídas de voltaje en medio voltaje y de la tabla U.1 del anexo U para los valores de caídas de bajo voltaje, de la tesis previa de los Ings. Llumiquinga y Jiménez [7].



Para poder observar las diferencias entre las caídas de voltaje que existen entre ambos calibres al valor el obtenido del conductor ACSR #2 AWG, se le resta el valor obtenido del conductor calibre ACSR 1/0 AWG, con esto si el resultado de la suma es positivo demuestra que la caída de voltaje es mayor al tener del conductor de calibre ACSR #2 AWG, caso contrario la caída de voltaje es mayor al tener el conductor de calibre ACSR 1/0 AWG.

Las caídas de voltaje mostradas en la tabla 3.14 muestran los valores obtenidos en el modelo a escala construido en el lado de medio voltaje, se compara los valores de caída de voltaje para los conductores de calibre ACSR #2 y 1/0 AWG en el lado que representa el A/P. Los voltajes a comparar están en el sistema por unidad, por lo que se los puede comparar directamente.

**Tabla 3.14.** Comparación de caídas de voltaje experimental en Medio Voltaje en función del calibre del conductor en el A/P

Caídas de Voltaje experimental [p.u.] Medio Voltaje				
		Alimentador Primario 10 km		
No	Caso circuito secundario	ACSR #2 AWG	ACSR #1/0 AWG	Diferencia
1	S4-0_150m	0,00273	0,00017375	0,00256
2	S4-0_200m	0,000295	0,00017869	0,00012
3	S4-0_250m	0,000299	0,00018108	0,00012
4	S4-0_300m	0,000274	0,00018571	0,00009
5	S3-0_150m	0,000269	0,00018128	0,00009
6	S3-0_200m	0,000278	0,00017821	0,00010
7	S3-0_250m	0,000313	0,00017836	0,00013
8	S3-0_300m	0,000312	0,0001872	0,00012
9	S2-0_150m	0,000294	0,0001741	0,00012
10	S2-0_200m	0,000294	0,00017676	0,00012
11	S2-0_250m	0,000321	0,00018671	0,00013
12	S2-0_300m	0,000319	0,00018627	0,00013
13	S#2_150m	0,00029	0,00017809	0,00011
14	S#2_200m	0,000308	0,00018031	0,00013
15	S#2_250m	0,000327	0,00017948	0,00015
16	S#2_300m	0,000326	0,00018293	0,00014

La diferencia en todos los casos es positiva por lo que se demuestra que al existir un calibre mayor existe una menor caída de voltaje.

Las caídas de voltaje mostradas en la tabla 3.15 muestran los valores obtenidos en el modelo a escala construido, comparando los valores de caída de voltaje para los conductores de calibre ACSR #2 y 1/0 AWG en el lado que representa el A/P. Los voltajes

a comparar son los voltajes medidos en bajo voltaje. Los valores de voltaje están en el sistema por unidad, por lo que se los puede comparar directamente.

**Tabla 3.15.** Comparación de caídas de voltaje experimental en Bajo Voltaje en función del calibre del conductor en el A/P

Caídas de Voltaje experimental [p.u.] Bajo Voltaje				
		Alimentador Primario 10 km		
No	Caso circuito secundario	ACSR #2 AWG	ACSR #1/0 AWG	Diferencia
1	S4-0_150m	0,009681	0,00898787	0,00069
2	S4-0_200m	0,013036	0,01274962	0,00029
3	S4-0_250m	0,016393	0,01575728	0,00064
4	S4-0_300m	0,019876	0,01851818	0,00136
5	S3-0_150m	0,011434	0,01118734	0,00025
6	S3-0_200m	0,015434	0,01528601	0,00015
7	S3-0_250m	0,019671	0,01964923	0,00002
8	S3-0_300m	0,023436	0,02210507	0,00133
9	S2-0_150m	0,013567	0,01241298	0,00115
10	S2-0_200m	0,018687	0,01609548	0,00259
11	S2-0_250m	0,023533	0,02018297	0,00335
12	S2-0_300m	0,028238	0,02457349	0,00366
13	S#2_150m	0,02354	0,01994413	0,00360
14	S#2_200m	0,031524	0,02913066	0,00239
15	S#2_250m	0,040184	0,03747599	0,00271
16	S#2_300m	0,047018	0,03256615	0,01445

La diferencia para en todos los casos es positiva, por lo que se vuelve a confirmar que el cambio a un mayor calibre afecta de manera positiva a la caída de voltaje.

### 3.1.6 RESULTADOS FINALES PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO

Para tener una visualización mas general de los resultados obtenidos se los ha colocado en la tabla 3.16, en la cual se puede observar los valores de caídas de voltaje en el alimentador primario, en cuatro escenarios diferentes: los valores obtenidos de la simulación como lo dice el Anexo III, los valores de la primera aproximación simulada con los datos de corriente mostradas en el Anexo IV y la resistencia descrita en la ecuación (2.14), la primera aproximación calculada mediante la corriente obtenidas del módulo y la resistencia construida, y por último los datos obtenidos de caída de voltaje del módulo.

Estos datos para tener una mejor visualización se los ha referido al voltaje del sistema de 13.8 kV, por lo que la caída de voltaje está representada en Voltios para un alimentador

primario calibre ACSR 1/0 AWG de voltaje nominal de 13.8 kV y con un distanciamiento de 10 km.

**Tabla 3.16.** resumen de caídas de voltajes en el A/P obtenidas con diferentes métodos.

No	Caso	$\Delta V_{Pri\_CYME}$ [V]	$\Delta V_{Pri\_1ra}$ Aprox simulada [V]	1ra Aproximación obtenida [V]	Voltaje Obt experimental[V]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,45	2,283365032	3,22376353	2,39775
2	PA10Km_S4-0_200m	2,47	2,28197316	3,23820848	2,465922
3	PA10Km_S4-0_250m	2,5	2,282397681	3,24681791	2,498904
4	PA10Km_S4-0_300m	2,56	2,28197316	3,2635476	2,562798
5	PA10Km_S3-0_150m	2,5	2,284756903	3,23229378	2,501664
6	PA10Km_S3-0_200m	2,52	2,285452839	3,24339597	2,459298
7	PA10Km_S3-0_250m	2,49	2,284756903	3,25926482	2,461368
8	PA10Km_S3-0_300m	2,62	2,286148775	3,26591101	2,58336
9	PA10Km_S2-0_150m	2,51	2,28684471	3,23812275	2,40258
10	PA10Km_S2-0_200m	2,5	2,288236582	3,25319001	2,439288
11	PA10Km_S2-0_250m	2,6	2,290324389	3,27069052	2,576598
12	PA10Km_S2-0_300m	2,61	2,29269057	3,28774448	2,570526
13	PA10Km_S#2_150m	2,52	2,300763424	3,27477032	2,457642
14	PA10Km_S#2_200m	2,54	2,307722781	3,30193249	2,488278
15	PA10Km_S#2_250m	2,569	2,314682138	3,32920182	2,476824
16	PA10Km_S#2_300m	2,6	2,322337431	3,34737986	2,524434

Los voltajes para todos los casos es menor a 3.5 V mostrando que la caída de voltaje en el A/P es baja, debido a que estos valores en 13.8 kV pueden considerarse despreciables.

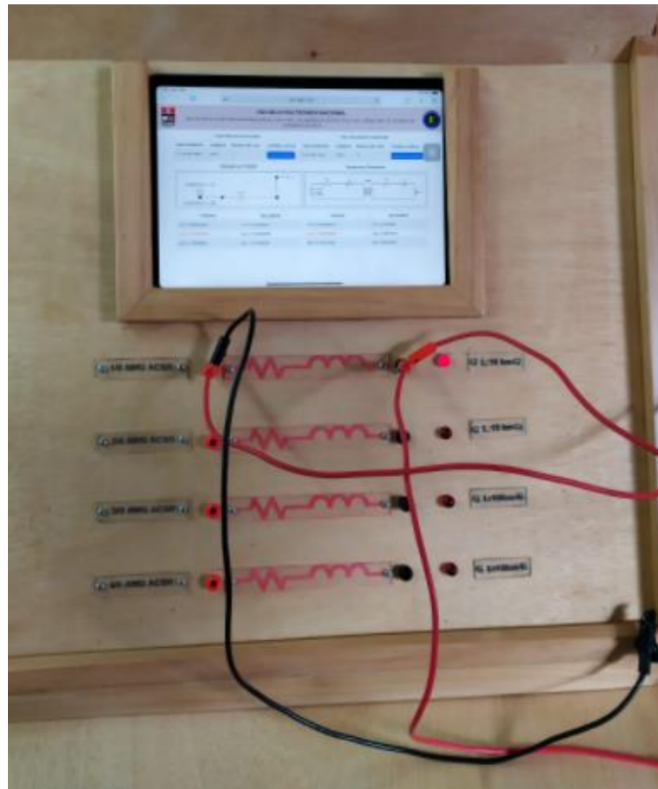
### 3.1.7 MODELO CONSTRUIDO

El modelo a escala para el sistema de 13.8 kV con A/P de calibre diferente al ACSR #2 AWG fue depositado en el Laboratorio de Maquinas Eléctricas, y fue acoplado físicamente mediante tornillos al modelo original a escala, por lo que en la actualidad los dos módulos permanecen juntos, lo cual es conveniente debido a que el módulo nuevo requiere el funcionamiento del primer módulo.



**Figura 3.1** Módulo nuevo acoplado físicamente al primero módulo

Adicionalmente el nuevo módulo posee una apertura en la parte superior del tablero para poder depositar una Tablet para poder usar el módulo y visualizar los resultados mediante la interfaz existente.



**Figura 3.2.** Tablero del nuevo módulo con Tablet para la visualización de datos.

## 3.2 CONCLUSIONES

- El cálculo de los parámetros eléctricos realizados en los softwares de simulación MatLab y en CYME presentan una alta exactitud, sin embargo, difieren en el nivel de precisión, donde Matlab puede mostrar cerca de 15 decimal mientras que CYME solo presenta 4.
- El software de simulación CYME no requiere la programación mediante línea de código para poder encontrar los resultados, pero para poder tener valores exactos de los parámetros se deben modelar, los tipos de líneas, con sus respectivos calibres, la estructura para A/P y C/S, la carga, la fuente y el transformador, por lo que, si existe un mal modelado en estos, los valores resultantes serán incorrectos.
- El modelo a escala del sistema de 13.8 kV permite emular un sistema monofásico del Sistema de Distribución con gran exactitud y así poder verificar los valores de caídas de voltaje para el alimentador primario y al circuito secundario.
- Las pérdidas debido al efecto Joule obtenidas en el alimentador primario con calibre ACSR 1/0 AWG son bajas, mas el uso constante y en largos tiempos pueden provocar un aumento en las pérdidas debido a que la resistencia posee una relación directa entre la temperatura y la resistencia propia del elemento.
- La primera aproximación para la caída de voltaje para el alimentador primario y distancias cortas sirve como una referencia, debido a que en comparación a los valores simulados y obtenidos el error obtenido puede llegar a ser un poco mayor, pero en elementos como el A/P estas diferencias pueden llegar a ser despreciables.
- El conductor ACSR #2 AWG de manera física y simulada supera lo establecido en la norma por lo cual, no cumple con la norma propuesta por la Empresa Eléctrica Quito para caída de voltajes, para distancias mayores a 200 metros para circuitos secundarios con una carga de 2 kW.
- En función de la simulación, la caída de voltaje es mayor al permitido por la norma para el cable ACSR 2/0 AWG como circuito secundario con un distanciamiento de 300 m y conectado a una carga de 2kW, por tanto, no cumple con la normativa emitida por la EEQ con respecto a las caídas de voltaje.
- Pueden existir corrientes de Foucault en el C/S debido a que el circuito identificador de casos no está aislado eléctricamente y poseyendo un neutro común para todos



los casos, permitiendo el paso a corrientes parasitas y mostrando un incremento en la medición de corriente

- Tanto en la simulación como en los datos obtenidos se verifica la teoría de que, al cambiar el conductor de un calibre inferior a uno de mayor calibre, la caída de voltaje y las pérdidas se reducen.
- En la comparación de calibres usando el sistema por unidad, las diferencias pueden parecer casi insignificantes, mientras que en el sistema real de distribución con un voltaje base de 13.8 kV las diferencias para las caídas de voltaje entre los calibres ACSR 2 y 1/0 AWG puede alcanzar las decenas de voltios, por lo que para distancias cortas el aumento del calibre en el A/P debe conllevar un estudio económico debido a que los costos pueden variar significativamente.
- En función de las tablas de resistividad dadas para los conductores de diferentes calibres, un conductor de cobre 1/0 es equivalente al ACSR 3/0 AWG, por lo que, en los valores y parámetros eléctricos, el sistema con un cable ACSR 1/0 AWG se compara a un conductor 1/0 de cobre de la misma manera que se comparan los conductores ACSR 1/0 y 3/0 AWG.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

- El software de simulación MatLab presenta una mayor exactitud en los cálculos, para fines prácticos se puede tomar la referencia de la simulación realizada en CYME que es suficiente para proceder en la construcción de la resistencia e inductancia para el modelo a escala.
- Es recomendable desenergizar del módulo para el cambio de caso en el lado de bajo y voltaje y si es que el lado de medio voltaje pasa del calibre ACSR #2 AWG al ACSR 1/0 AWG o superior.
- Para los cálculos es recomendable usar los valores tomados del voltaje, ya que, aunque si bien la interfaz muestra los valores de corriente en p.u., el aparato de medición es un voltímetro inalámbrico por lo que los valores medidos serán más precisos.
- La comunicación del módulo del modelo a escala con la interfaz gráfica tarda un poco menos de un minuto, por lo que para tomar valores con precisión se debe esperar ese tiempo.

- Es recomendable usar elementos de buena calidad en la construcción del modelo a escala para que el módulo tenga una vida útil larga y que no se comprometa la precisión y confiabilidad del mismo.
- Es recomendable el uso de un sistema Android en el caso de verificar la interfaz en un dispositivo móvil, debido a que el sistema Android permite entrar sin dificultad, mientras que iOS el sistema de seguridad dificulta la comunicación con el módulo.
- Es recomendable no usar multímetros diferentes al inalámbrico que está presente en el módulo, debido a que los multímetros poseen sus propias resistencias y al conectarlo se lo considera una carga en paralelo.
- La Tablet en el modulo no debe permanecer todo el tiempo en el mismo. Por lo que es recomendable que el profesor de la materia use su propio dispositivo o se le pida al director de esta tesis o quien se encuentre encargado del módulo en su momento.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASASDASD

- [1] S. Ramirez Castaño, Redes de distribución De Energía, Mazinales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2004.
- [2] Empresa Electrica Quito S.A., Normas para sistemas de distribución, Parte A, Guía para diseño de redes para distribución, Quito, 2015.
- [3] H. Mendoza, «La Energia Electrica,» Agosto 2003. [En línea]. Available: [https://www.buenosaires.gob.ar/areas/educacion/escuelas/escuelas/media/tecnica/tecnica33/plumerillo/departamentos/metalurgia/archivos\\_metalurgia/energia\\_electrica.html](https://www.buenosaires.gob.ar/areas/educacion/escuelas/escuelas/media/tecnica/tecnica33/plumerillo/departamentos/metalurgia/archivos_metalurgia/energia_electrica.html). [Último acceso: Enero 2022].
- [4] Electrocables, «Aluminio ASC ó AAC,» [En línea]. Available: <https://www.electrocable.com/index.php/es/categorias-productos/infraestructura/aluminio/asc-o-aac.html>. [Último acceso: 11 Enero 2022].
- [5] Electrocables, «Aluminio ACSR,» [En línea]. Available: <https://www.electrocable.com/index.php/es/categorias-productos/infraestructura/aluminio/acsr.html>. [Último acceso: 11 enero 2022].
- [6] Stevenson y Grainger, Análisis de Sistemas de Potencia, 1996.
- [7] H. Jimenez y F. Llumiyinga, «Emulación de un sistema de distribución de 13.8 kV para la elaboración de prácticas en el laboratorio de distribución de energía eléctrica,» 2021.
- [8] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley y S. D. Umans, Electric Machinery, 6ta edicion ed., New York: McGraw-Hill, 2003.
- [9] W. H. Kersting, «Distribution System Modeling and Analysis,» New Mexico, 2001.
- [10] H. Keshtkar, S. K. Solanki y J. M. Solanki, «Improving the Accuracy of Impedance Calcuation for Distribution Power System,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. Vol 29, nº No 2, pp. 570-579, 2014.
- [11] MEER, «Catálogo Digital Redes de dsitribución de Energía Eléctrica,» 04 01 2013. [En línea]. Available: [https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=142:mvt&catid=18:pdfs&Itemid=207](https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=142:mvt&catid=18:pdfs&Itemid=207). [Último acceso: 15 01 2022].
- [12] G. Mantilla Quinajo, «La Ley De Joule,» de *Instalaciones Electricas*, Bogota, Camina, 1985.
- [13] A. J. Boada y A. Millán, «Limitaciones de los Errores Relativos en los Pronósticos, una Nueva Propuesta para cuantificar los Errores Porcentuales en Predicciones,» *Revista Universitaria de Investigacion y Diálogo Académico*, vol. 7, nº 3, pp. 1-18, 2011.



## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Programa en MatLab para la corroboración de datos Calculados

ANEXO II. Modelación del sistema en Simulink de MatLab para observar caídas de voltaje.

ANEXO III. Modelado del A/P y procedimiento para obtener estos resultados de caídas de voltaje, corrientes de A/P y C/S y de la Matriz impedancia de fase.

ANEXO IV. Resultados de la simulación en el software de CYME.

ANEXO V. Modelado del circuito identificador de casos en el software PROTEUS.

ANEXO VI. Resultados obtenidos del modelo a escala del Sistema de 13.8 kV con conductor calibre ACSR 1/0 AWG.

ANEXO VII. Capturas de pantalla de algunos resultados obtenidos del modelo a escala con conductor calibre ACSR 1/0 AWG.

ANEXO VIII. Evidencias del modelo culminado y funcional

ANEXO IX. Uso del equipo para obtención de los resultados.

## ANEXO I

```
clear all
close all
clc
format long %% valores con 15 decimales
%% Calculo de distancias
Dab=sqrt((1.0668^2)+(0.3048^2)); %m
Dab=Dab*3.28084; %m a ft
Dbc=Dab;
Dac=2*1.0668*3.28084; %ft
Dan=3.28084*sqrt(((1.0668+0.1524)^2)+(1.2192^2)); %ft
Dbn=3.28084*sqrt(((.3048+1.2192)^2)+(.1524^2)); %ft
Dcn=3.28084*sqrt(((1.0668-0.1524)^2)+(1.2192^2)); %ft

%% Diagonal principal
ri=1.12; %ohms/milla a 50°C y 60 hz
RMG=0.00446; %ft al 75% de In
zii=ri+0.0953+j*0.12134*(log(1/RMG)+7.93402); %ohms/milla

%% Matriz primitiva, fuera de la diagonal
zab=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dab)+7.93402);
zba=zab;
zac=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dac)+7.93402);
zca=zac;
zan=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dan)+7.93402);
zna=zan;
zbc=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dbc)+7.93402);
zcb=zbc;
zbn=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dbn)+7.93402);
znb=zbn;
zcn=0.0953+j*0.12134*(log(1/Dcn)+7.93402);
znc=zcn;

%% Matrices componentes
Zij=[zii zab zac;zba zii zbc;zca zcb zii];
Zin=[zan;zbn;zcn];
Znj=[zna znb znc];
Znn=[zii];

%% Matriz primitiva
Zprimitiva=[Zij Zin;Znj Znn];

%% reduccion de kron y matriz impedancia de fases
Zabc=Zij-Zin*(Znn^-1)*Znj;

%% Valor de inductancia sistema de 13.8 kV
Zaom=Zabc(1,1); %ohms/milla valor de la inductancia propia de la fase A
Zreal=Zaom*10000/1609.34; %ohms
Xlreal=imag(Zreal);
Lreal=Xlreal/(120*pi); % en H
Lreal=Lreal*1000; %en mH
Rreal=real(Zreal);

%% valores base
Zbreal=((13.8*10^3)^2)/(50*10^3); % Z base real 13.8 kV
```

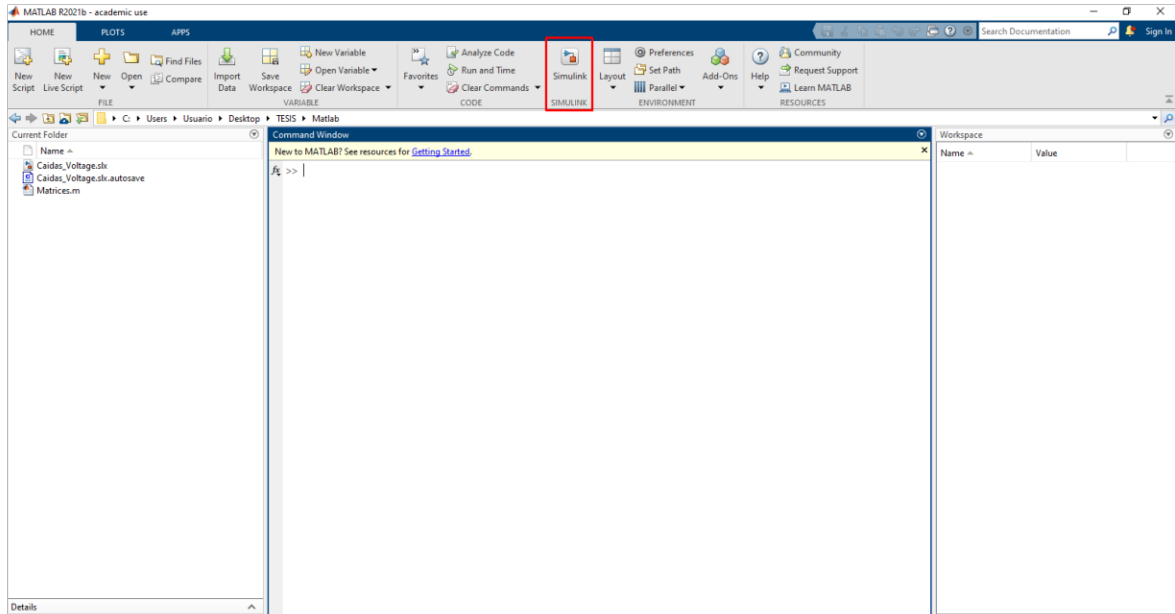
```
ZbprotMV=((120)^2)/(50); %Z base prototipo

%% Valor de inductancia prototipo modelo a escala
ZprotoMV=Zreal*ZbprotMV/Zbreal;
XlprotoMV=imag(ZprotoMV);
LprotoMV=XlprotoMV/(120*pi); %en H
LprotoMV=LprotoMV*1000; %en mH
RprotoMV=real(ZprotoMV);

%% visualiazacion de matrices
Zabc=single(Zabc);
Zprimitiva=single(Zprimitiva);
```

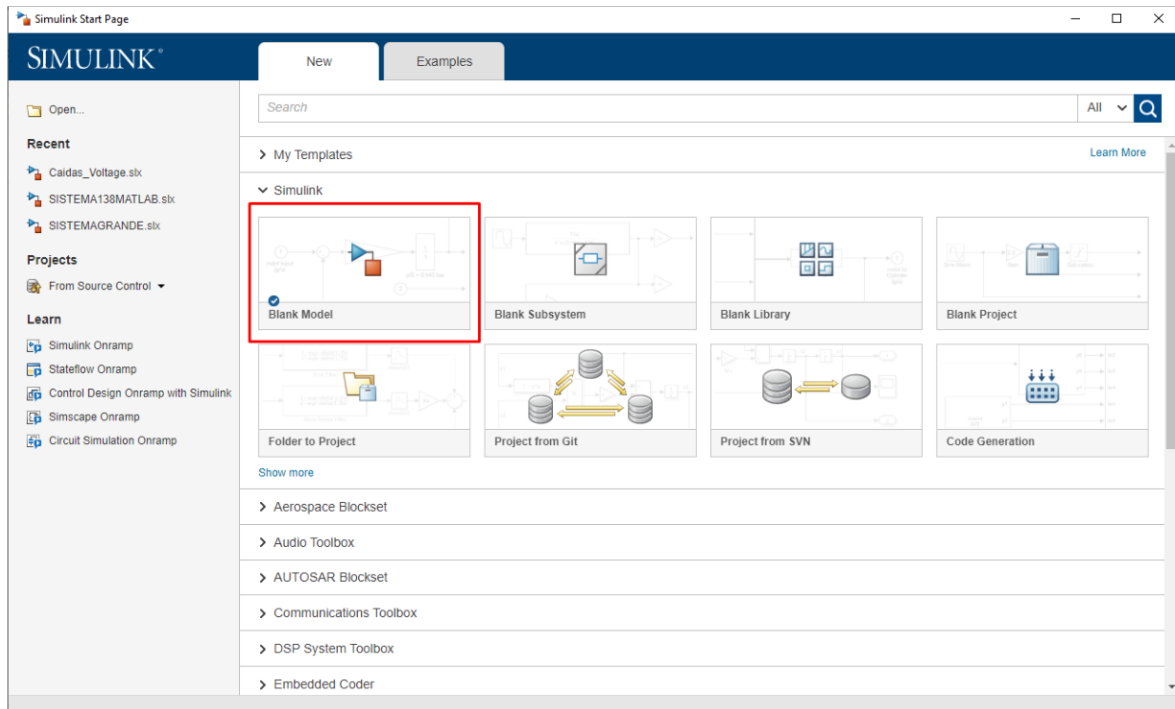
## ANEXO II

A continuación, se describe el procedimiento para obtener las caídas de voltaje es la herramienta Simulink de MatLab. Se inicia creando un archivo en Simulink desde Matlab, seleccionando la pestaña señalada en la figura II.1



**Figura II.1.** Apertura de Matlab y Simulink

Posteriormente se abre un archivo en blanco de Simulink, como muestra la figura II.2



Al tener ya el modelo en blanco de Simulink, se pasa a buscar los elementos necesarios en el “Library Browser”, en el cual estarán los elementos pasivos y activos para poder simular el Sistema.

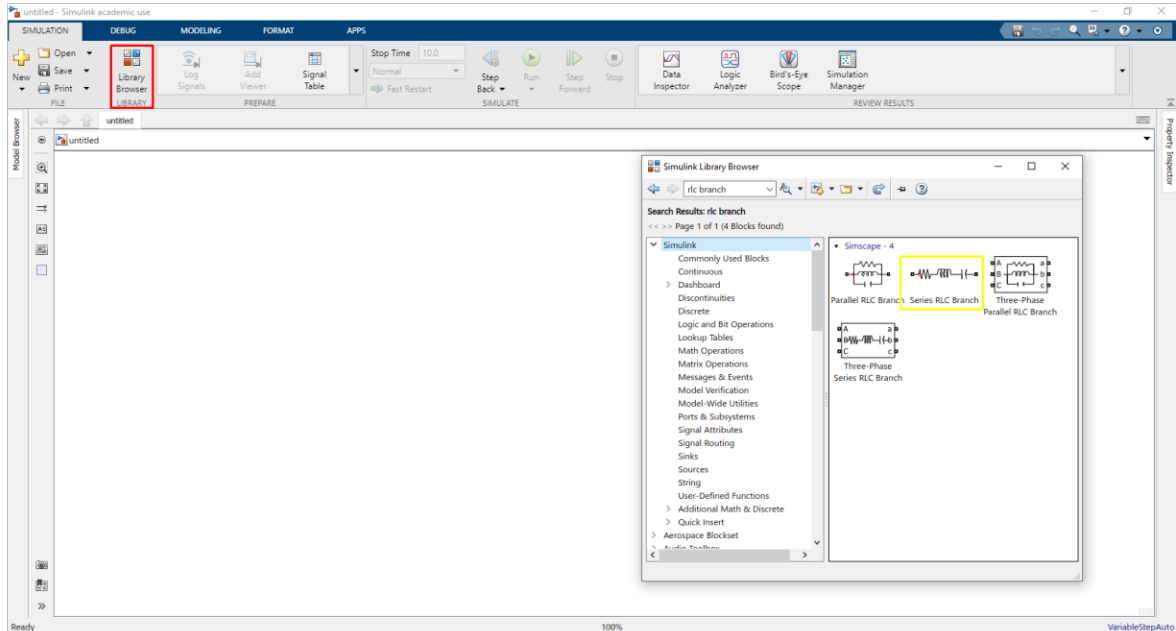
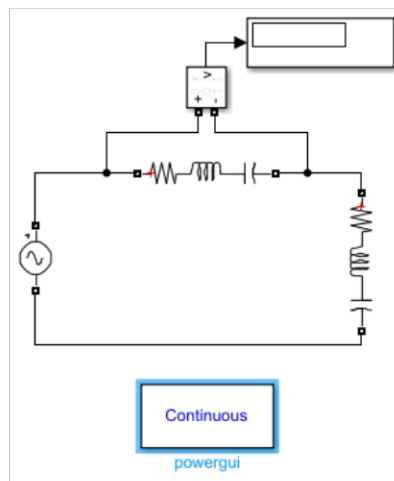


Figura II.3. Simulink en blanco y Library Browser abierto

Con el Library Browser abierto, se buscan todos los elementos necesarios, para el caso se requieren en serie resistencia e inductancia y se usa un “RLC Branch”, una fuente de voltaje alterna, un voltímetro, un display para poder visualizar el valor de voltaje obtenido por el voltímetro y una herramienta para poder simular llamado “powergui” el cual no interactúa con el circuito.

Al tener todos los elementos necesarios se los conecta creando un circuito como se muestra en la figura II.4 y se pasa a poner los parámetros necesarios.

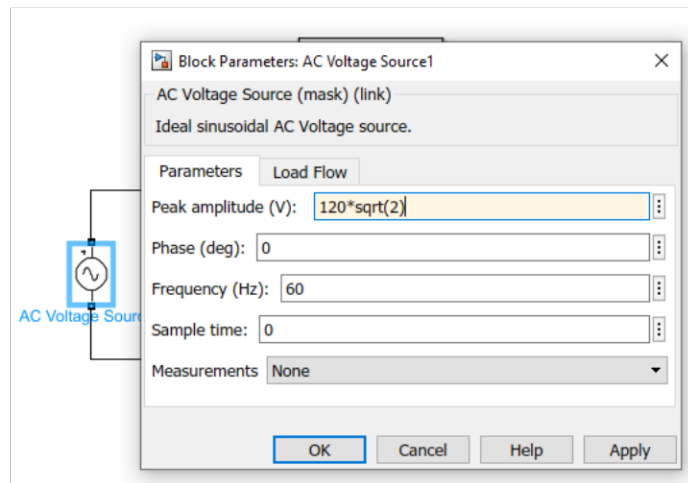


**Figura II.4.** Circuito conectado para la simulación en Simulink

Se debe configurar los parámetros de: la fuente de voltaje y los dos paquetes de elementos pasivos.

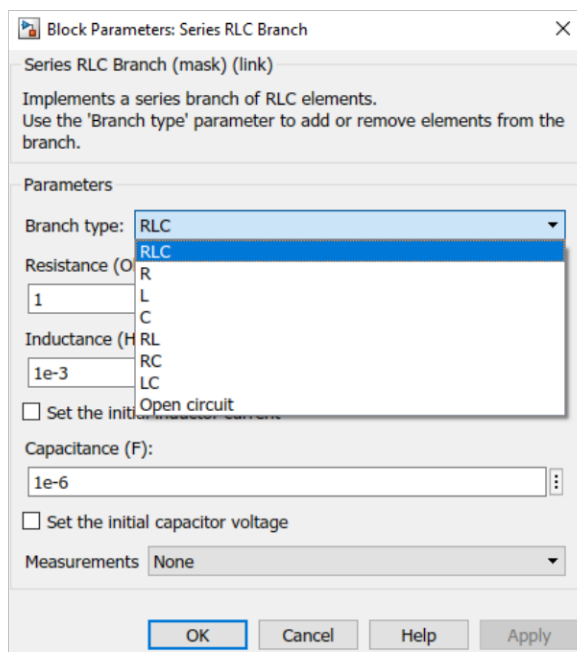
Para la fuente se usa los valores de voltaje usados como base para usarlos en el sistema por unidad, es decir que para el sistema real de 13.8 kV los mismos 13.8 kV y para el modelo a escala 120 V. pero también se considera que la fuente en Simulink requiere usar el voltaje pico, el cual se considera que es el voltaje base multiplicado por la raíz cuadrada de dos.

$$V_p = V_{rms} * \sqrt{2} \quad (II.1)$$



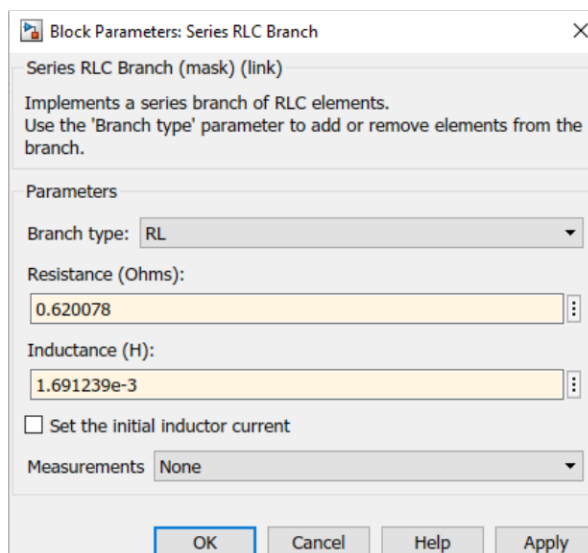
**Figura II.5.** Asignación del valor de voltaje.

Después se busca configura los bloques de elementos pasivos. En el cual como muestra la figura II.6 se lo puede mantener de forma RLC o cambiarla con las combinaciones de entre Resistencia, Inductancia y Capacitancia.



**Figura II.6.** Asignación del tipo de elemento.

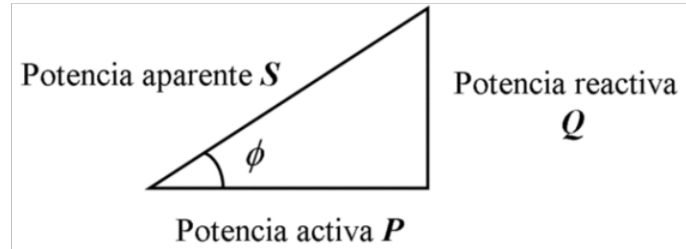
El primer elemento pasivo se lo considera del tipo RL y es el que representa los valores de resistencia e inductancia del conductor del alimentador primario, por eso es que ahí está conectado el voltímetro para observar la caída de voltaje. Para la asignación de parámetros se usa los valores calculados en las ecuaciones (2.9) y (2.10) para el sistema real de 13.8kV y en las ecuaciones (2.11) y (2.12) para el modelo a escala.



**Figura II.7.** Asignación de parámetros del conductor de alimentador primario.

Después los parámetros son asignados para el elemento de carga, el cual por conveniencia se usó arbitrariamente un valor del doble de la resistencia base obtenidas en las ecuaciones

(2.6) para el sistema real de 13.8 kV y (2.7) para el modelo a escala. En caso de usar la simulación con carga resistiva ese valor de resistencia es el único requerido ya que la carga se considera netamente resistivo como muestra que se puede seleccionar la figura II.6. El valor resistivo se lo asume arbitrariamente, mientras que el valor de la inductancia se lo calcula usando triángulos de potencia.



**Figura II.8.** Triángulo de potencia. [1]

Con esto se deduce que:

$$tg(\phi) = \frac{Q}{P} \quad (II.2)$$

Considerando que todo el circuito está en serie se puede deducir que existe una sola corriente en todo el circuito. Aparte de que el ángulo  $\phi$  se puede representar en función del factor de potencia se obtiene que:

$$tg(\arccos(fp)) = \frac{X_L * I}{R * I}$$

$$tg(\arccos(fp)) * R = X_L$$

Considerando la ecuación (1.5) y despejando se obtiene que:

$$L_{carga} = \frac{tg(\arccos(fp)) * R_{carga}}{2 * \pi * f} \quad (II.3)$$

Reemplazando los valores de resistencia, frecuencia y asumiendo un factor de potencia del 0.97 se pueden encontrar los valores de las Inductancias de Carga.

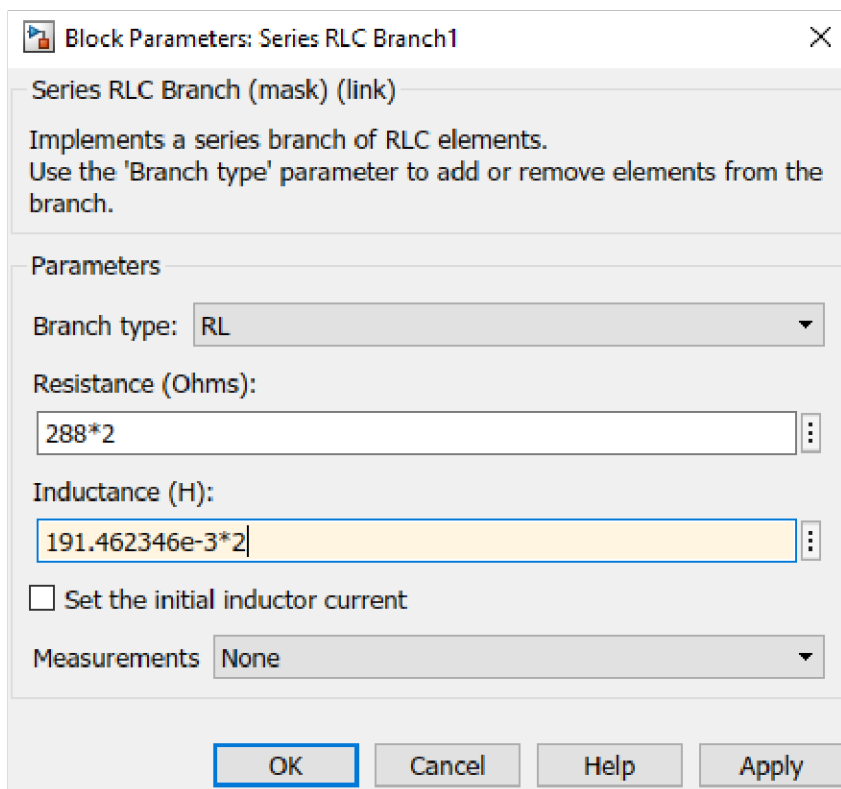
Para el sistema de 13.8 kV se obtiene que:

$$L_{carga\ real} = 5.064179 [H] = 2 * 2.532089 [H]$$

Mientras que para el modelo a escala se tiene:

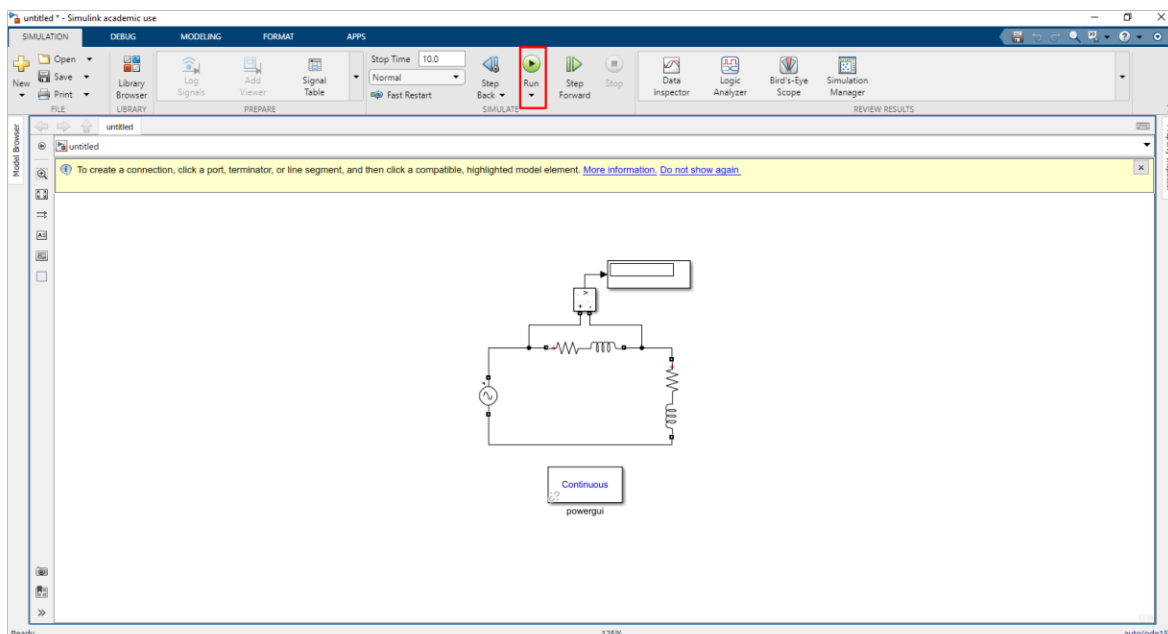
$$L_{carga\ protoMV} = 382.924691 [mH] = 2 * 191.462346 [mH]$$





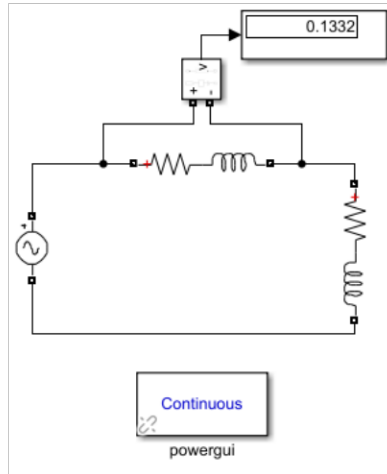
**Figura II.9.** Asignación de parámetros a la carga.

Por último, se hace correr la simulación con el botón mostrado en la figura II.10



**Figura II.10.** Botón de RUN para correr la simulación.

Y con esto se obtiene el valor de caída de voltaje en el circuito.



**Figura II.11.** Resultado de la simulación.

## ANEXO III

En este anexo se explicará cómo se modela el calibre del conductor ACSR 1/0 AWG, como base se utiliza la simulación de CYME realizada por los Ings. Llumiuinga y Jiménez, esta simulación ya contiene los valores de conductores para los casos secundarios por lo que el modelado será específicamente para el conductor para el A/P.

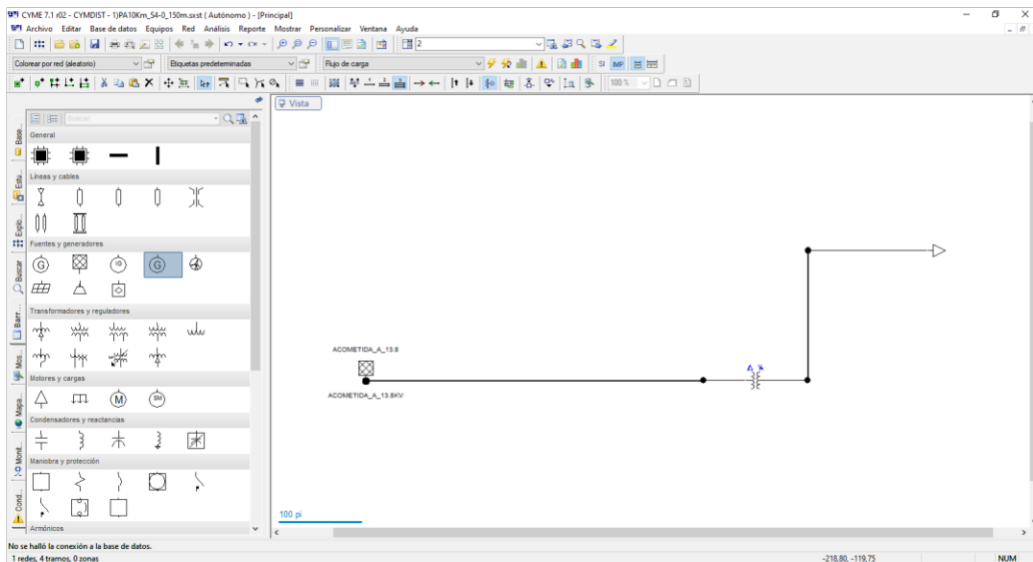


Figura III.1. Simulación Base del sistema de 13.8 kV en CYME.

Para poder crear un nuevo cable conductor, se debe abrir la pestaña donde dice equipos, y en esta se debe seleccionar la opción que dice conductor. Como lo muestra la figura III.2.

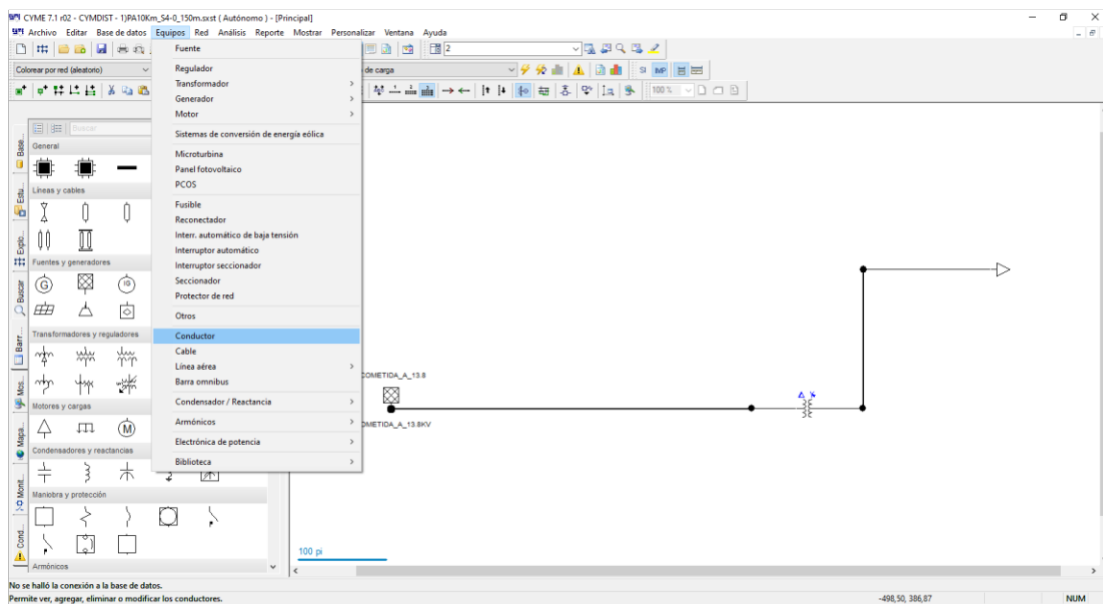
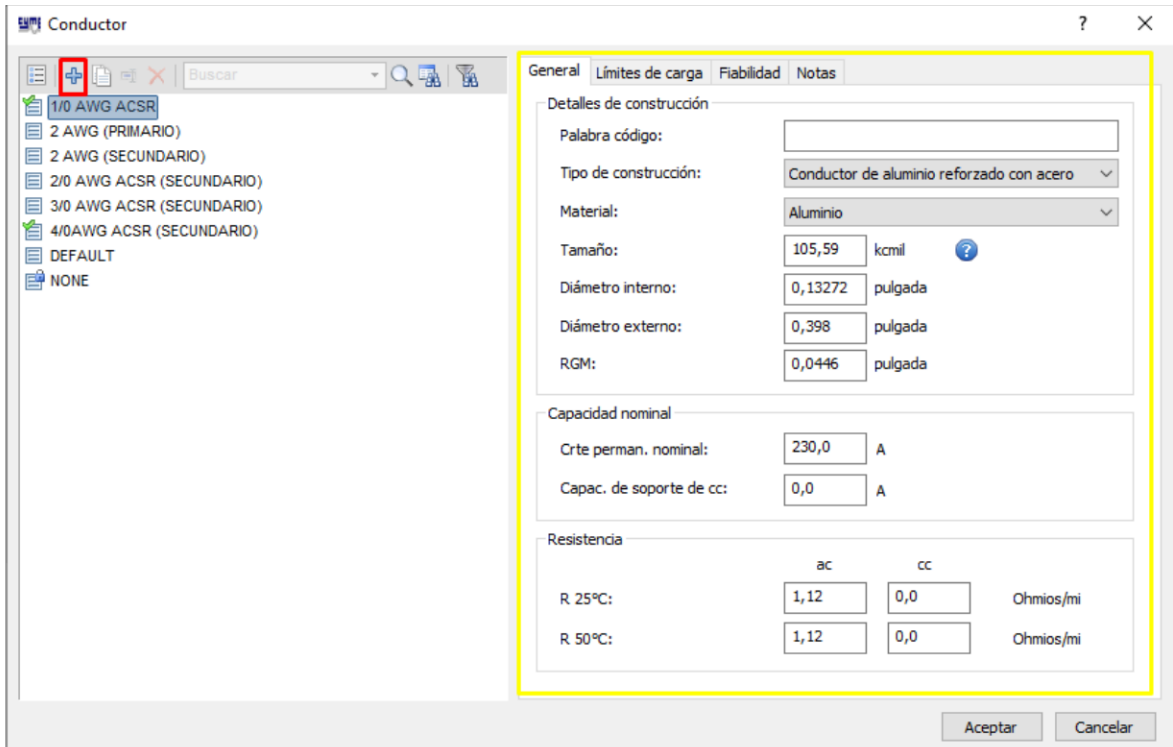


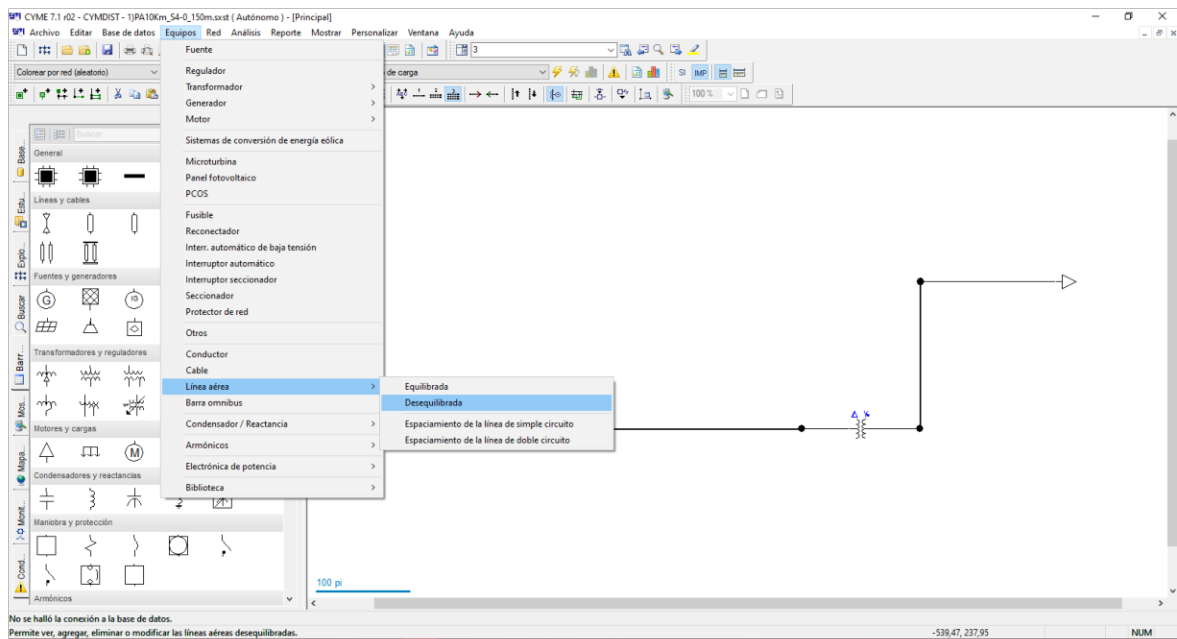
Figura III.2. Lista de elementos que conforman el sistema de distribución.

Una vez abierto la pestaña, se procede a crear un nuevo elemento, para eso se debe seleccionar la opción del “+” que muestra la figura III.3 con un color rojo. Al haber creado un nuevo elemento, se debe escribir los parámetros necesarios, los cuales están encerrados en un cuadrado amarillo en la figura III.3, los parámetros a llenar se encuentran en tablas, para el caso del ACSR 1/0 AWG lo se puede encontrar resumido en la tabla 2.1 del presente proyecto



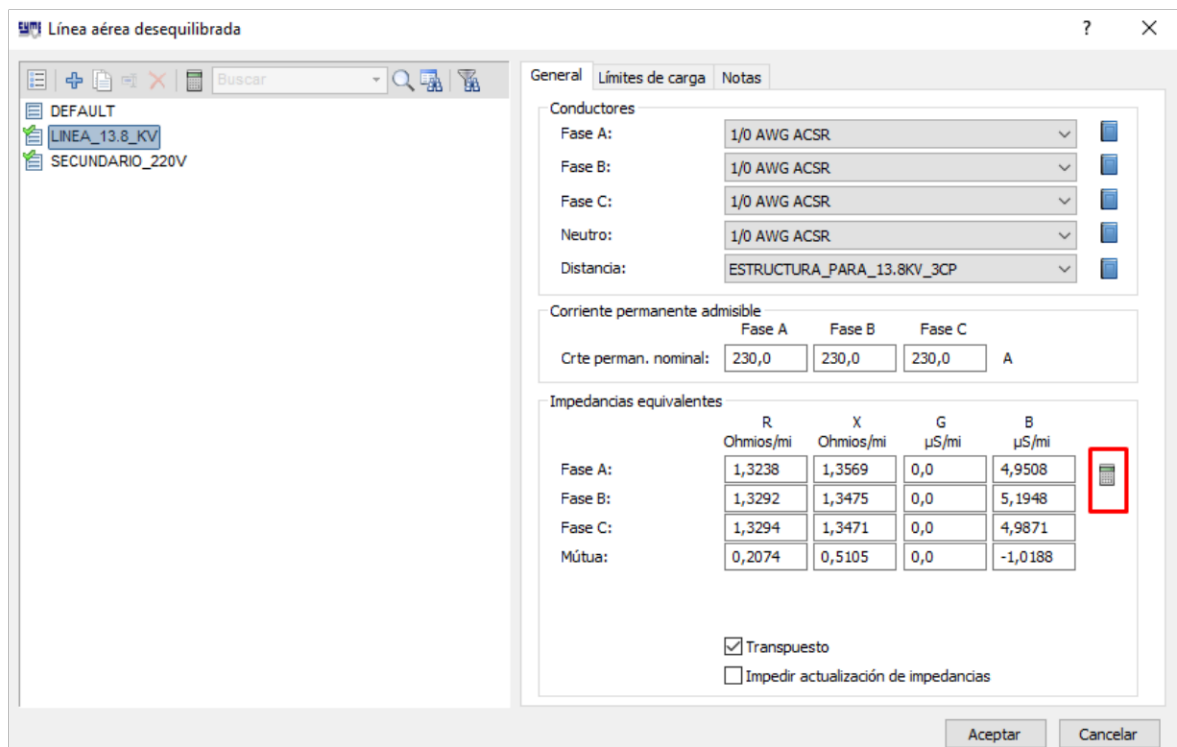
**Figura III.3** Asignación de parámetros al conductor 1/0

Al ya tener modelado los valores, se debe ir nuevamente a equipos, pero se selecciona la opción de líneas aéreas y por ultimo se selecciona la opción de desequilibradas.



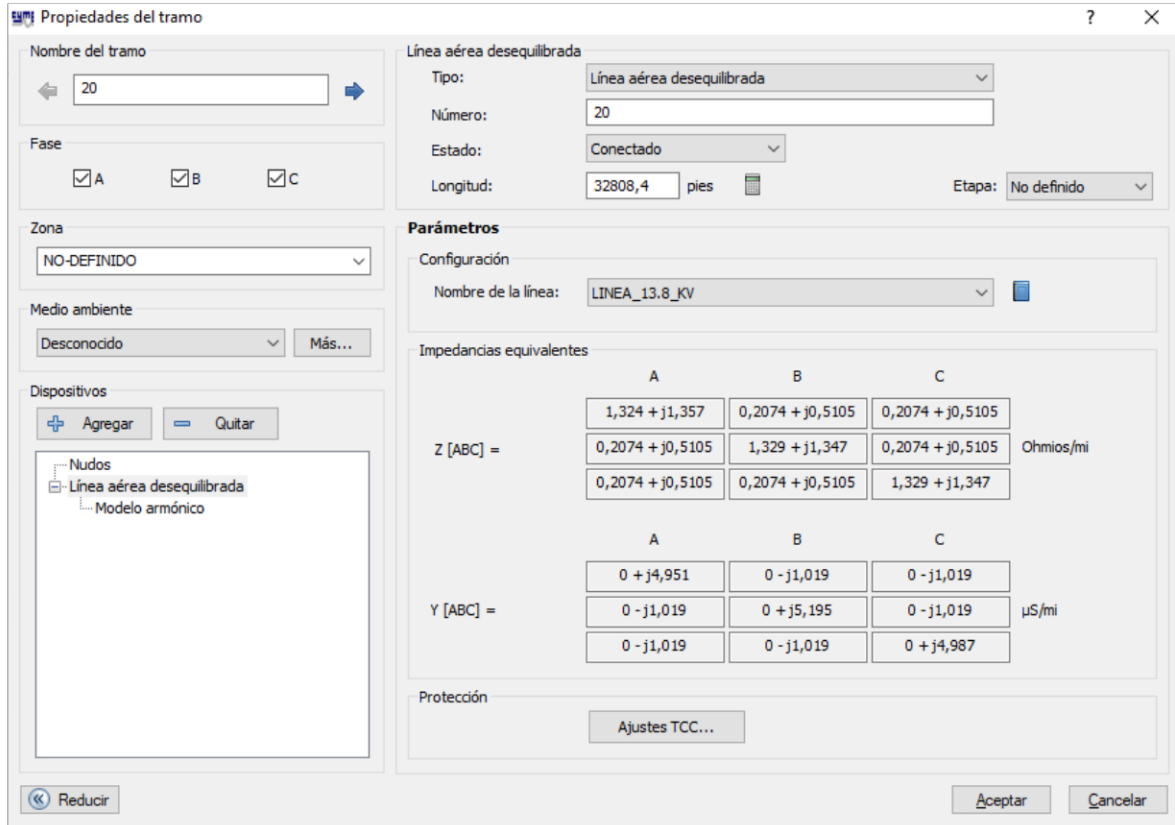
**Figura III.4.** Lista de elementos y tipos de líneas aéreas.

Una vez ingresada a esa pestaña se debe seleccionar los conductores para las fases y el neutro, así como el tipo de estructura que se tiene, para este caso la 3CP. Luego se debe dar click a la calculadora señalada en rojo en la figura III.5 para modificar los valores de R, X, G y B.



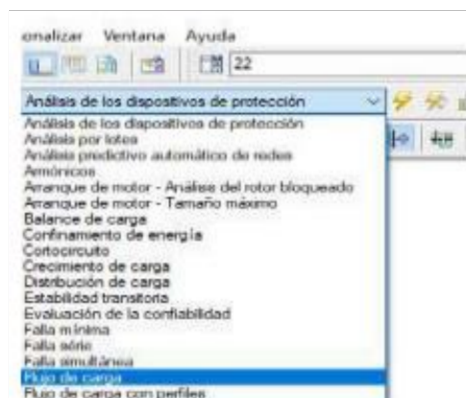
**Figura III.5.** Selección de parámetros para el alimentador primario.

Al concluir este procedimiento se puede seleccionar la línea que representa el alimentador primario en la simulación y se puede observar los parámetros eléctricos mediante la matriz impedancia de fases.



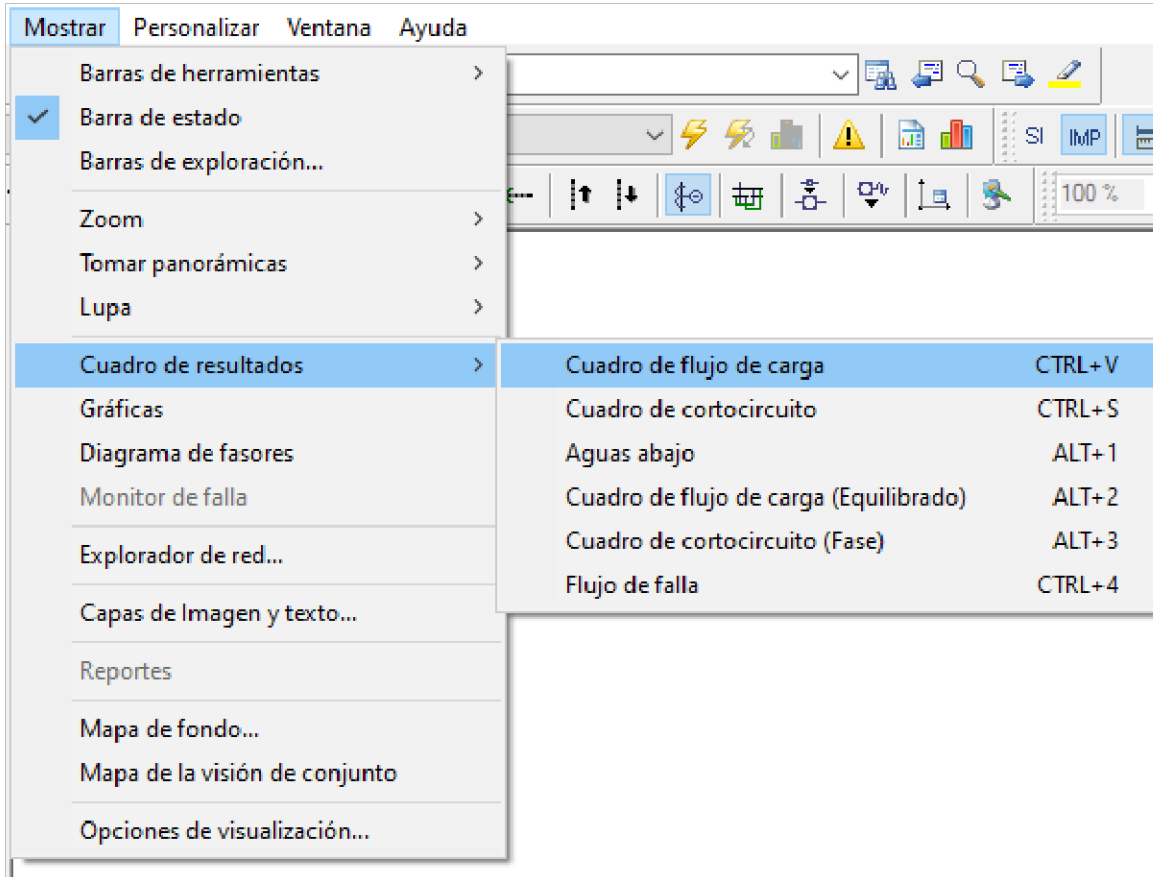
**Figura III.6.** Visualización de los parámetros eléctricos del A/P.

Con todos los elementos modelados y con las impedancias de los conductores en medio y bajo voltaje, se procede a correr un flujo de carga, para simular los voltajes existentes en los elementos.



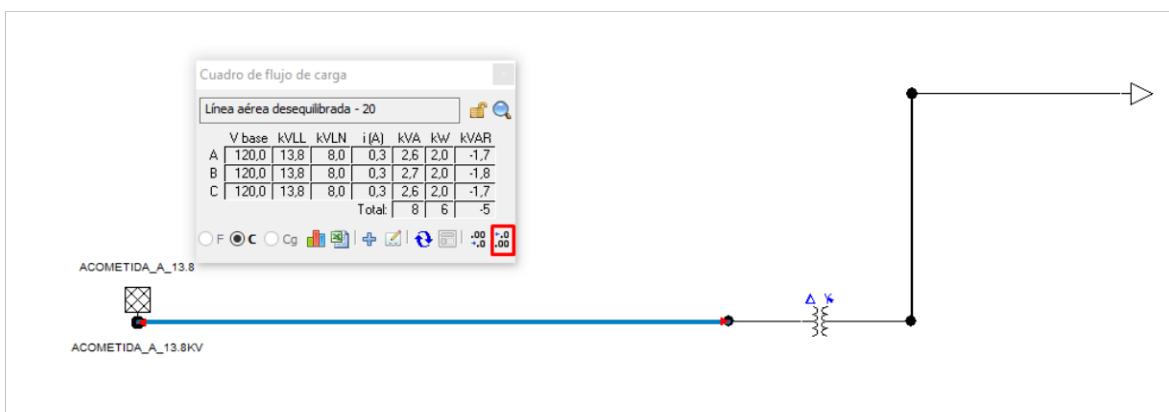
**Figura III.7.** Pestaña donde se encuentra la opción flujo de carga.

Finalmente, para poder visualizar los valores obtenidos del flujo de carga, se debe buscar en la barra de herramientas la opción mostrar, ingresar a cuadro de resultados y por último seleccionar “Cuadro de flujo de carga”, como muestra la figura III.8



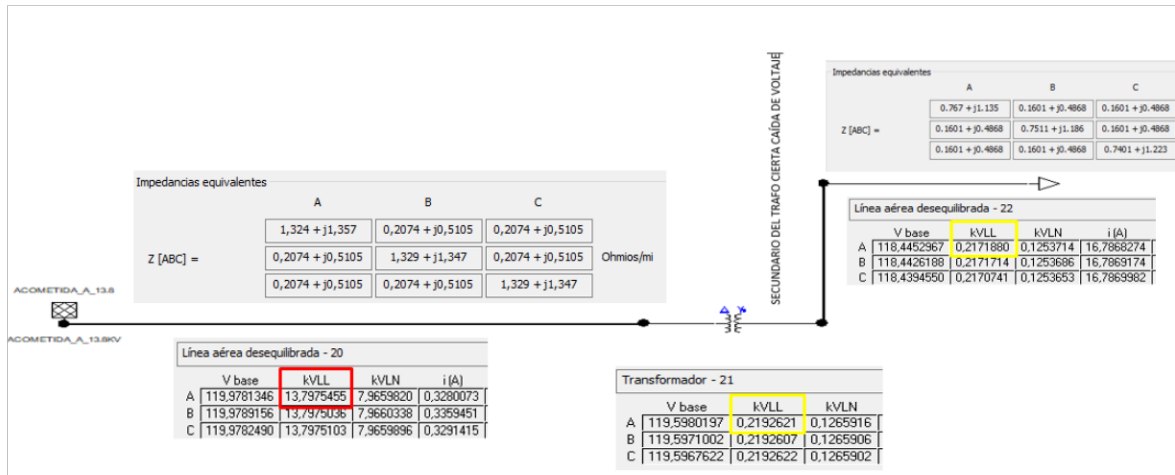
**Figura III.8.** Pestaña donde se encuentra la opción para visualizar los resultados.

Con esto se desplegará una pestaña con los resultados del elemento que se este seleccionando en ese momento, en la figura III.9 el alimentador primario, y al seleccionar la opción marcada en rojo se podrá encontrar un mayor número de decimales.



**Figura III.9.** Resultado del flujo de carga para el A/P.

Con estos valores obtenidos es posible visualizar las corrientes que circulan por los conductores en el A/P y en el C/S, y mediante un cálculo sencillo se puede encontrar las caídas de voltaje, en la figura III.10 se encuentran resumidas los cuadros de flujos de carga en los elementos necesarios para hacer dicho cálculo.



**Figura III.10.** Resumen de cuadros de flujos de carga en la simulación.

Para el lado de medio voltaje se dice que el voltaje línea-línea que emite la fuente es de los 13.8 kV exactos, y al final del A/P es el resultado que se tiene en la figura III.10 marcada de rojo, por lo que al restarlas se obtiene que la caída de voltaje en el alimentador primario es de:

$$\Delta V = 13800 - 13797.5455 = \mathbf{2.4545V}$$

Para calcular la caída de voltaje en el circuito secundario, se obtiene el valor de voltaje que el transformador tiene en sus bornes de bajo voltaje, y el voltaje al final del conductor en el C/S, estos en la figura III.10 están marcados de amarillo, y al realizar nuevamente una sencilla resta, se determina que el valor de caída de voltaje para el circuito secundario es de:

$$\Delta V = 219.2621 - 217.188 = \mathbf{2.0741V}$$

Estos valores obtenidos son para el caso 1, es decir un conductor de A/P calibre ACSR 1/0 AWG con 10 km de distancia y un conductor calibre ASCR 4/0 AWG con distancia de 100 m para el circuito secundario, y se alimenta una carga de 2 kW.



## ANEXO IV

**Tabla IV.1** Resultados de la Simulación en CYME

No	Caso	$\Delta V_{Pri\_CYME}$ [V]	$\Delta V_{Scu\_CYME}$ [V]	Voltaje p.u Primario	Voltaje p.u Secundario	Ip.u_primario	Ip.u_secundario	I_CYME_prim [A]	I_CYME_secun [A]
1	PA10Km_S4-0_150m	2,45	2,07	0,000177536	0,009409091	0,156835564	0,127946287	0,3281	16,7886
2	PA10Km_S4-0_200m	2,47	2,78	0,000178986	0,012636364	0,156739962	0,128339532	0,3279	16,8402
3	PA10Km_S4-0_250m	2,5	3,48	0,000181159	0,015818182	0,15676912	0,128749543	0,327961	16,894
4	PA10Km_S4-0_300m	2,56	4,2	0,000185507	0,019090909	0,156739962	0,129161078	0,3279	16,948
5	PA10Km_S3-0_150m	2,5	2,5	0,000181159	0,011363636	0,156931166	0,128152055	0,3283	16,8156
6	PA10Km_S3-0_200m	2,52	3,29	0,000182609	0,014954545	0,156978967	0,128634465	0,3284	16,8789
7	PA10Km_S3-0_250m	2,49	4,12	0,000180435	0,018727273	0,156931166	0,129119924	0,3283	16,9426
8	PA10Km_S3-0_300m	2,62	5,04	0,000189855	0,022909091	0,157026769	0,129732655	0,3285	17,023
9	PA10Km_S2-0_150m	2,51	2,87	0,000181884	0,013045455	0,15707457	0,128426411	0,3286	16,8516
10	PA10Km_S2-0_200m	2,5	3,92	0,000181159	0,017818182	0,157170172	0,129003323	0,3288	16,9273
11	PA10Km_S2-0_250m	2,6	4,923	0,000188406	0,022377273	0,157313576	0,129585569	0,3291	17,0037
12	PA10Km_S2-0_300m	2,61	5,9	0,00018913	0,026818182	0,157476099	0,130332429	0,32944	17,1017
13	PA10Km_S#2_150m	2,52	4,94	0,000182609	0,022454545	0,158030593	0,129587855	0,3306	17,004
14	PA10Km_S#2_200m	2,54	6,65	0,000184058	0,030227273	0,158508604	0,130738629	0,3316	17,155
15	PA10Km_S#2_250m	2,569	8,375	0,000186159	0,038068182	0,158986616	0,131825387	0,3326	17,2976
16	PA10Km_S#2_300m	2,6	10,1	0,000188406	0,045909091	0,159512428	0,132910621	0,3337	17,44

## ANEXO V

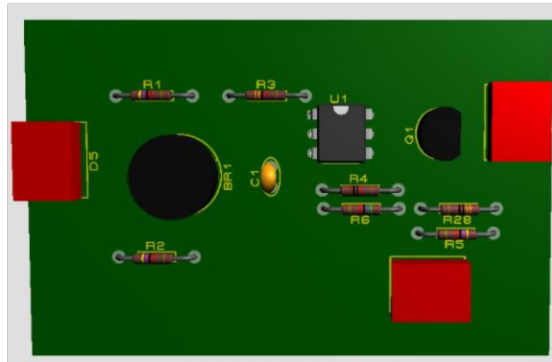


Figura V.1. Modelo 3D del circuito identificador de casos.

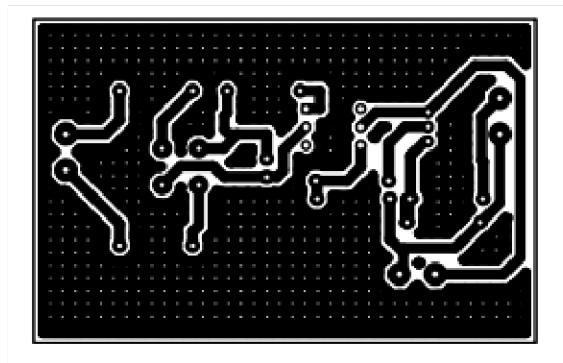


Figura V.2. Placa realizada en ARES del circuito identificador de casos.

## ANEXO VI

**Tabla V.1** Resultados obtenidos del modelo a escala del Sistema de 13.8 kV con conductor calibre ACSR 1/0 AWG

No	Caso	Primario		Secundario	
		Voltaje p.u Obtenido	Corriente p.u Obtenido	Voltaje p.u Obtenido	Corriente p.u Obtenido
1	PA10Km_S4-0_150m	0,00017375	0,1572093	0,00898787	0,12785071
2	PA10Km_S4-0_200m	0,00017869	0,15694237	0,01274962	0,12842358
3	PA10Km_S4-0_250m	0,00018108	0,15676313	0,01575728	0,12876502
4	PA10Km_S4-0_300m	0,00018571	0,15677813	0,01851818	0,1294285
5	PA10Km_S3-0_150m	0,00018128	0,15654229	0,01118734	0,12818901
6	PA10Km_S3-0_200m	0,00017821	0,15669388	0,01528601	0,12862931
7	PA10Km_S3-0_250m	0,00017836	0,15712857	0,01964923	0,12925865
8	PA10Km_S3-0_300m	0,0001872	0,15740018	0,02210507	0,12952223
9	PA10Km_S2-0_150m	0,0001741	0,15657835	0,01241298	0,12842018
10	PA10Km_S2-0_200m	0,00017676	0,15703192	0,01609548	0,12901773
11	PA10Km_S2-0_250m	0,00018671	0,15735736	0,02018297	0,12971178
12	PA10Km_S2-0_300m	0,00018627	0,15709932	0,02457349	0,13038812
13	PA10Km_S#2_150m	0,00017809	0,15804416	0,01994413	0,12987358
14	PA10Km_S#2_200m	0,00018031	0,15886792	0,02913066	0,1309508
15	PA10Km_S#2_250m	0,00017948	0,15902418	0,03747599	0,13203227
16	PA10Km_S#2_300m	0,00018293	0,15966105	0,03256615	0,13275319

## ANEXO VII



**Figura VII.1.** Interfaz de resultados caso primario ACSR 1/0 AWG, primer caso secundario, medido en el lado de medio voltaje.

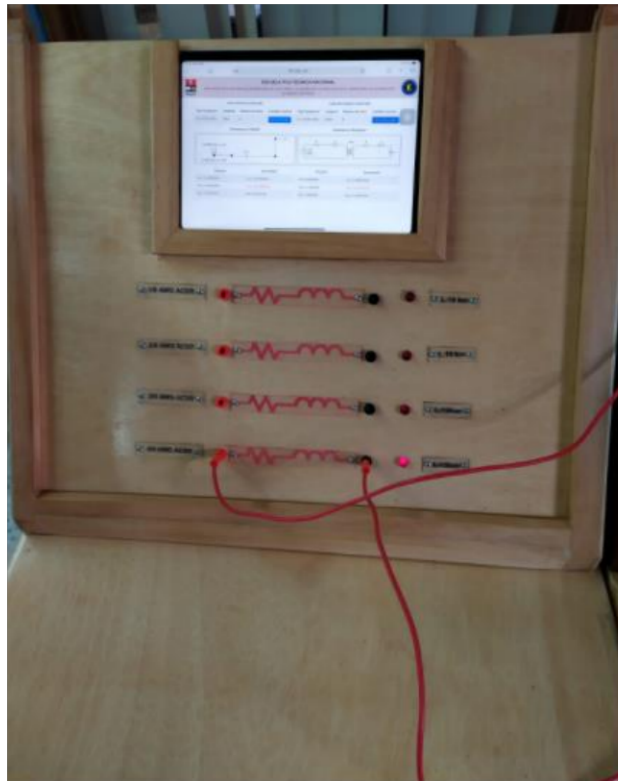


**Figura VII.2.** Interfaz de resultados caso primario ACSR 1/0 AWG, primer caso secundario, medido en el lado de bajo voltaje.

## ANEXO VIII



**Figura VIII.1.** Vista de ambos tableros en funcionamiento.



**Figura VIII.2.** Visualización del funcionamiento del nuevo tablero con su interfaz



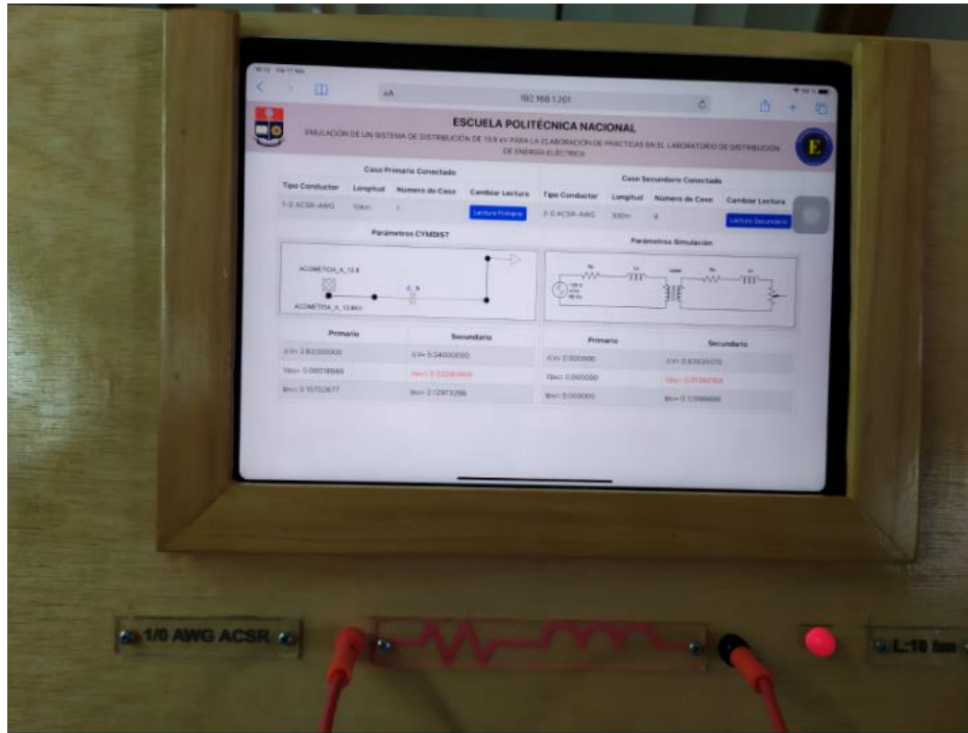


Figura VIII.3. Visualización de la interfaz vista desde el tablero.

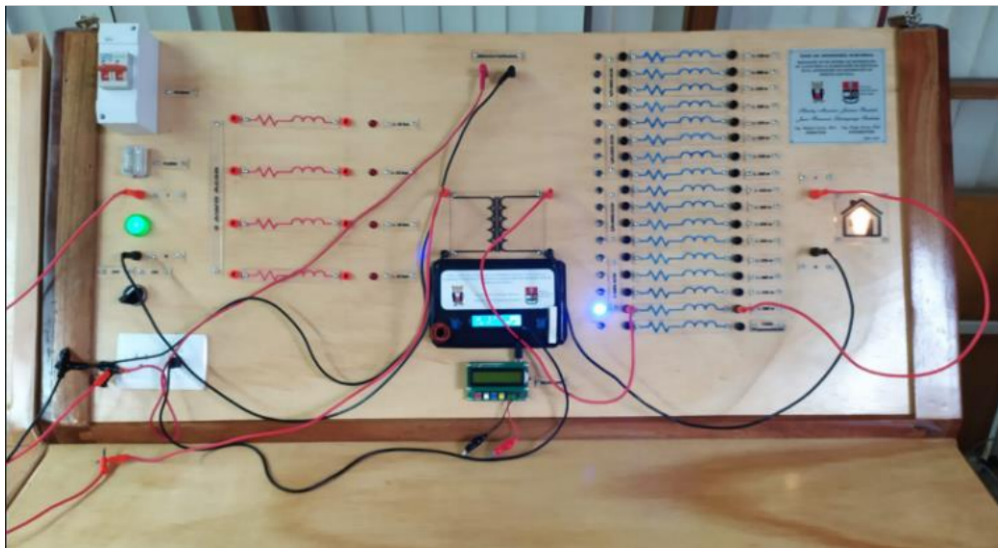
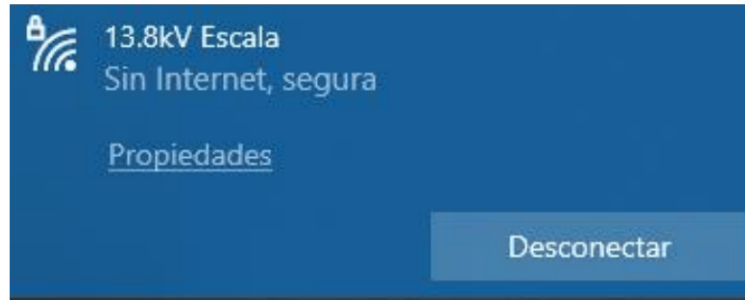


Figura VIII.4. Visualización del tablero del primer modelo conectado únicamente el lado de bajo voltaje.

## ANEXO IX

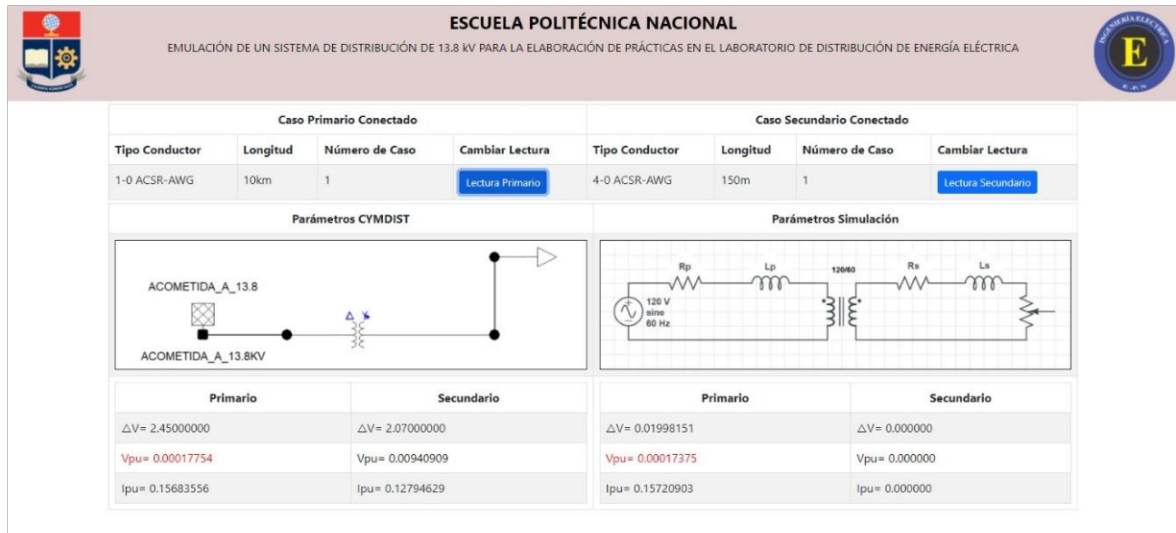
El sistema a escala posee con su propia red inalámbrica, a la cual el usuario debe conectarse. La red se llama “13.8kV Escala”, y la clave para ingresar es: “Escala13.8” (lo que está dentro de los corchetes), una vez que la red sea visible conectarse a la misma y continuar con el proceso de encendido.



**Figura IX.1.** Red inalámbrica propia del prototipo.

**NOTA:** No es necesario que la red disponga de acceso a internet.

Una vez conectado a la red inalámbrica, el usuario debe vincularse a través de una dirección IP: <http://192.168.1.201/>, en el navegador web GOOGLE CHROME, y de manera automática se dirigirá a la interfaz gráfica de resultados.



**Figura IX.2.** Interfaz gráfica direccionada desde el código IP

**Nota:** para mayor información revise la guía de usuario realizada por los Ing. Llumiquinga y Jiménez para el primer modulo del sistema a escala.