

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

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

**AMPLIACIÓN DEL EMULADOR DE A/P Y C/S CON CALIBRES DE
CONDUCTOR # 4/0 PARA A/P PARA EL LABORATORIO DE
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

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

DARWIN ALBERTO YANEZ CATOTA

darwin.yanez@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO MSc.

miguel.lucio@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, DARWIN ALBERTO YANEZ CATOTA 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.



DARWIN ALBERTO YANEZ CATOTA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DARWIN ALBERTO YANEZ CATOTA, bajo mi supervisión.



Ing. MIGUEL ANGEL LUCIO CASTRO MSc.

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.

DARWIN ALBERTO YANEZ CATOTA

Ing. MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO MSc.

DEDICATORIA

A Dios por darme la sabiduría y las fuerzas para jamás desmayar.

A mis dos madres: Fanny y María Catota.

A mi abuelo y padre Alfonso Catota.

A mi mejor amiga Mercedes Almenaba.

A mi tío que en paz descansa Milton.

A mis hermanas y mi hermano.

A todos mis tíos, tías, primos que de una u otra manera han formado parte de este logro.

Darwin Yanez C

AGRADECIMIENTO

“Esfuézate y se valiente. No temas ni desmayes, que yo soy el Señor tu Dios, y estaré contigo por donde quiera que vayas. Josué 1:9”. Son las promesas de Dios que siempre han estado en mi corazón y me han permitido llegar hasta este momento, por lo cual primeramente doy gracias de una manera infinita a mi DIOS que me ha protegido y me ha cuidado en toda mi vida y además me ha bendecido grandemente, no solo en mi trayecto como estudiante universitario sino que también he visto su mano de misericordia extendida hacia mí en todo momento dándome fuerzas y mucho ánimo cuando más sentía desmayar, también doy gracias a mis abuelitos: Alfonso y María Catota que me han inculcado en buenos caminos y me han brindado su apoyo incondicional tanto económico como moral, recordándome siempre que debo luchar por mis sueños y metas: gracias papitos, ustedes son las personas más lindas del mundo, este logro es para ustedes y para que se sientan orgullosos de tener a su primer nieto como Ingeniero Eléctrico de la Prestigiosa Escuela Politécnica Nacional.

“Lucha por tus sueños y jamás te rindas para que algún día alcances todos tus anhelos”, son las palabras que escucho decir de mi madrecita quien me dio la vida, “gracias mami Fanny” por su apoyo incondicional y a pesar de no darme todo lo que quise siempre me has brindado lo necesario, por lo que este logro va para ti con mucho amor para que te sienta orgullosa de mí.

Agradezco muy cordialmente a mi mejor amiga Mechita que me brindo su ayuda incondicional cuando más lo necesitaba, sin esperar nada a cambio. Gracias por la atención que me diste en el trayecto Universitario y por escucharme hablar de circuitos eléctricos en aquellas amanecidas donde estudiaba para un examen, eres una persona maravillosa y espero que nunca cambies.

Con todo mi corazón agradezco a mi profesor y director de Tesis Ing. Miguel Lucio quien ha demostrado ser una persona muy paciente y entregada a la ingeniería eléctrica impartiendo todos sus conocimientos hacia sus estudiantes quienes tenemos el honor de conocerlo. Así también agradezco con mucho cariño a todos mis compañeros de clase con quienes hemos compartido muchas experiencias especialmente al Ing. Andrés López Quien ha sido un amigo más que un compañero de clase.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 EL SISTEMA DE DISTRIBUCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA DENTRO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	3
1.4.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	4
1.4.3 TIPOS DE LINEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	5
1.4.4 LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.....	6
1.4.5 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MEDIANA	6
1.4.5.1 Circuito equivalente pi (π).....	7
1.4.5.2 Circuito equivalente T	7
1.4.6 LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA	8
1.4.6.1 Circuito equivalente de la línea de transmisión corta	8
1.4.7 EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO UNA LINEA DE TRANSMISION CORTA	9
1.4.8 PARÁMETROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA	9

1.4.9	RESISTENCIA.....	11
1.4.9.1	Influencia del efecto piel sobre la resistencia.....	13
1.4.10	INDUCTANCIA DE UN CONDUCTOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	14
1.4.10.1	Reactancia inductiva.....	14
1.4.11	TIPOS DE CONDUCTORES.....	15
1.4.11.1	Conductor de aluminio AAC.....	16
1.4.11.2	Conductor de aluminio AAAC.....	16
1.4.11.3	Conductor de aluminio ACAR.....	16
1.4.11.4	Conductor de aluminio ACSR.....	16
1.4.12	TOPOLOGÍAS DE LAS REDES PRIMARIAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN	17
1.4.12.1	Red primaria tipo radial.....	17
1.4.12.2	Red primaria tipo anillo.....	17
1.4.12.3	Red primaria tipo mallado.....	18
1.4.13	MÉTODO APROXIMADO PARA CAIDA DE VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	19
1.4.14	IMPEDANCIA SERIE DE LINEAS DE DISTRIBUCION AEREAS.....	21
1.4.14.1	Impedancia serie de líneas aéreas.....	21
1.4.14.2	Líneas de distribución no transpuestas.....	23
1.4.14.3	Ecuaciones Carson.....	23
1.4.14.4	Ecuación modificada de Carson.....	25
1.4.14.5	Matriz de impedancia primitiva para líneas aéreas.....	25
1.4.14.6	Matriz de impedancia de fase y reducción de Kron.....	26
1.4.15	MEDICIÓN INALÁMBRICA PARA EL PROTOTIPO.....	27
1.4.15.1	Módulo ESP32-C3.....	27
1.4.15.2	Servidor web.....	28
1.4.15.3	Api Rest.....	28
2	METODOLOGÍA.....	29

2.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ACSR INVOLUCRADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO	29
2.2	DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA EL CONDUCTOR 4/0 AWG.	30
2.2.1	ESTRUCTURA UTILIZADA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO.....	30
2.2.2	SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES DE FASE Y NEUTRO PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO	30
2.2.3	DISTANCIA MEDIA GEOMÉTRICA PROPIA Y ENTRE CONDUCTORES	31
2.2.4	IMPEDANCIA PROPIA Y MUTUA DE LA ESTRUCTURA 3CP	33
2.2.5	MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE ALIMENTADOR PRIMARIO.....	34
2.2.6	MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE CIRCUITO SECUNDARIO	36
2.3	ESCALAMIENTO EN PU PARA ENCONTRAR LOS VALORES DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA MISMOS QUE SE ACOPLAN EN EL MÓDULO A ESCALA	38
2.3.1	DETERMINACIÓN DE IMPEDANCIA BASE TANTO DEL SISTEMA REAL DE 13.8KV COMO DEL PROTOTIPO DE 120V.	38
2.3.2	DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA REAL EN EL PROTOTIPO TANTO PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO EL CIRCUITO SECUNDARIO.....	40
2.3.3	OBTENCIÓN DE LA CARGA EN EL PROTOTIPO.....	42
2.4	CAÍDAS DE VOLTAJE	43
2.4.1	CALCULO DE CAÍDA DE VOLTAJE USANDO EL FACTOR DE CAÍDA DE VOLTAJE O FCV	43
2.4.2	TRANSFORMACIÓN AL SISTEMA EN (p.u.) DE LA CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA EL CASO DE CYMDIST Y PROTOTIPO	44
2.5	DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO EN POR UNIDAD (p.u.)	46
2.5.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL IDENTIFICADOR DE CASOS	47
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49

3.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON CYME RELACIONADOS A LA CAÍDA DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL FCV.....	49
3.2	TABLAS DE CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDAS EN EL PROTOTIPO Y CYMDIST PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO	50
3.3	TABLAS DE CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDAS EN EL PROTOTIPO Y CYMDIST PARA EL CIRCUITO SECUNDARIO.....	51
3.4	CONCLUSIONES.....	53
3.5	RECOMENDACIONES	56
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5	ANEXOS.....	59

RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular se diseña y construye un prototipo a escala de un alimentador primario de distribución de 13.8kV. Dado que en el laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica ya se encuentra disponible el módulo emulador de 13.8kV a 220V, cuyo alimentador primario está diseñado para el conductor número 2 ACSR AWG, lo que se hace es expandir el prototipo en el área del circuito primario, conectando el conductor 4/0 ACSR AWG con una longitud correspondiente a un vano de 15 km.

El alimentador primario que representa al conductor 4/0 ACSR, mismo que se encuentra presente en el sistema a escala, fue diseñado a partir de la obtención de los resultados referentes a la matriz de impedancia por fase arrojados por el software de simulación Cymdist de Cyme, donde considera los parámetros más importantes dentro de un sistema de distribución real tales como la temperatura, la separación de conductores, efecto piel, entre otros. Con la ayuda del sistema en por unidad (p.u.), se logra representar los parámetros reales de resistencia e inductancia pertenecientes al software de simulación Cymdist y convertirlos a un equivalente proporcional en bajo voltaje que posee el prototipo, donde se utiliza una fuente estabilizadora de 120V.

Para la construcción de la parte resistiva de la línea, se hizo uso de una resistencia de potencia, mientras que para la inductancia se construyó utilizando una bobina toroidal. Los resultados de caída de voltaje son expresados mediante el sistema en por unidad (p.u.) y visualizados en un computador mediante la interfaz inalámbrica que posee el prototipo emulador.

PALABRAS CLAVE: prototipo a escala, alimentador primario de distribución, matriz de impedancia por fase, temperatura, separación de conductores, efecto piel, resistencia, inductancia, interfaz inalámbrica, bobina toroidal, sistema en por unidad (p.u.).

ABSTRACT

In this curricular integration work, a scale prototype of a 13.8kV primary distribution feeder is designed and built. Given that the emulator module from 13.8kV to 220V is already available in the Electric Power Distribution laboratory, whose primary feeder is designed for conductor number 2 ACSR AWG, what is done is to expand the prototype in the area of the primary circuit connecting the 4/0 ACSR AWG conductor with a length corresponding to a span of 15 km.

The primary feeder that represents the 4/0 ACSR conductor, which is present in the system to scale, was designed based on obtaining the results regarding the phase impedance matrix produced by Cyme's Cymdist simulation software where it considers the most important parameters within a real distribution system such as temperature, conductor separation, skin effect, among others. With the help of the system in per unit (pu), it is possible to represent the real parameters of resistance and inductance belonging to the Cymdist simulation software and convert them to a proportional equivalent in low voltage that the prototype possesses, where a 120V stabilizing source is used.

For the construction of the resistive part of the line, a power resistance was used, while for the inductance it was built using a toroidal coil. The voltage drop results are expressed by the system in per unit (p.u.) and displayed on a computer through the wireless interface that the emulator prototype has.

KEYWORDS: scale prototype, primary distribution feeder, phase impedance matrix, temperature, conductor separation, skin effect, resistance, inductance, wireless interface, toroidal coil, per unit (p.u.) system.

1 INTRODUCCIÓN

Las empresas Distribuidoras de Energía Eléctrica son las encargadas de llevar la energía recibida desde las generadoras o transmisoras hacia el consumidor final en condiciones favorables de voltaje, frecuencia y calidad dentro de los parámetros regulatorios que establece CONELEC – 004/01 [1]. Debido a que la calidad del producto suele ser afectada por las caídas de voltaje y las pérdidas de potencia que se presentan en los alimentadores primarios de distribución, se realiza el estudio técnico de un alimentador primario de 13.8 kV con conductor número 4/0 AWG ACSR, el cual transporta el flujo de potencia desde la subestación hasta los transformadores de distribución los cuales reducen el voltaje a un nivel adecuado para el consumo energético que se presentan en las viviendas y la industria.

En vista de que el estudio del sistema de Distribución de energía es muy importante, se ha considerado construir un módulo emulador el cual complementa al laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica. El módulo emulador posee un alimentador primario de 13.8 kV con distintos calibres de conductores los cuales están distribuidos desde el número 2, 1/0, 2/0, 3/0, 4/0 AWG ACSR, el cual tiene la capacidad de conectarse hacia un transformador de distribución mediante borneras. Para el circuito secundario al igual que el alimentador primario se dispone de diferentes calibres de conductores y distintas distancias los cuales servirán para identificar las caídas de voltaje que se presentan en los conductores del circuito secundario mismos que estarán conectados a una carga resistiva que representaría la carga del sistema.

En este proyecto se hace referencia al alimentador primario de 13.8 kV con conductor número 4/0 AWG ACSR, el cual posee una longitud de 15 km, mismo que servirá para analizar las caídas de voltaje y los distintos parámetros que afectan al transporte de flujo de potencia de forma eficiente. Con los estudios realizados y la implementación del módulo emulador, el estudiante de laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica tendrá la capacidad de identificar de forma didáctica los distintos problemas que se pueden presentar en una red de distribución, así como poner en práctica sus habilidades profesionales y hallar las soluciones respectivas para disminuir al máximo las caídas de voltaje y las pérdidas de potencia que se tienen en los alimentadores primarios y con ello implementar el mejor conductor que corresponda disminuyendo costos y efectuando un mejor trabajo dentro del campo laboral cuando se requiera.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo Emulador de un alimentador primario de 15 km conectado a la red de 13.8 kV con calibre de conductor número 4/0 AWG ACSR el cual posteriormente será acoplado al Sistema de Distribución a escala de 13.8kV que se tiene en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y construir un módulo emulador para un alimentador primario de calibre número 4/0 AWG ACSR, utilizando únicamente la impedancia propia del conductor $R+jX$ considerando el modelo de línea de transmisión corta.
2. Establecer los parámetros eléctricos a escala para el alimentador primario de calibre número 4/0 AWG ACSR a través de su modelo en por unidad (p.u).
3. Obtener los datos de medición de caída de voltaje y corriente en el nuevo módulo emulador y mostrarlos en tiempo real a través del programa de medición inalámbrica propia del sistema a escala para que sean comparados con datos obtenidos a través de simulación.

1.3 ALCANCE

Dentro de los estudios encontrados, se procede a ejecutar un equivalente a escala del sistema de distribución de energía eléctrica de 13.8kV, con conductor número 4/0 AWG ACSR, cuyas variables analizadas se asemeja a una línea de transmisión corta con una distancia aproximada de 15 km, donde los parámetros a analizar son resistencia e inductancia.

Estos parámetros tienen validación en el software de simulación CYME, los cuales arrojan resultados precisos de caídas de voltaje y flujos de potencia para el estudio del sistema de distribución, mismo que servirán para transformar los parámetros reales a un equivalente a escala los cuales serán acoplados en el módulo físico que se tiene actualmente en el Laboratorio de Distribución de Energía Eléctrica construido por los Ingenieros: Jiménez y Llumiquinga.

Es importante mencionar que el alcance de este proyecto tiene mucho que ver con el sistema en por unidad, ya que es difícil y peligroso construir un módulo con parámetros reales tanto de resistencia e inductancia, así como la manipulación de medio voltaje y obtención del calibre del conductor, debido a que se necesitaría un mayor espacio físico para la construcción de este proyecto. Por lo que el sistema en por unidad (p.u.) nos ayuda a convertir dichos parámetros reales los cuales se obtienen en las redes de distribución a

un equivalente de menor voltaje, mismo que puede ser manipulado con seguridad dentro de modulo a escala.

Para los resultados obtenidos dentro del sistema a escala se implementará una Tablet, la cual mostrara las mediciones en tiempo real, tanto de voltaje y de corriente que circula por el sistema, mismo que serán enviados mediante una interfaz inalámbrica “Wifi” a un computador para posteriormente analizar dichos resultados.

En consecuencia, se implementará un sistema de distribución de 13.8 kV con conductor número 4/0 AWG ACSR a escala cuyos parámetros a estudiar son resistencia e inductancia los cuales influyen en su totalidad en las caídas de voltaje y perdidas de potencia dentro del sistema de Distribución de Energía Eléctrica.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 EL SISTEMA DE DISTRIBUCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA DENTRO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

El Sistema Eléctrico de Potencia más conocido como SEP dentro de la Ingeniería Eléctrica, está compuesto por una o varias redes eléctricas en las cuales se encuentran conectados diferentes dispositivos y equipos eléctricos cuya función es permitir que la energía generada por el sistema de generación fluya mediante las líneas de transmisión hasta llegar a las subestaciones eléctricas de distribución las cuales cumplen con la función de redirigir la energía hacia las viviendas y las principales cargas de consumo energético del país [2].

Dentro del SEP nos encontramos con el sistema de Distribución el cual está encargado de llevar la energía hacia los consumidores finales tales como los hogares y las industrias mediante las redes de distribución quienes están conformados por una subestación de distribución, Aisladores, herrajes, transformadores, Conductores, Medidores, estructuras de soporte, protecciones etc. La energía parte desde la subestación de Distribución mediante un Alimentador Primario (A/P) y dependiendo del tipo de uso que se vaya a dar, el Alimentador Primario puede ser: Expreso, Troncal o de Distribución. Los A/P por lo general están conectados a los Transformadores de Distribución mismos que se encargan de disminuir el voltaje a un nivel más seguro el cual pueda ser manipulado con responsabilidad. Una vez que el voltaje es reducido se conecta a la red secundaria o conocido como circuito secundario, mismos que llevan la energía mediante las acometidas hacia los medidores para posteriormente ser consumida por las respectivas cargas eléctricas existentes dentro del SEP [2].

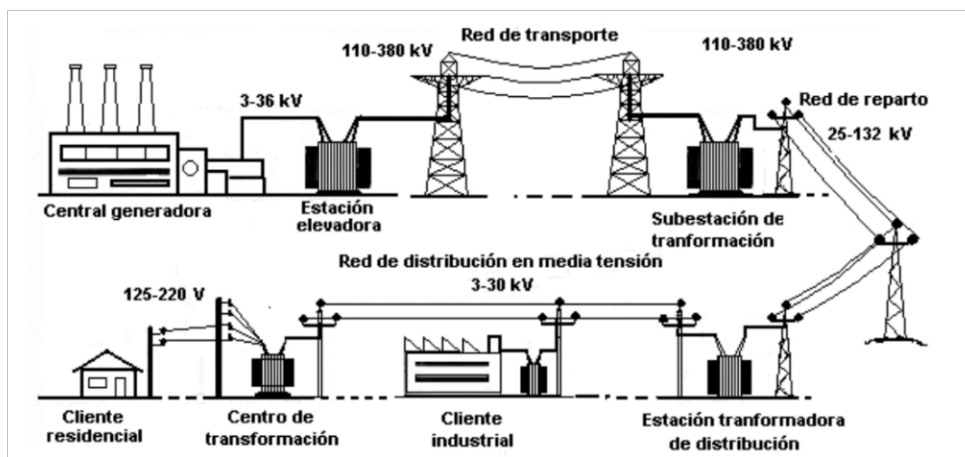


Figura 1.1. Esquema de un Sistema Eléctrico Potencia [3].

1.4.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema de distribución es la parte esencial del sistema de potencia ya que cumple con la función de llevar la energía eléctrica desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales, en perfectas condiciones de voltaje y factor de potencia, donde la energía por fin será consumida [4].

La energía que llega a las subestaciones eléctricas es redirigida mediante las líneas de medio voltaje hacia los transformadores de distribución, dichas líneas de distribución pueden ser aéreas o subterráneas. En este trabajo de titulación, se hace referencia exclusivamente a las líneas aéreas de medio voltaje las cuales suelen estar a una altura superior de 7 metros y pueden llegar hasta los 18 metros, mismas que suelen estar sostenidas por apoyos que pueden ser torres metálicas o torres de hormigón armado, las cuales cuentan con un único conductor por fase y hasta 4 circuitos por cada apoyo [4].

Un sistema de distribución perteneciente a una red aérea está constituido por:

- Una subestación de distribución la cual posee transformadores, seccionadores, interruptores, etc. Cuya función es reducir los niveles de voltaje provenientes de las redes de subtransmisión hasta los niveles de voltaje de media tensión las cuales son distribuidas en múltiples salidas [3].
- Circuito primario: conformados por una red trifásica principal, los cuales se distribuyen por los sectores urbanos y rurales, cuya función es transportar la energía desde la subestación de distribución hasta los transformadores de distribución, en Ecuador los voltajes de los alimentadores primarios o conocidos también como circuitos primarios suelen ser de: 6.3, 13.8, 22.8 y 34.5 kV, están

constituidos como medio voltaje según la resolución ARCONEL - 018/18, cuyos valores están establecidos entre: 0.6 kV y menor igual a 40 kV [5].

- Transformadores de distribución: cumplen con la función de reducir el voltaje de distribución (6.3, 13.8, 22.8, 34.5 kV) los cuales se encuentran en los alimentadores primarios, hasta un voltaje inferior mismos que se establecen en los rangos de 1V a 0.6 kV según la resolución ARCONEL 018/18, dichos voltajes se distribuyen mediante los circuitos secundarios permitiendo así la conexión del usuario y la red de baja tención de la empresa distribuidora. Los voltajes por lo general suelen ser de 110, 220, 440 V según sea el caso requerido por la industria o residencia [5].

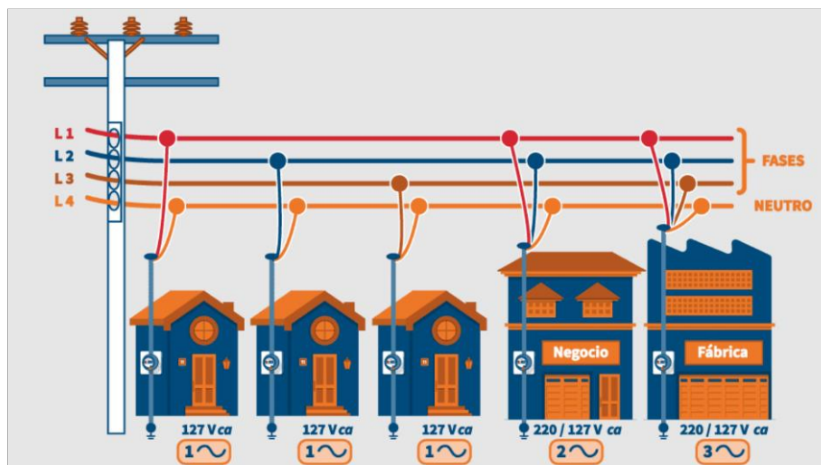


Figura 1.2. Circuito secundario de una red de distribución [2].

1.4.3 TIPOS DE LINEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Las líneas de transporte de energía eléctrica son el medio principal por el cual circula el flujo de potencia desde las generadoras eléctricas hasta los centros de carga, utilizando las líneas de Transmisión, Subtransmisión y Distribución. Este tipo de líneas se diferencia por el nivel de voltaje que transportan, es decir, en Ecuador la transmisión se establece en 138, 230 y 500 kV, mientras que la subtransmisión se establece en su mayoría en 69 kV y la red de distribución la cual se encuentra encargada por las empresas distribuidoras se establece desde los 6.3 kV hasta los 34,5 kV.

Las líneas de transmisión se diferencian por su longitud las cuales pueden ser largas, medianas o cortas, se caracterizan por cuatro parámetros eléctricos importantes: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia, mismos que se encuentran distribuidos a lo largo de la línea de transmisión las cuales son más apreciables en las líneas largas [6].

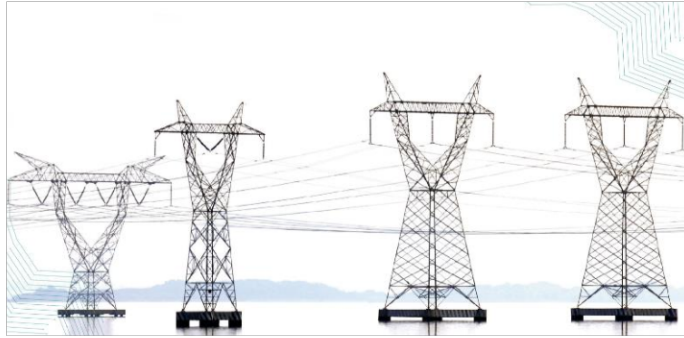


Figura 1.3. Línea de transmisión suspendida en distintas torres eléctricas [4]

1.4.4 LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA

Las líneas largas de transporte de energía son aquellas que están formadas por conductores que atraviesan una longitud por encima de los 240 km, por lo que, para obtener una solución más exacta en el estudio de este tipo de líneas de transmisión de 60 Hz, es importante considerar que los parámetros de la línea no están concentrados en el centro del modelo como se lo hace en las líneas medianas y cortas, sino que están distribuidos de forma uniforme en toda la línea [7].

El circuito equivalente “ π ” no considera que los parámetros de la línea estén distribuidos uniformemente, por lo tanto, no representa exactamente una línea de transmisión larga. La diferencia entre el circuito equivalente π y la línea real se evidencia mientras la longitud de la línea de transmisión se incrementa. A pesar de que el equivalente π no representa a una línea de transmisión larga, es posible encontrar el circuito equivalente y ajustarlo con mayor precisión mediante la utilización de una red con parámetros concentrados [7].

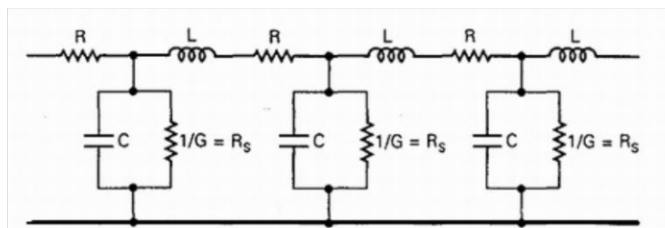


Figura 1.4. Circuito equivalente de una línea de transmisión larga [7]

1.4.5 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MEDIANA

Son consideradas de esta manera ya que su longitud varía entre los 80 y 240 km. Para representar este tipo de líneas es suficiente con obtener la resistencia R y la inductancia L como parámetros concentrados, además de incluir la capacitancia pura, cuya admitancia puede estar concentrada en el centro del modelo llamándose así el equivalente T o a su vez puede estar distribuida en dos mitades iguales colocándose en los extremos del circuito

equivalente tanto de envío como el de recepción respectivamente formando el equivalente Pi (π) [7].

1.4.5.1 Circuito equivalente pi (π)

La admitancia se divide en dos partes iguales y se las coloca en los extremos del modelado, mientras que R y L se encuentran conectados en serie como parámetros concentrados formando así el equivalente Pi como se observa en la figura 1.5 [8].

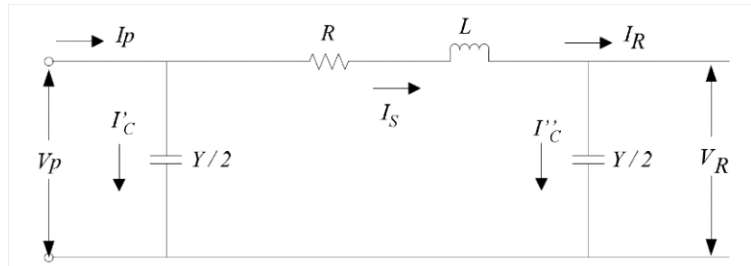


Figura 1.5. Circuito equivalente π de una línea de transmisión mediana [8]

Donde:

I_p : corriente en el extremo de envío.

V_p : voltaje en el extremo de envío.

R, L : constituyen el valor de impedancia de la línea de transmisión media.

I_R : corriente en el extremo del receptor.

V_R : voltaje que se tiene en el extremo del receptor.

I_s : corriente que circula por la equivalente serie de la L/T media.

I'_C : corriente que circula por el ramal del extremo de envío.

I''_C : corriente que circula por el ramal del extremo de recepción.

$Y/2$: admitancia la cual se encuentra dividida en dos partes en el circuito equivalente π [8].

1.4.5.2 Circuito equivalente T

La admitancia pura se concentra en el punto medio del circuito equivalente que representa la línea media y en serie divididas igualmente las impedancias entre las dos ramas formando así el equivalente T como se muestra en la figura 1.6 [8].

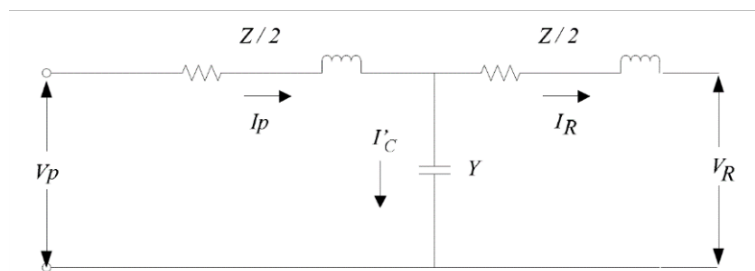


Figura 1.6. Circuito equivalente T de una línea de transmisión mediana [8]

Donde:

I_p : es la corriente en el extremo de envío.

V_p : es el voltaje en el extremo de envío.

$Z/2$: constituye el valor de la impedancia de toda la línea dividida en dos partes.

I_R : es la corriente en el extremo del receptor.

V_R : es el voltaje que se tiene en el extremo del receptor.

I'_C : es la corriente que circula por el ramal donde se encuentra la admitancia.

Y : admitancia total del circuito equivalente T, concentrado en la mitad del circuito equivalente.

1.4.6 LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA

Es aquella línea cuya longitud es menor a las 50 millas o 80 km, en este caso el efecto de la capacitancia es despreciable por lo que se omite del circuito equivalente, quedando únicamente la reactancia inductiva y resistencia las cuales se toma como un parámetro concentrado formando así un circuito serie dentro del equivalente de la línea [7].

1.4.6.1 Circuito equivalente de la línea de transmisión corta

Al tratarse de una línea de transmisión corta, donde la capacitancia en derivación es omitida se tiene el siguiente modelo el cual consiste en una conexión en serie dada por una resistencia R y una inductancia total L a lo largo de la línea, la cual se observa en la figura 1.7 [7].

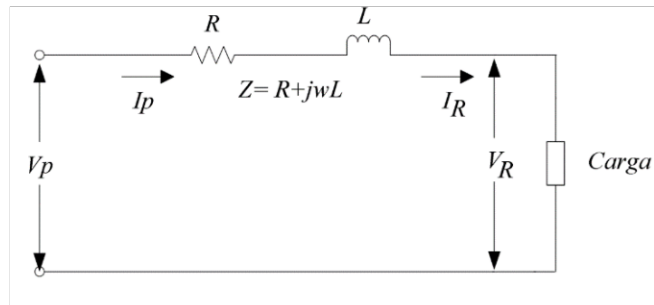


Figura 1.7. Circuito equivalente de una línea de transmisión corta [8]

Donde:

V_p : voltaje que se tiene en el extremo del transmisor.

V_R : voltaje que se tiene en el extremo del receptor.

$I_p = I_R$: corriente la cual fluye a través de la línea la cual sale del transmisor y es entregada al receptor.

$Z = R + jwL$: es la impedancia serie de la línea la cual está conformada por la resistencia R y la Inductancia L como parámetros concentrados [8].

1.4.7 EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO UNA LINEA DE TRANSMISION CORTA

Los alimentadores primarios de distribución son los encargados de transportar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los transformadores de distribución, estos alimentadores deben llegar hasta donde la demanda lo requiera para satisfacer las necesidades de la carga y en ocasiones la energía suele transportarse a largas distancias lo que puede considerarse a dicho alimentador primario como una línea de transmisión corta ya que la misma es considerada de esta manera siempre y cuando sea menor a los 80 km. Cuando el alimentador Primario es considerado como una línea de transmisión corta, la capacitancia en derivación es totalmente despreciable ya que es demasiado pequeña para considerarla en el modelo. Es por ello que para el estudio de la línea corta se toma en cuenta solamente la resistencia R y la inductancia L a lo largo de toda la línea [9].

1.4.8 PARÁMETROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA

Como se observa en la figura 1.7 del circuito equivalente de la línea de transmisión corta, los parámetros a estudiarse son la resistencia R y la inductancia L, estos parámetros representan toda la línea de transmisión corta por lo que se encuentran conectados en serie [9].

De acuerdo con los parámetros de la línea de transmisión corta se tiene lo siguiente:

El voltaje existente en el extremo del transmisor el cual hace referencia a la subestación de distribución es:

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R + \vec{I}_R * Z \quad (1.1)$$

Donde el análisis vectorial para el valor de \vec{V}_P va a depender del tipo de carga que se conecte en el extremo receptor, estas cargas pueden ser inductivas o en atraso, capacitivas o en adelanto, o simplemente cargas resistivas con factor de potencia unitario [8].

- Análisis vectorial para \vec{V}_P al conectar una carga inductiva o en atraso.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R \cdot \cos \theta + \vec{I}_R \cdot R + j(V_R \cdot \sin \theta + \vec{I}_R \cdot X_L) \quad (1.2)$$

$$V_P = \sqrt{(V_R \cdot \cos \theta + I_R \cdot R)^2 + (V_R \cdot \sin \theta + I_R \cdot X_L)^2} \quad (1.3)$$

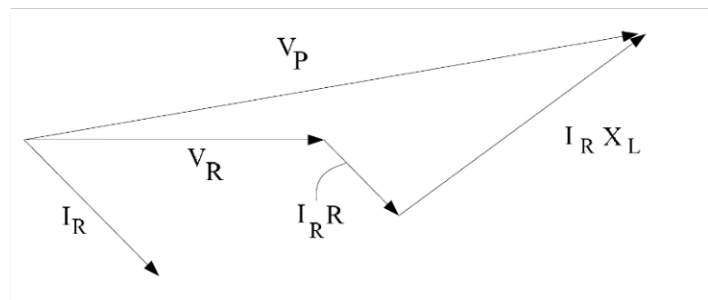


Figura 1.8. Diagrama fasorial para una carga inductiva [8]

- Análisis vectorial para \vec{V}_P al conectar una carga capacitiva o en adelanto.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R \cdot \cos \theta + \vec{I}_R \cdot R + j(V_R \cdot \sin \theta - \vec{I}_R \cdot X_L) \quad (1.4)$$

$$V_P = \sqrt{(V_R \cdot \cos \theta + I_R \cdot R)^2 + (V_R \cdot \sin \theta - I_R \cdot X_L)^2} \quad (1.5)$$

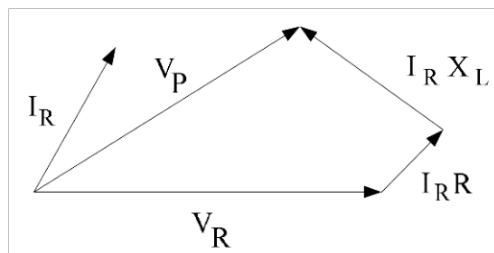


Figura 1.9. Diagrama fasorial para una carga capacitiva [8]

- Análisis vectorial para \vec{V}_P al conectar una carga resistiva con factor de potencia unitario.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R + \vec{I}_R \cdot R + j(\vec{I}_R \cdot X_L) \quad (1.6)$$

$$V_P = \sqrt{(V_R + I_R \cdot R)^2 + (I_R \cdot X_L)^2} \quad (1.7)$$

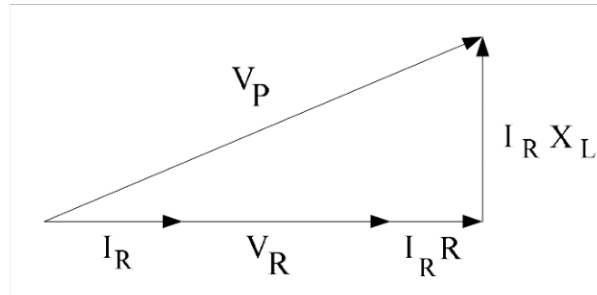


Figura 1.10. Diagrama fasorial para una carga resistiva [8]

1.4.9 RESISTENCIA

Una de las principales causas de la pérdida de energía en las líneas de transporte se debe a la resistencia propia que existe en los conductores, al hablar de resistencia nos estamos refiriendo a la resistencia efectiva de dicho conductor por lo que puede expresarse mediante la ecuación 1.8 [7]:

$$R = \frac{\text{Pérdida de potencia en el conductor}}{I^2} [\Omega] \quad (1.8)$$

Donde:

R : resistencia del conductor $[\Omega]$.

I^2 : corriente eficaz del conductor $[A]$.

La pérdida de potencia en el conductor se mide en $[W]$.

La resistencia " R_0 " es igual a la resistencia efectiva " R " del conductor siempre y cuando se trabaje en corriente continua, es decir, si la distribución de corriente que circula por el conductor es uniforme.

La resistencia " R_0 " conocida también como resistencia a corriente continua viene dada por la fórmula 1.9.

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} \Omega \quad (1.9)$$

Donde:

R_0 : resistencia a corriente continua la cual viene dado en $[\Omega]$.

ρ : resistividad del conductor $[\Omega m]$.

l : longitud del conductor $[m]$.

A : área de la sección transversal $[m^2]$.

Es importante verificar la unidad de medida antes de ingresar cualquier número en la ecuación 1.9, en el caso de los conductores de aluminio, el área relacionada a su sección transversal viene dada en circular mil, por lo que un circular mil es el área de un círculo que tiene un diámetro de 1 mil, siendo un mil igual a 10^{-3} pulgadas [7].

La resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor, en cuanto mayor sea su longitud, mayor será su resistencia y es inversamente proporcional a su sección transversal, es decir que la resistencia disminuye mientras aumenta el grosor o la sección transversal del conductor [7].

En los sistemas de transmisión o distribución se trabaja con corriente alterna "AC" y se utiliza en su mayoría conductores de aluminio trenzado, en este caso la resistencia es mayor debido a que los hilos trenzados helicoidalmente tienen mayor longitud, es decir que, en cada milla de conductor, la corriente eléctrica tiene que recorrer por todos los hilos, por lo que es importante realizar las siguientes consideraciones para hallar la resistencia en corriente alterna como se muestran a continuación:

- Corrección por trenzado: el incremento de resistencia debido a los hilos trenzados se estima 1% para conductores de tres hilos y un 2% para los de hilos concéntricos, quedando la ecuación 1.9 de la siguiente manera:

$$R_0 = \frac{\rho * l}{A} * (\text{porcentaje de hilo trenzado}) \quad (1. 10)$$

Donde:

porcentaje de hilo trenzado: 1.02 o 1.01 según corresponda.

Respecto a la resistividad " ρ ", la base fundamental para comparar cualquier material es el cobre recocido con el 100% de conductividad. El cobre comercial estirado al frío tiene 97.3% respecto al cobre recocido y el aluminio 61% de la conductividad del cobre recocido, estos parámetros de porcentaje son comparados a temperatura ambiente, es decir a 20°C. Por lo tanto, la resistividad del cobre

estirado al frío a 20°C " ρ " es igual a $1,77 \times 10^{-8} [\Omega m]$ o $(10,66 [\Omega * \frac{cmil}{pie}])$, para el aluminio a 20°C " ρ " es igual a $2,83 \times 10^{-8} [\Omega m]$ o $(17 [\Omega * \frac{cmil}{pie}])$.

- Corrección por temperatura: la resistencia de los conductores varía con la temperatura de forma lineal como se observa en la figura 1.11 y se describe con la siguiente ecuación:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (1.11)$$

Donde:

$t_1 R_1 R_2$: Son la resistencia del conductor a las temperaturas t_1 t_2 , respectivamente.

t_1 : Es la temperatura inicial del conductor.

t_2 : Es la temperatura final que posee el conductor.

T : Es la constante determinada a partir de la figura 1.11

La constante de temperatura " T " se selecciona dependiendo del material del conductor donde: 234.5 para cobre recocido de 100% de conductividad, 241 para cobre estirado en frío de 97.3% de conductividad. 228 para aluminio estirado en frío con 61% de conductividad [7].

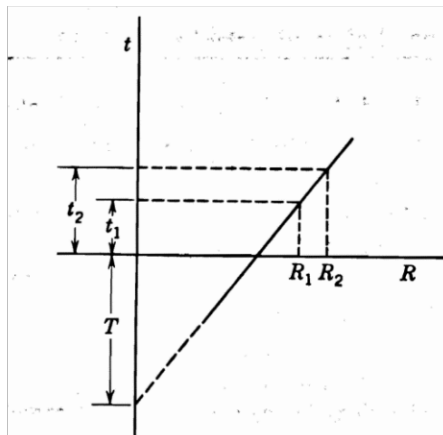


Figura 1.11. Resistencia en función de la temperatura [7].

1.4.9.1 Influencia del efecto piel sobre la resistencia

Se conoce que la distribución uniforme de la corriente solamente se presenta cuando el sistema se encuentra trabajando en corriente continua. Al aumentar la frecuencia en la corriente alterna, se hace más pronunciada la diferencia entre las densidades de corriente de las distintas zonas de una sección transversal, por lo que a este fenómeno se lo conoce

efecto piel. En un conductor cilíndrico que transporte corriente alterna se conoce que la densidad de corriente va del interior al exterior por lo que la corriente circula por las periferias del conductor. A medida que la frecuencia aumentar el efecto piel causa una mayor resistencia efectiva provocando una reducción en la sección efectiva del conductor [7].

1.4.10 INDUCTANCIA DE UN CONDUCTOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El origen de la inductancia se da cuando una corriente eléctrica circula por un conductor cuya magnitud varia en el tiempo es decir cuando se emplea una corriente alterna, la cual provoca un flujo magnético que se entrelaza con los conductores más cercanos al mismo.

La inductancia de un conductor se puede determinar mediante la siguiente ecuación [3]:

$$L = \frac{d\sigma}{di} \quad (1. 12)$$

Donde:

L: es la inductancia propia del conductor

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

Es importante mencionar que la inductancia es uno de los parámetros importante para obtener la reactancia inductiva que se presenta a continuación.

1.4.10.1 Reactancia inductiva

Para determinar la reactancia Inductiva del conductor se debe disponer de la frecuencia en la cual se encuentra trabajando el sistema y la inductancia total que es la suma de la inductancia interna y externa del cable. La ecuación 1.13 describe el cálculo de la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL [\Omega] \quad (1. 13)$$

Donde:

2π : es una constante.

f : es la frecuencia en [Hz].

L : es la inductancia total del conductor [H].

Si reemplazamos la ecuación anterior en función del RMG (radio medio geométrico) y DMG (distancia media geométrica) las cuales son parámetros propios del conductor y reemplazando la frecuencia utilizando artificios matemáticos se llega a la conclusión que la reactancia inductiva es igual a [7]:

$$X_L = 0.1736 * \log \frac{DMG}{RMG} \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (1. 14)$$

RMG: radio medio geométrico.

DMG: distancia media geométrica.

0.1736: es una constante.

Donde RMG y DMG deben poseer las mismas unidades para poder ser reemplazados en la ecuación 1.14.

1.4.11 TIPOS DE CONDUCTORES

Antes de emplear los conductores de aluminio el sistema de transmisión de potencia eléctrica contenía conductores generalmente de cobre, este tipo de conductores era pesado y excesivamente caro en comparación con el aluminio. El conductor de aluminio posee un mayor diámetro que un conductor de cobre de la misma resistencia, por lo que es una ventaja ya que con un mayor diámetro las líneas de flujo eléctrico originadas sobre el conductor están más apartadas en la superficie de éste para un mismo voltaje. Esto equivale a tener un menor gradiente de voltaje en la superficie del conductor y menor tendencia a ionizar el aire a su alrededor, dicha ionización provoca un defecto indeseable en las líneas de transporte de energía llamado efecto corona [7].

Los diferentes tipos de conductores de aluminio existentes se identifican de la siguiente manera:

- AAC: conductor de aluminio.
- AAAC: conductor de aluminio con aleación.
- ACSR: conductor de aluminio con refuerzo de acero.
- ACAR: conductor de aluminio con refuerzo de aleación.

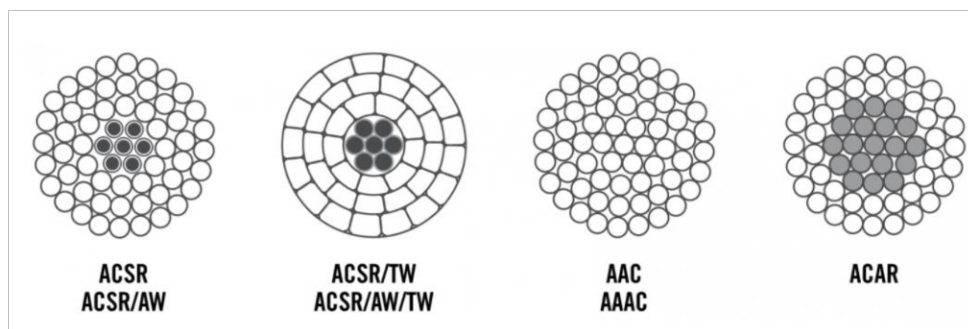


Figura 1.12. Conductor de aluminio para líneas de transporte de energía [7].

1.4.11.1 Conductor de aluminio AAC

Es un conductor desnudo refinado con una pureza de aluminio del 99.7 %, este tipo de cable se encuentra trenzado de forma helicoidal para darle mayor resistencia al conductor. Son utilizados en su mayoría en las zonas céntricas donde los espaciamientos entre los postes de energía eléctrica no son muy distantes y donde se tiene una densidad de carga no tan alta, además son resistentes al ambiente salino los cuales evitan la corrosión del cable por lo que son eficientes en las instalaciones de redes de distribución de zonas costeras [10].

1.4.11.2 Conductor de aluminio AAAC

Este tipo de conductor está construido por una aleación refinada de magnesio y silicio lo cual elevan el valor de conductividad eléctrica, está diseñado exclusivamente para líneas aérea y son utilizados dentro del sistema de distribución o transmisión de energía eléctrica donde se requiera una mayor tensión mecánica, ofrece una mayor resistencia a la corrosión que el ACSR conteniendo una mejor característica de pandeo, además debido al material de construcción, estos conductores ofrecen una mayor relación de resistencia – peso que el AAC, Poseyendo una menor resistencia por unidad de longitud que el ACSR [10].

1.4.11.3 Conductor de aluminio ACAR

Los cables ACAR están constituidos por hilos de aluminio, insertados helicoidalmente con alambres de aleación de aluminio en capas concéntricas, esto mejor la capacidad de circulación de corriente más la capacidad de voltaje y longitud del vano. Este tipo de conductores son muy resistentes a la tracción por lo que son diseñados para soportar una mayor carga eléctrica, con capacidades mecánicas similares al ACSR, por lo que son ideales para ser fijados a mayores distancias entre postes con vanos largos [11].

1.4.11.4 Conductor de aluminio ACSR

Es un conductor trenzado el cual posee un alambre galvanizado que incrementa la resistencia mecánica del conductor, así también posee alta capacidad de transmisión de

corriente, es utilizado en la construcción de redes aéreas. Posee dos capas una de aluminio y la otra de acero. Las capas aluminio son de alta pureza, mismos que posee buena conductividad, lo que hace que el conductor sea más liviano. Las capas internas son de acero galvanizado para brindar resistencia mecánica y ayudar a soportar el peso del conductor.

1.4.12 TOPOLOGÍAS DE LAS REDES PRIMARIAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN

Formados por elementos y equipos que sirven para transportar la energía eléctrica hasta los transformadores de distribución ubicados en los barrios e industrias, este tipo de redes son las más utilizadas a pesar de que poseen una menor confiabilidad, son económicas, fáciles de instalar y operar a diferencia de las redes subterráneas.

1.4.12.1 Red primaria tipo radial

Este sistema cuenta con una sola trayectoria entre la fuente y la carga, facilitando el flujo de potencia a través de las líneas de distribución. Conocido de esta manera ya que posee un simple camino sin retorno sobre el cual circula la corriente eléctrica, su trayecto inicia desde la subestación eléctrica y se distribuye mediante ramales, como se ve en la figura 1.13 [4]

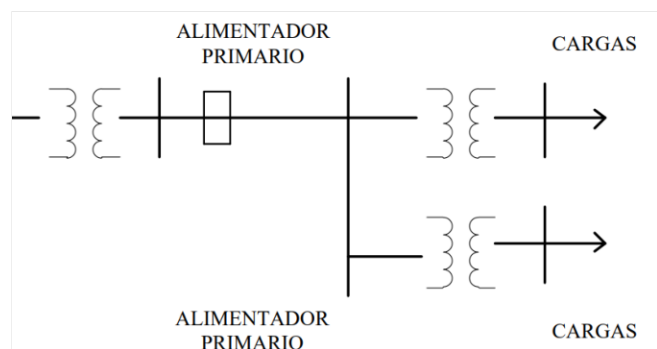


Figura 1.13. Alimentador primario tipo radial

1.4.12.2 Red primaria tipo anillo

Está formada por más de una trayectoria entre la subestación y la carga para facilitar el flujo energía eléctrica, es decir, parte desde la subestación eléctrica y realiza un ciclo completo cubriendo toda el área donde se requiera el servicio eléctrico, para posteriormente regresar al punto de partida de la misma subestación. Este sistema es utilizado para proporcionar de energía a sectores estratégicos con una gran demanda, cubriendo las pequeñas, medianas y grandes industria, o a su vez abasteciendo de energía los centros comerciales donde se requiera siempre la continuidad del servicio eléctrico [4].

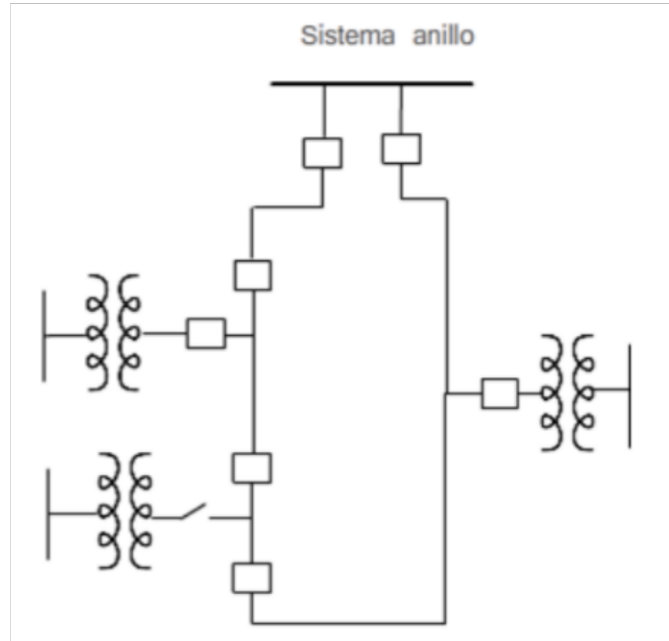


Figura 1.14. Alimentador primario en anillo.

1.4.12.3 Red primaria tipo mallado

En este tipo de conexión se tiene una mayor confiabilidad en el suministro eléctrico, a diferencia de la configuración radial o en anillo, debido a que el sistema recibe energía desde varias subestaciones de distribución. Este tipo de sistemas son utilizados donde la energía eléctrica no tiene que sufrir ninguna interrupción, ya que una falta de continuidad en el servicio eléctrico tendría grandes consecuencias [4].

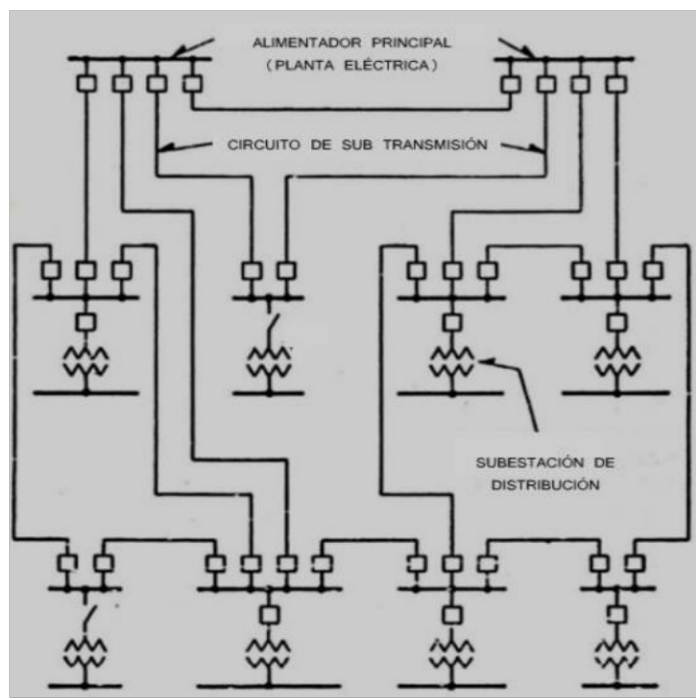


Figura 1.15. Alimentador primario tipo mallado

1.4.13 MÉTODO APROXIMADO PARA CAÍDA DE VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Las distribuidoras de electricidad son las encargadas de transportar la energía eléctrica en condiciones favorables de calidad de energía, tal es el caso de la calidad del producto en la cual se analiza las caídas de voltaje y según la empresa eléctrica Quito en los alimentadores primarios no deben exceder el 3.5 % de caída de voltaje en las zonas urbanas y el 4% en las zonas rurales, mientras que para el circuito secundario se tiene una caída de voltaje permitida del 2,5 % en zonas urbanas y 3.0 % en zonas rurales. Por lo que se recomienda que los conductores de los alimentadores primarios sean seleccionados cuidadosamente para no sobrepasar los límites máximos de caídas de voltaje [3].

Para determinar la caída de voltaje en un alimentador primario es importante considerar los siguientes principios:

- Si se conecta una carga simple con un factor de potencia constante, la caída de voltaje que se presenta en el circuito es directamente proporcional a la cantidad de carga que se tenga.
- Si se conecta un conductor que sea uniforme con la carga y además que contenga un factor de potencia constante, entonces la caída de voltaje será proporcional a la longitud de dicho conductor.
- Si se tienen varias cargas sobre el circuito, entonces la caída de voltaje acumulada en un punto del alimentador será, la suma de todas las cargas que inciden sobre dicho punto [12].

Si consideramos los principios anteriores entonces se puede decir que la caída de voltaje depende directamente de la carga, longitud, factor de potencia y características propias del conductor [12].

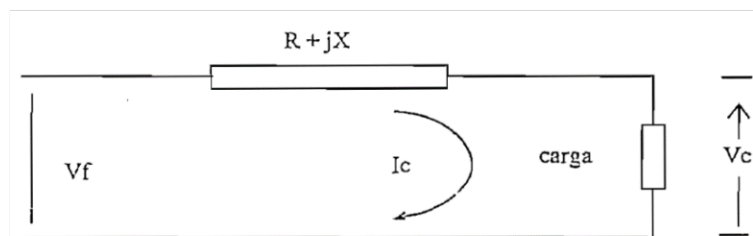


Figura 1.16. Circuito equivalente de un alimentador primario [12].

La corriente que circula por el circuito es igual a:

$$I_c = \frac{kVA_T}{N_f * kV_{fn}} \quad (1. 15)$$

Donde:

I_C corriente que circula a través del circuito [A].

N_f : número de fases.

kVA_T : potencia aparente de la carga [kVA].

kV_{fn} : voltaje fase- neutro en [KV].

Para determinar la caída de tensión en porcentaje respecto al voltaje nominal del sistema, se divide el valor de caída de voltaje para el voltaje nominal y se multiplica por 100 quedando de la siguiente manera [12]:

$$\Delta V(\%) = \frac{kVA_T * (R * \cos \phi + X * \sin \phi)}{N_f * kV_{fn}^2 * 10} \quad (1. 16)$$

Donde:

R : resistencia del conductor [Ω].

X : reactancia del conductor [Ω].

$\cos \phi$: ángulo del factor de potencia de la carga.

Es importante considerar que R y X pueden estar dados en valores unitarios, por lo que “r” y “x” estarían en [Ω/m] u [Ω/km], para ello es importante tener las unidades de medida con las que se encuentra el tramo L a estudiar. De esta manera la ecuación de caída de voltaje puede remplazarse en función de la longitud “L” [1].

$$\Delta V(\%) = \frac{kVA_T * L * (r * \cos \phi + x * \sin \phi)}{N_f * kV_{fn}^2 * 10} \quad (1. 17)$$

Otra forma de expresar la caída de voltaje utilizando el criterio de los kVA-m es la siguiente:

$$\Delta V(\%) = kVA_T * L * FCV \quad (1. 18)$$

Donde:

FCV : factor de caída de voltaje.

L : longitud del tramo

El factor de caída de voltaje o FCV , depende de la configuración de los circuitos y de las características técnicas del conductor como r y x además considera el factor de potencia de la carga, quedando de la siguiente manera.

$$FCV = \frac{r * \cos \phi + x * \sin \phi}{10 * N_f * kV_{fn}^2} \quad (1. 19)$$

Al tratarse de una red trifásica podemos reemplazar los kV_{fn}^2 correspondiente al voltaje de fase por los kV_{L-L}^2 que corresponden al voltaje de línea, aplicando artificios matemáticos se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$FCV = \frac{r * \cos \phi + x * \sin \phi}{10 * kV_{L-L}^2} \quad (1. 20)$$

Con la ecuación mostrada anteriormente, se puede determinar la caída de voltaje la cual depende de la potencia aparente de la carga, el factor de caída de voltaje y la longitud del alimentador [12].

1.4.14 IMPEDANCIA SERIE DE LINEAS DE DISTRIBUCION AEREAS

En los sistemas de distribución es necesario analizar los para metros que afectan la circulación de potencia por los conductores tal es el caso de la impedancia serie que posee nuestro alimentador primario el cual consta de una resistencia que depende del material del cual está construido el conductor y la longitud del alimentador, así también de la inductancia total, misma que está formada por la inductancia propia y mutua del circuito, cuyos campos magnéticos emitidos por cada línea, sea esta monofásica, bifásica o trifásica afectan a la inductancia total del circuito [13].

1.4.14.1 Impedancia serie de líneas aéreas

Se conoce que la impedancia serie está formada por dos parámetros (resistencia e inductancia) necesarios para el estudio de flujos de potencia el cual circula por el alimentador primario, en este caso la inductancia total del circuito está afectada por los campos magnéticos de otros conductores aledaños a la línea que se desea estudiar cómo

se observa en la figura 1.17, dichos campos magnéticos provocados por la circulación de corriente aumentan a la inductancia total de la línea y por ende se tiene un aumento en la reactancia inductiva el cual debe ser considerado en el modelado para la obtención de resultados más eficientes [13].

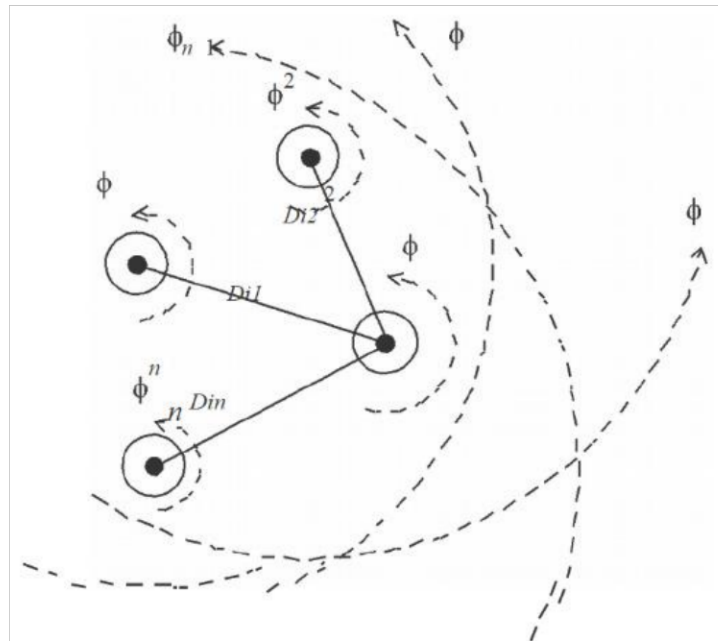


Figura 1.17. Campo magnético emitido por un haz de conductores.

El flujo total está dado por la ecuación 1.21.

$$I_1 + I_2 + \dots + I_i + \dots + I_n = 0 \quad (1.21)$$

$$\lambda_i = N \cdot \phi = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(I_1 \cdot \ln \frac{1}{D_{i1}} + I_2 \cdot \ln \frac{1}{D_{i2}} + \dots + I_i \cdot \ln \frac{1}{GMR_i} + \dots + I_n \cdot \ln \frac{1}{D_{in}} \right) \quad (1.22)$$

Donde:

N : es el número de veces que la línea de flujo rodea al conductor, en este caso $N=1$

D_{in} : es la distancia entre el conductor "i" y el conductor "n" [pies].

GMR_i : radio medio geométrico del conductor [pies].

La inductancia del conductor "i" consiste en la inductancia propia del conductor y la inductancia mutua de todos los demás conductores, la interacción de la inductancia propia y mutua, forman la inductancia total que posee cada conductor [14].

$$L_{ii} = \frac{\lambda_{ii}}{I_i} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{GMR_i} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (1.23)$$

$$L_{in} = \frac{\lambda_{in}}{I_n} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{D_{in}} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (1.24)$$

Donde:

L_{ii} : es la inductancia propia del conductor en $\left[\frac{H}{m} \right]$.

L_{in} : es la inductancia mutua de los demás conductores en $\left[\frac{H}{m} \right]$.

1.4.14.2 Líneas de distribución no transpuestas

Los sistemas de distribución están contruidos con líneas monofásicas, bifásicas y trifásicas no transpuestas, mismas que alimentan cagas desequilibradas, es por ello que se necesita mantener la identidad de inductancia propia y mutua de los conductores además de tener el conductor de retorno o conocido como neutro el cual se encuentra distribuido en los sistemas de distribución [14].

1.4.14.3 Ecuaciones Carson

Las ecuaciones de Carson establecen la forma más empleada para calcular las impedancias que son dependientes de la conexión a tierra en líneas de transmisión y distribución [14].

Para el desarrollo de las ecuaciones, Carson supone que la tierra posee una resistividad constante, además de ser uniforme, solida e infinita. Para frecuencias de estado estacionario, Carson propone que cualquier efecto que pueda presentarse en la línea son despreciables en los puntos de conexión a tierra, además usó el método de las imágenes que supone que cualquier conductor que este suspendido a una determinada distancia sobre la tierra tiene un conductor imagen a la misma distancia por debajo de la tierra como se muestra en la figura 1.18 [14].

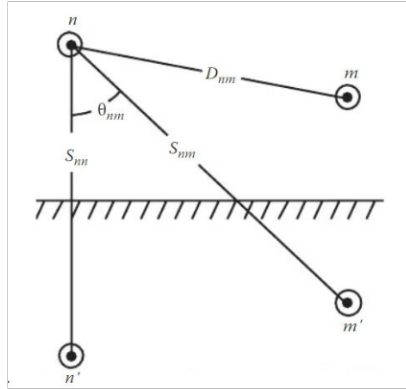


Figura 1.18 Conductor imagen referido a tierra

Las ecuaciones de Carson son las siguientes.

Inductancia Propia:

$$Z_{ii} = r_i + 4\omega P_{ii}G + j \left(X_i + 2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right) \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (1.25)$$

Inductancia Mutua entre conductores i y j:

$$G = 1 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left(2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right) \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (1.26)$$

Donde:

Z_{ii} : es la impedancia propia del conductor i en $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$.

Z_{ij} : es la impedancia mutua entre los conductores i y j en $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$.

r_i : es la resistencia del conductor i en $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$.

ω : es la frecuencia en $\left[\frac{rad}{s} \right]$.

R_i : radio exterior del conductor i en metros.

D_{ij} : distancia entre el conductor i y j en metros.

S_{ij} : distancia entre el conductor i y la imagen de j en metros.

RD_i : radio del conductor i en metros.

GMR : radio geométrico del conductor en metros.

Los términos P y Q representan los términos de una serie infinita de la solución de una ecuación diferencial [13].

1.4.14.4 Ecuación modificada de Carson

Las ecuaciones originales de Carson no pueden ser aplicables ya que no se posee todos los parámetros para llegar a una solución, estos parámetros faltantes como el radio geométrico de la tierra, la resistencia de la tierra y las distancias de conductores a tierra están definidos en la modificada de Carson y mediante artificios matemáticos se llega a establecer la impedancia propia y mutua de un conductor respecto a otros conductores aledaños [13].

Impedancia propia mediante la modificada de Carson.

$$z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right] \quad (1.27)$$

Impedancia mutua mediante la modificada de Carson.

$$z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right] \quad (1.28)$$

Donde:

z_{ii} : es la impedancia propia del conductor i en $\left[\frac{\Omega}{milla} \right]$.

r_i : es la resistencia del conductor i en $\left[\frac{\Omega}{milla} \right]$.

GMR_i : es el radio medio geométrico del conductor i en $[pies]$.

z_{ij} : impedancia mutua entre conductores i y j en $\left[\frac{\Omega}{milla} \right]$.

D_{ij} : es la distancia entre conductores i y j en $[pies]$.

1.4.14.5 Matriz de impedancia primitiva para líneas aéreas

La matriz primitiva se forma a partir de las ecuaciones 1.26 y 1.27 que corresponden a la ecuación modificada de Carson la cual relaciona la impedancia propia y mutua de los conductores se procede a armar la matriz de impedancia de n x n conductores, para el caso de una red primaria aérea de cuatro conductores y conectada a tierra se tendrá una matriz de 4x4, de esa manera la matriz primitiva para un sistema trifásico con "m" neutros se encuentra particionada como se observa en la ecuación 1.28 [13].

$$[Z_{primitiva}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & \vdots & Z_{an1} & Z_{an2} & Z_{anm} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & \vdots & Z_{bn1} & Z_{bn2} & Z_{bnm} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & \vdots & Z_{cn1} & Z_{cn2} & Z_{cnm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1a} & Z_{n1b} & Z_{n1c} & \vdots & Z_{n1n1} & Z_{n1n2} & Z_{n1nm} \\ Z_{n2a} & Z_{n2b} & Z_{n2c} & \vdots & Z_{n2n1} & Z_{n2n2} & Z_{n2nm} \\ Z_{nma} & Z_{nmb} & Z_{nmc} & \vdots & Z_{nmn1} & Z_{nmn2} & Z_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

En forma dividida la ecuación anterior se convierte en:

$$[Z_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [Z_{ij}] & [Z_{in}] \\ [Z_{nj}] & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

1.4.14.6 Matriz de impedancia de fase y reducción de Kron.

En casi todas las aplicaciones, la matriz de impedancia primitiva se reduce a una matriz de 3x3 el cual consiste en la impedancia propia y mutua de las tres fases del circuito, en la figura 1.19 se observa un circuito trifásico con neutro conectado a tierra, sin embargo, la reducción de Kron asume que cada fase tiene un neutro común [13].

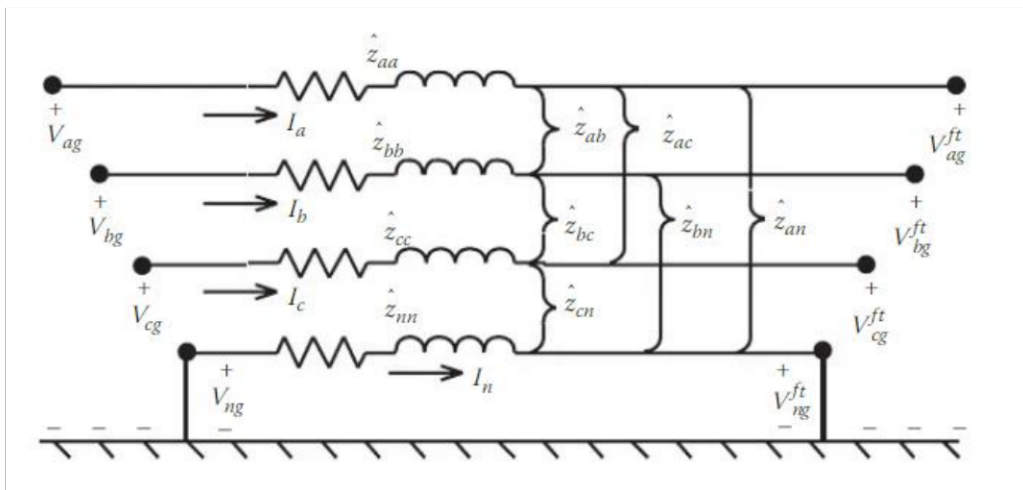


Figura 1.19. Línea trifásica con neutro conectado a tierra

Un método estándar es la reducción de "Kron", el cual establece que la línea tiene un neutro aterrizado como se muestra en la figura 1.19. este método aplica las leyes de voltaje de Kirchoff para obtener las caídas de voltaje y la corriente que circula por un tramo en función de la matriz primitiva de impedancias [13].

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Mediante una resolución matricial se obtiene:

$$[Z_{abc}] = [Z_{ij}] - [Z_{in}] \cdot [Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \quad (1.32)$$

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

Para determinar la matriz de impedancias únicamente de la “fase b” en un circuito monofásico es necesario establecerla como se muestra a continuación [13].

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{milla}} \right] \quad (1.34)$$

Para obtener la impedancia de la “fase b” se ponen en 0 los demás componentes de la matriz, de esta manera la impedancia de la fase b puede servir para determinar las caídas de voltaje en el alimentador primario siempre y cuando se tenga la corriente que circula por el tramo [13].

Para un segmento del alimentador se tiene que la ecuación de voltaje en función de la matriz de impedancias es la siguiente.

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

Finalmente, la ecuación reducida de Kron puede expresarse de la siguiente manera:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}]$$

1.4.15 MEDICIÓN INALÁMBRICA PARA EL PROTOTIPO

Para enviar los respectivos resultados obtenidos de las mediciones que se realizarán en el prototipo se hace uso de la tecnología Wi-Fi, mismo que conlleva la instalación de una serie de dispositivos electrónicos dentro del prototipo.

1.4.15.1 Módulo ESP32-C3

Tarjeta basada en el módulo ESP32-C3-13U con comunicación Wi-Fi y Bluetooth de alto rango y soporta flash externo de 2M. Con pines GPIO, puerto micro USB, LED RGB y conector para antena. Diseñada para proyectos IoT [2]

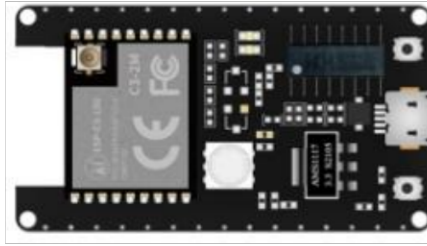


Figura 1.20. Modulo inalámbrico ESP 32 C3

Tabla 1. Características del ESP-32.

Componentes	Descripción
LDO de 5V a 3.3V	Regulador de voltaje que transforma de 5 VDC a 3.3 VDC.
Indicador led de encendido	Se encenderá cuando un conector USB esté conectado al computador.
Pines I/O	Pines de entrada y salida.
Boton de carga	Boton de carga y reseteo.
Puerto Micro USB	Conexión para interfáz USB.
Boton de Reset	Botón para resetear el sistema.
Puente USB a UART	Puente USB-UART, transferencia de 3 Mbps.
LED RGB	Led indicador RGB.

1.4.15.2 Servidor web

Un servidor web es un software que forma parte del servidor y tiene como función principal devolver información cuando recibe peticiones por parte de los usuarios. Es el software que permite que los usuarios que quieren ver una página web en su navegador puedan hacerlo.

1.4.15.3 Api Rest

Una Api Rest, es cualquier interfaz existente entre sistemas que use HTTP para obtener datos o generar operaciones sobre esos datos en todos los formatos posibles, como XML y JSON. Es una alternativa en auge a otros protocolos estándar de intercambio de datos como SOAP (Simple Object Access Protocol), que disponen de una gran capacidad, pero también mucha complejidad.

2 METODOLOGÍA

Debido a que este trabajo de titulación trata de la expansión del módulo emulador de una red de distribución de 13,8kV misma que se encuentra en el laboratorio de distribución, se empieza por determinar el valor de impedancia por fase de la red de 13,8kV conectado mediante el conductor 4/0 ACSR AWG, los valores obtenidos de resistencia e inductancia serán corroborados con los resultados arrojados por el software de simulación Cymdist de Cyme, para luego transformar dichos valores reales a un equivalente en bajo voltaje que simule el alimentador primario de 13.8kV, esto se logrará utilizando el sistema en por unidad.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ACSR INVOLUCRADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

El conductor ACSR contienen un núcleo de acero galvanizado que va desde el 6 al 40 % para mejorar la resistencia mecánica del cable, son utilizados en los alimentadores primarios y son exclusivos para cruces fluviales o cuando se tienen tramos extralargos dentro de las instalaciones de las líneas del sistema de distribución.

Las características más importantes del conductor 4/0 se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características propias del conductor ACSR

Galga (AWG)	Hilos	capas	Capacidad aproximada de corriente [A]	Resistencia a 60Hz- 50°C en [ohmios/milla]	Reactancia inductiva a 60Hz en [ohmios/milla]	Radio medio geométrico (RGM) en [pies]	material
4/0	6	1	340	0.592	0.581	0.00814	ACSR
3/0	6	1	300	0.723	0.621	0.006	ACSR
2/0	6	1	270	0.895	0.641	0.0051	ACSR
1/0	6	1	230	1.12	0.656	0.00445	ACSR

Es importante mencionar las características del conductor 4/0 ya que es útil para determinar las impedancias de fase del alimentador primario, mismas que utilizan las ecuaciones de Carson y Kron.

2.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA EL CONDUCTOR 4/0 AWG.

2.2.1 ESTRUCTURA UTILIZADA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

Las estructuras más utilizadas en la construcción de redes de distribución son las 3CP (trifásico centrado pasante), para lo cual se toma como referencia la longitud del poste y las separaciones que tienen los conductores entre sí, estos parámetros son muy importantes dentro de cualquier estructura ya que el simulador de Cyme toma en cuenta la impedancia propia y mutua de los conductores para determinar el valor de resistencia e inductancia de cada fase.

2.2.2 SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES DE FASE Y NEUTRO PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO

Para determinar la impedancia por fase del alimentador primario cuyo conductor es 4/0 ACSR AWG es necesario conocer la estructura del alimentador, para este caso se hace referencia a la estructura 3CP (trifásico centrado pasante), de esta estructura se toman las separaciones de los conductores, tanto de las fases como del neutro, mismos que se encuentran establecidos en la simulación de Cymdist como se muestra en la figura 2.1.

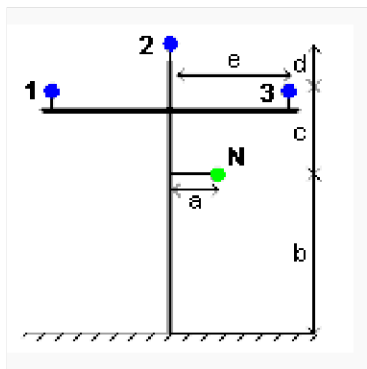


Figura 2.1. Disposición de conductores en una estructura 3CP

Como se puede observar en la figura 2.1 los espaciamientos corresponden a la separación que tienen las fases entre sí, las fases respecto al neutro, el neutro respecto a la estructura y la altura correspondiente a la estructura. Dentro de las construcciones de redes eléctricas de distribución de medio voltaje, la separación más usada correspondiente a este tipo de estructura es la siguiente:

Tabla 2.2. Separación de conductores en la estructura 3CP

Distancia	[pies]	[m]
a	0.5	0.15
b	25.0	7.62
c	4.0	1.22
d	1.0	0.31
e	3.5	1.06

Los valores de las distancias mostradas en la tabla 2.2 se encuentran ingresados dentro de los parámetros de las líneas aéreas de circuito simple de Cyme, mismos que servirán para corroborar los resultados obtenidos teóricamente en este trabajo de titulación.

2.2.3 DISTANCIA MEDIA GEOMÉTRICA PROPIA Y ENTRE CONDUCTORES

La distancia media geométrica (GMR) de un solo conductor, está establecida en tablas mismas que son útiles para determinar la impedancia propia de cada conductor, mientras que la distancia media geométrica entre conductores es utilizada para encontrar la impedancia mutua debido al campo magnético que ejercen las demás fases del circuito.

En la tabla 2.3 se muestran las características de algunos conductores, mismos que fueron sacados de las tablas de Stevenson del Libro de Sistemas eléctricos de potencia. Para nuestro caso se hizo uso de los parámetros establecidos para el conductor número 4/0.

Tabla 2.3. Características de los cables de aluminio reforzados de acero

Galgas Americanas de Alambre AWG	Radio medio geométrico a 60 Hz para una corriente aproximada de 75% de su capacidad total [pies]	resistencia a 50 °C y frecuencia de 60 Hz [Ω /milla]	reactancia inductiva a 60 Hz y 75% de su capacidad, a un pie de separación [Ω /milla]
4/0 ACSR 6/1	0,00814	0,592	0,581
3/0 ACSR 6/1	0,006	0,723	0,621
2/0	0,0051	0,895	0,641
1/0	0,00445	1,12	0,656

Para hallar el radio medio geométrico entre conductores, fue necesario utilizar la ecuación que relaciona la distancia entre dos puntos:

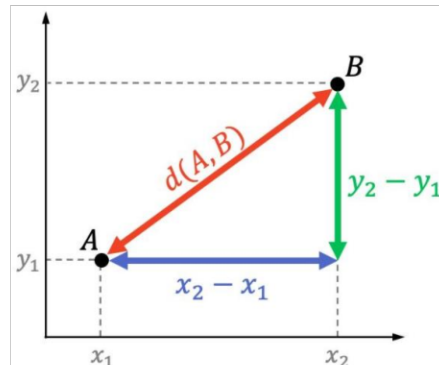


Figura 2.2. Distancia entre dos puntos

$$d_{AB} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2. 1)$$

Es importante mencionar que los 4 conductores que conforman la estructura 3CP son de las mismas características, es decir son conductores 4/0 ACSR AWG. De la figura 2.1 donde se muestra la disposición de los conductores se puede obtener la distancia que existe entre cables conectados. Si llamamos al conductor 1 como la “fase a”, conductor 2 como “fase b”, conductor 3 como “fase c” y el conductor del neutro como N, podemos determinar la distancia de la siguiente manera:

$$D_{ab} = \sqrt{(3.5)^2 + (1)^2}$$

$$D_{ab} = \sqrt{12.25 + 1}$$

$$D_{ab} = 3.6401[\text{pies}]$$

De esa manera se determina los valores para distancia que relacionan los conductores. En la tabla 2.4 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2.4. Distancia equivalente entre conductores

Distancia equivalente	[pies]
D_{ab}	3.640
D_{bc}	3.640
D_{ac}	7
D_{aN}	5.657
D_{bN}	5.025
D_{cN}	5

2.2.4 IMPEDANCIA PROPIA Y MUTUA DE LA ESTRUCTURA 3CP

De los valores obtenidos en las tablas 2.1 y 2.4 se puede calcular la impedancia propia y mutua del circuito, aplicando las ecuaciones modificadas de Carson. Para determinar la impedancia propia Z_{ii} se necesita la resistencia en ohmios por milla y el radio medio geométrico en pies de cada conductor, se hace uso de las ecuaciones 1.27 y 1.28.

$$z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

$$z_{aa} = 0.592 + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{0.00814} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

$$z_{aa} = 0.68730 + j1.54648 \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

Al tratarse de un mismo conductor tanto para las fases como para el neutro, se deduce que las impedancias propias de los de más conductores serán idénticas a la impedancia hallada z_{aa} donde:

$$z_{aa} = z_{bb} = z_{cc} = z_{cc} = 0.68730 + j1.54648 \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

Para determinar la impedancia mutua Z_{ij} es necesario conocer la distancia media geométrica entre conductores, misma que se detalla en la tabla 2.4.

$$z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

$$z_{ab} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \frac{1}{3.64} + 7.93402 \right) \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

$$z_{ab} = 0.09530 + j0.805941 \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$$

Los resultados obtenidos de las demás impedancias se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 2.5. resultados de impedancia mutua

Impedancia mutua entre conductores	[Ω /milla]
Z_{ab}	$0.09530 + j0.805941$
Z_{bc}	$0.09530 + j0.805941$
Z_{ca}	$0.09530 + j0.726597$
Z_{aN}	$0.09530 + j0.752447$
Z_{bN}	$0.09530 + j0.766822$
Z_{cN}	$0.09530 + j0.767425$

En la tabla 2.5 se observa que la parte real es la misma para todos los casos, esto se debe a que la impedancia mutua solo depende de la distancia entre conductores misma que está involucrada en la parte imaginaria de la ecuación como se estudió anteriormente.

2.2.5 MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE ALIMENTADOR PRIMARIO

Una vez hallada las impedancias propias y mutuas de nuestra red de 13.8kV, se procede a escribir la matriz de impedancias primitivas como se muestra a continuación.

$$[z] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

$$[z] = \begin{bmatrix} 0.68730 + j1.546480 & 0.09530 + j0.805941 & 0.09530 + j0.726597 & 0.09530 + j0.752447 \\ 0.09530 + j0.805941 & 0.68730 + j1.546480 & 0.09530 + j0.805941 & 0.09530 + j0.766822 \\ 0.09530 + j0.726597 & 0.09530 + j0.805941 & 0.68730 + j1.546480 & 0.09530 + j0.767425 \\ 0.09530 + j0.752447 & 0.09530 + j0.766822 & 0.09530 + j0.767425 & 0.68730 + j1.546480 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

Para hallar la matriz de impedancia por fase es necesario dividir la matriz de impedancia primitiva de la siguiente manera.

$$[z_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [z_{ij}] & [z_{in}] \\ [z_{nj}] & [z_{nn}] \end{bmatrix}$$

$$[z] = \begin{bmatrix} [z_{ij}] & [z_{in}] \\ [z_{nj}] & [z_{nn}] \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

Posteriormente se aplica la ecuación reducida de Kron para obtener la matriz de impedancia por fase.

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

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.74355 + j1.21125 & 0.15341 + j0.46454 & 0.15348 + j0.38493 \\ 0.15341 + j0.46454 & 0.74731 + j1.19880 & 0.15540 + j0.45799 \\ 0.15348 + j0.38493 & 0.15540 + j0.45799 & 0.74747 + j1.19827 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{milla}} \right]$$

Impedancias equivalentes			
	A	B	C
Z [ABC] =	0,7435 + j1,211	0,1541 + j0,4358	0,1541 + j0,4358
	0,1541 + j0,4358	0,7473 + j1,199	0,1541 + j0,4358
	0,1541 + j0,4358	0,1541 + j0,4358	0,7475 + j1,198
	Ohmios/mi		

Figura 2.3. Impedancias Equivalentes del alimentador primario, obtenidas mediante Cymdist.

Los resultados obtenidos de forma matemática se pueden comparar con la matriz de impedancias arrojadas por el cyme de donde se observa que hay una exactitud con los resultados de la diagonal, mientras que los valores calculados fuera de la diagonal son aproximados a los resultados del cyme con un porcentaje de error muy pequeño.

De la matriz de impedancia por fase se toma el componente Z_{11} que equivale $0.7435 + j1.211 \left[\frac{\Omega}{milla} \right]$ estos valores son importantes para determinar la impedancia que conforma el alimentador primario de 15 km.

$$Z_{11} = (0.7435 + j1.211) \left[\frac{\Omega}{milla} \right] * \left[\frac{0.621371 \text{ milla}}{1 \text{ km}} \right] * 15 \text{ km}$$

Para hallar el valor de resistencia y reactancia inductiva es necesario aplicar las conversiones de unidades necesarias, de manera que se obtengan medidas coherentes. Los resultados obtenidos se encuentran en ohmios ya que anteriormente también se multiplico por la longitud del vano quedando de la siguiente manera.

$$Z_{11} = 6.92984 + j11.2872 [\Omega]$$

$$R_{A/P} = 6.92984 [\Omega]$$

$$jXL = j11.2872 [\Omega]$$

La resistencia equivalente del alimentador primario de 13.8kV es igual a 6.92984 $[\Omega]$ mientras que el valor de inductancia se obtiene al despejar "L" de la ecuación correspondiente a la reactancia inductiva, de donde la frecuencia está en Hertz y el valor de reactancia inductiva en ohmios.

$$XL = 2 * \pi * f * L$$

$$L_{A/P} = \frac{XL}{2 * \pi * f} [H]$$

$$L_{A/P} = \frac{11.2872}{2 * \pi * 60} [H]$$

$$L_{A/P} = 29.9402 [mH]$$

Tabla 2.6. Valores de R y L mediante CYME para el A/P de 13.8kV

$Z_{A/P-CYME}$	
$R_{A/P}$	6.92984 [Ω]
$L_{A/P}$	29.9402 [mH]

Donde:

$L_{A/P}$: Inductancia del alimentador primario de 13.8kV.

$R_{A/P}$: resistencia del alimentador primario de 13.8Kv.

$Z_{A/P-CYME}$: impedancia del alimentador primario con R en [Ω], e inductancia en [mH].

Con los resultados obtenidos se procede a realizar el escalamiento respectivo para encontrar los valores de resistencia e inductancia que representaran a línea de 13.8kV dentro del prototipo para ello se utilizará el sistema en por unidad mismo que nos ayudará a comparar los resultados obtenidos mediante Cymdist y los valores arrojados por el prototipo a escala.

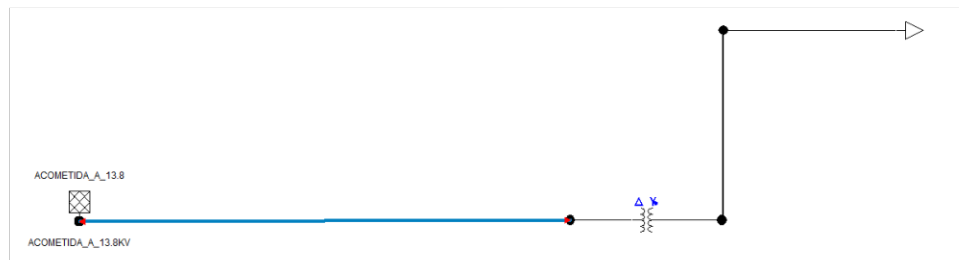


Figura 2.4. Circuito Equivalente de una red de 13.8KV a 220 diseñado en Cymdist.

2.2.6 MATRIZ DE IMPEDANCIA POR FASE CIRCUITO SECUNDARIO

Como se supo detallar el proceso para determinar la impedancia por fase del circuito primario cuyo conductor es 4/0 ACSR AWG, de la misma manera se obtienen los resultados para hallar la impedancia por fase del circuito secundario, mismo que se encuentra conectado mediante un conductor 4/0 ACSR AWG, por lo tanto, se tomara como referencia los resultados obtenidos directamente por el Cyme.

Impedancias equivalentes				
	A	B	C	
$Z [ABC] =$	0,767 + j1,135	0,1601 + j0,4868	0,1601 + j0,4868	Ohmios/mi
	0,1601 + j0,4868	0,7511 + j1,186	0,1601 + j0,4868	
	0,1601 + j0,4868	0,1601 + j0,4868	0,7401 + j1,223	

Figura 2.5. Impedancias Equivalentes del Circuito secundario, obtenidas mediante Cymdist.

Para determinar los resultados de resistencia e inductancia del circuito secundario, se toma el valor de Z_{11} y se multiplica por la longitud del vano teniendo en cuenta el sistema de unidades en la cual se encuentran dichos parámetros. Como se trata de una ampliación del prototipo que simula una red de 13.8kV, misma que se encuentra en el laboratorio de distribución de energía eléctrica, el circuito secundario ya se encuentra instalado en el prototipo y por demostración se procederá a encontrar los resultados para poder compararlos. La longitud correspondiente a este vano es de 150 m.

$$Z_{11} = (0.767 + j1.135) \left[\frac{\Omega}{milla} \right] * \left[\frac{0.621371 \text{ milla}}{1km} \right] * 0.15km$$

$$Z_{11} = 0.0715 + j0.10579 [\Omega]$$

$$L_{C/S} = 0.0715 [\Omega]$$

$$R_{C/S} = 0.280617 [mH]$$

Tabla 2.7. Valores de R y L mediante CYME para el C/S de 220V

$Z_{C/S-CYME}$	
$R_{C/S}$	0.0715 [Ω]
$L_{C/S}$	0.280617 [mH]

Donde:

$L_{C/S}$: Inductancia del circuito secundario de 220V.

$R_{C/S}$: resistencia del circuito secundario 220V

$Z_{C/S-CYME}$: impedancia del circuito secundario con R en [Ω], e inductancia en [mH].

Los resultados obtenidos para la impedancia del circuito secundario del prototipo fueron corroborados con los que se encuentran ya instalados y en funcionamiento.

2.3 ESCALAMIENTO EN PU PARA ENCONTRAR LOS VALORES DE RESISTENCIA E INDUCTANCIA MISMOS QUE SE ACOPLAN EN EL MÓDULO A ESCALA

2.3.1 DETERMINACIÓN DE IMPEDANCIA BASE TANTO DEL SISTEMA REAL DE 13.8KV COMO DEL PROTOTIPO DE 120V.

Dado que los equipos que se encuentran operando en los sistemas de distribución son caros y requieren de un lugar espacioso para su instalación, es imposible acoplar parámetros reales al emulador, por lo cual es necesario el proceso de escalamiento del alimentador de 13.8kV usando el sistema en por unidad (pu).

Para iniciar el proceso de escalonamiento mediante el sistema en pu, es importante definir de forma correcta las bases del sistema. Para el caso de la potencia aparente del alimentador primario se fijó en 50kVA, debido a que estos transformadores son los más utilizados dentro de los sistemas de distribución.

En los sistemas de potencia se tienen cuatro cantidades importantes para el estudio de flujos de potencia, corriente, voltaje, potencia e impedancia. Estas cantidades se encuentran relacionadas de tal manera que solo se necesita seleccionar dos de ellas.

En el alimentador primario y circuito secundario se seleccionaron las siguientes bases:

$$VB_1 = 13.8 [kV]$$

$$VB_2 = 220 [V]$$

$$SB = 50 [kVA]$$

Donde:

VB_1 : voltaje base referido al lado de medio voltaje de la línea de 13.8kV.

VB_2 : voltaje base referido al lado de bajo voltaje de 220V.

SB : potencia base del sistema de 13.8kV.

El transformador de distribución seleccionado en el simulador de Cyme, tiene una potencia aparente de 50kVA, con voltaje línea a línea de 13.8kV en el primario y 220V en el secundario. Una vez fijados la potencia base y el voltaje base tanto en el lado de medio voltaje como en el lado de bajo voltaje, se puede determinar el valor de la impedancia base de la siguiente forma.

$$Z_{B_1} = \frac{(V_{B_1})^2}{S_B} = \frac{(13800 \text{ V})^2}{50000 \text{ VA}} = 3808.8 [\Omega]$$

$$Z_{B_2} = \frac{(V_{B_2})^2}{S_B} = \frac{(220 \text{ V})^2}{50000 \text{ VA}} = 0.968 [\Omega]$$

Debido a que existe un transformador en el circuito, se deben definir dos bases de impedancia, Z_{B_1} corresponde al valor de impedancia base del lado de medio voltaje, mientras que Z_{B_2} corresponde al valor de impedancia base del lado de bajo voltaje.

Para definir los parámetros del modelo a escala es importante conocer el voltaje de la instalación, el cual se utilizó una fuente estabilizadora de voltaje de 120V con una potencia de 50VA misma que se encuentra conectado a un transformador reductor de 120V a 60V.

Para hallar la impedancia base del prototipo se aplican los mismos pasos ya detallados anteriormente, donde es importante definir el voltaje base y la potencia base del sistema a escala.

$$V_{b_1} = 120 [V]$$

$$V_{b_2} = 60 [V]$$

$$S_b = 50 [VA]$$

Donde:

V_{b_1} : voltaje base referido al lado de la fuente estabilizadora de 120V la cual representa la línea de 13.8kV.

V_{b_2} : voltaje base referido al lado del secundario del transformador de 60V la cual representa al circuito secundario de 220V.

S_b : potencia base del sistema a escala de 120V.

$$Z_{b_1} = \frac{(V_{b_1})^2}{S_b} = \frac{(120 \text{ V})^2}{50 \text{ VA}} = 288 [\Omega]$$

$$Z_{b_2} = \frac{(V_{b_2})^2}{S_b} = \frac{(60 \text{ V})^2}{50 \text{ VA}} = 72 [\Omega]$$

Z_{b_1} y Z_{b_2} corresponden a las impedancias base del prototipo de 120V en el primario y 60V en el secundario.

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA REAL EN EL PROTOTIPO TANTO PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO COMO EL CIRCUITO SECUNDARIO.

Para conocer los valores reales de R y L que se instalarán en el prototipo es necesario relacionar los dos sistemas el cual representa al sistema real de 13800/220 V como del prototipo de 120/60 V. Para esto se usan las bases de impedancia detalladas anteriormente llegando a obtener los siguientes resultados.

Para determinar la impedancia que conformaran el circuito primario en el emulador se realiza la siguiente conversión:

$$Z_{prototipo-A/P} = \frac{Z_{b1}}{Z_{B1}} * Z_{A/P-CYME} \quad (2.2)$$

$$Z_{prototipo-A/P} = \frac{Z_{b1}}{Z_{B1}} * Z_{A/P-CYME}$$

$$Z_{prototipo-A/P} = \frac{288 [\Omega]}{3808.8 [\Omega]} * (R_{A/P} ; L_{A/P})$$

$$Z_{prototipo-A/P} = 0.07561 * (6.92984 [\Omega] ; 29.9402 [mH])$$

$$R_{prototipo-A/P} = 0.07561 * 6.92984 = 0.52397 [\Omega]$$

$$L_{prototipo-A/P} = 0.07561 * 29.9402 = 2.26378 [mH]$$

Tabla 2.8. Valores de R y L obtenidos en el prototipo para el A/P que simula una red de 13.8kV.

$Z_{prototipo-A/P}$	
$R_{prototipo-A/P}$	0.52397 [Ω]
$L_{prototipo-A/P}$	2.26378 [mH]

Donde:

$Z_{prototipo-A/P}$: impedancia del prototipo referida al alimentador primario de 13.8kV, con R en [Ω], e inductancia en [mH].

$R_{prototipo-A/P}$: resistencia del circuito primario de 120V en [Ω].

$L_{prototipo-A/P}$: inductancia del circuito primario de 120V en [mH].

Usando la misma metodología descrita anteriormente para hallar la impedancia del circuito primario que simula el alimentador, se puede determinar la impedancia para el circuito secundario, arrojando los siguientes resultados.

$$Z_{prototipo-C/S} = \frac{Z_{b2}}{Z_{B2}} * Z_{C/S-CYME}$$

$$Z_{prototipo-C/S} = \frac{72 [\Omega]}{0.968 [\Omega]} * (R_{C/S}; L_{C/S})$$

$$Z_{prototipo-C/S} = 74.3801 * (0.0715 [\Omega]; 0.280617 [mH])$$

$$R_{prototipo-C/S} = 74.3801 * 0.0715 = 5.31818 [\Omega]$$

$$L_{prototipo-C/S} = 74.3801 * 0.280617 = 20.87232 [mH]$$

Tabla 2.9 Valores de R y L obtenidos en el prototipo para el C/S que simula una red de 220V.

$Z_{prototipo-C/S}$	
$R_{prototipo-C/S}$	5.31818 $[\Omega]$
$L_{prototipo-C/S}$	20.87232 $[mH]$

Donde:

$Z_{prototipo-C/S}$: impedancia del prototipo referida al circuito secundario de 220V, con R en $[\Omega]$, e inductancia en $[mH]$.

$R_{prototipo-C/S}$: resistencia del circuito secundario de 60V en $[\Omega]$.

$L_{prototipo-C/S}$: inductancia del circuito secundario de 60V en $[mH]$.

Con los valores encontrados se procede a la construcción de la resistencia e inductancia, mismas que ingresarán a formar parte del módulo emulador de 13.8kV.

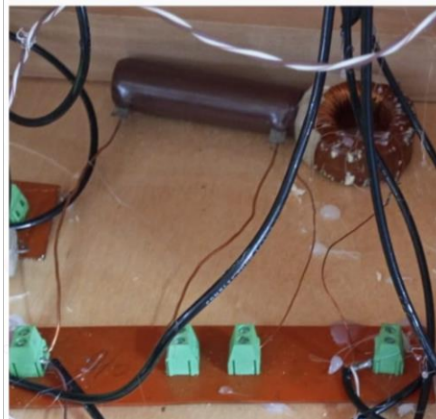


Figura 2.6. Construcción de R y L para el prototipo.

Para la construcción de la impedancia que simula el circuito primario del prototipo, fue necesario el uso de una resistencia de potencia la cual soportara por lo mínimo 120 V en sus terminales, mientras que para la inductancia se construyó mediante un modelado que incluye un núcleo toroidal usando alambre esmaltado de cobre calibre 24 AWG.

2.3.3 OBTENCIÓN DE LA CARGA EN EL PROTOTIPO

Para determinar el valor de la carga que se encuentra conectada en el prototipo fue necesario realizar la conversión respectiva usando las potencias bases de los dos sistemas en pu. El valor de la carga establecida en el simulador es de 2.11kVA con un factor de potencia de 0.95 como se observa en la figura 2.7.


Parámetros				
Modelo de carga:	DEFAULT			
Tipo de cliente:	Residencial			
Año:	2020			
Conexión:				
Prioridad		Normal: NINGUNO		
		Emergencia: NINGUNO		
Distribución de carga				
Estado: Desbloqueado				
	A	B	C	Total
Potencia aparente:	2,11	2,11	2,11	6,32 kVA
Factor de potencia:	95,0	95,0	95,0	95,0 %
Consumo:	0,0	0,0	0,0	0,0 kWh
Capacidad conectada:	0,0	0,0	0,0	0,0 kVA
Clientes:	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 2.7. Datos de carga establecidos en Cyme

De manera que el equivalente de la carga en el prototipo se encuentra relacionada mediante las ecuaciones que se describen a continuación.

$$S_{prototipo} = \frac{S_b}{S_B} * S_{CYME} \quad (2.3)$$

Al reemplazar los valores se obtiene lo siguiente.

$$S_{prototipo} = \frac{50 VA}{50000 VA} * 2110 VA$$

$$S_{prototipo} = 2.11 VA$$

La carga que se determinó en los cálculos ya se encuentra instalada en el prototipo, la cual será útil para poder determinar las caídas de voltaje que se presentan tanto en el circuito primario como secundario del prototipo y poder compararlas con los resultados arrojados por el Cymdist de Cyme.

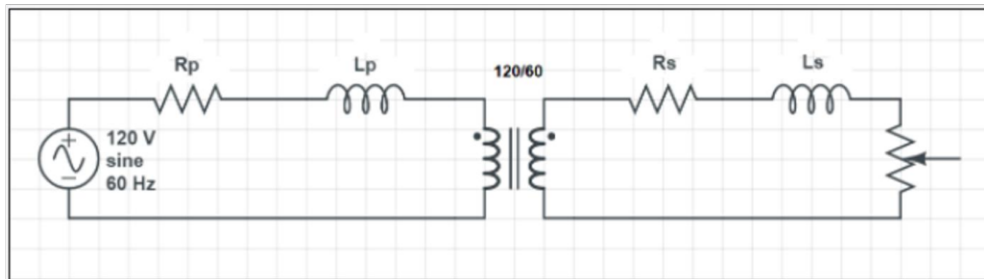


Figura 2.8. Circuito equivalente del prototipo que representa una red de distribución de 13.8kV/220V.

2.4 CAÍDAS DE VOLTAJE

2.4.1 CALCULO DE CAÍDA DE VOLTAJE USANDO EL FACTOR DE CAÍDA DE VOLTAJE O FCV

Aplicando las ecuaciones que intervienen la longitud, el factor de caída de voltaje y la potencia de la carga se determinará las caídas de voltaje para posteriormente compararlas con los resultados arrojados por el simulador de Cyme.

La ecuación 1.18 describe la caída de voltaje en porcentaje, relacionando la longitud, FCV y la carga es la siguiente:

$$\Delta V(\%) = kVA_T * L * FCV$$

De la ecuación descrita se tiene la longitud del tramo que equivale a 15km correspondiente al conductor 4/0 ASCR AWG 6/1 y la potencia de la carga que equivale 2.11kVA. Para determinar el Factor de caída de voltaje debe aplicarse la ecuación que se muestra a continuación:

$$FCV = \frac{r * \cos \phi + x * \sin \phi}{10 * kV_{L-L}^2}$$

Donde:

"r" y "x" están dados en ohmios por kilómetro, cuyos parámetros se obtienen de las tablas del Libro de Stevenson de Sistemas Eléctricos de Potencia. Para el factor de potencia se tiene fijado en 0.95 y el voltaje de línea del circuito es de 13.8kV.

$$r = 0.592 \frac{\Omega}{milla} * \frac{0.62137}{1km} = 0.368 \frac{\Omega}{km}$$

$$x = 0.581 \frac{\Omega}{milla} * \frac{0.62137}{1km} = 0.3681 \frac{\Omega}{km}$$

$$\cos \phi = 0.95 ; \sin \phi = 0.31$$

$$kV_{L-L}^2 = (13.8kV)^2$$

Remplazando valores se tiene.

$$FCV = \frac{(0.368 * 0.95) + (0.361 * 0.31)}{10 * (13.8)^2} = 0.000243$$

Con el factor de caída de voltaje encontrado podemos hallar la caída de voltaje en porcentaje del alimentador primario cuyo conductor es 4/0 ACSR AWG.

$$\Delta V(\%) = kVA_T * L * FCV$$

$$\Delta V(\%) = 2.11 * 15 * 0.000243$$

$$\Delta V(\%)_{\text{calculado}} = 0.0076$$

La caída de voltaje obtenida está dada para el conductor 4/0 conectado a la red de distribución de 13.8 kV con una longitud del tramo aproximado de 15 km.

2.4.2 TRANSFORMACIÓN AL SISTEMA EN (p.u.) DE LA CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDA EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO PARA EL CASO DE CYMDIST Y PROTOTIPO

Para determinar el valor de caída de voltaje en por unidad se debe dividir el valor que se obtienen en los resultados para el voltaje Base del sistema.

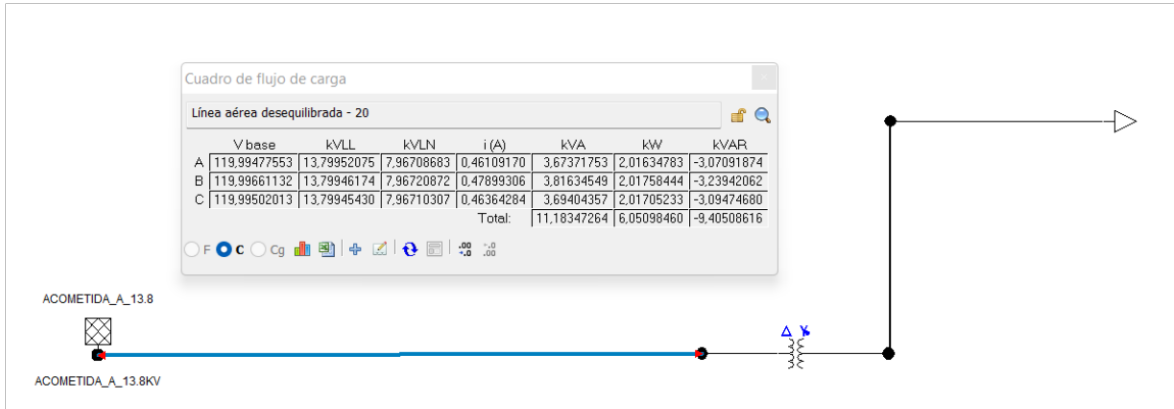


Figura 2.11. Resultados obtenidos mediante el flujo de carga realizado en Cymdist.

Nuestra prioridad es el circuito primario cuyo conductor es 4/0 ACSR mismo que será acoplado al sistema a escala que se encuentra en el laboratorio de distribución de energía eléctrica.

Para determinar los cálculos de forma más exacta se toma la mayor cantidad de decimales posibles. En el caso del voltaje base para el alimentador primario según Cymdist es de 13.8kV.

$$\Delta V_{A/P-cymdist} = 13799.5207 - 13800$$

$$\Delta V_{A/P-cymdist} = 0.4793 \text{ V}$$

Transformando al sistema en pu:

$$\Delta V_{A/P-cymdist}(pu) = \frac{\Delta V_{A/P-cymdist}}{V B_{sitema}}$$

$$\Delta V_{A/P-cymdist}(pu) = \frac{0.4793 \text{ V}}{13800 \text{ V}}$$

$$\Delta V_{\frac{A}{P}-cymdist}(pu) = 0.0000347$$

Con los resultados obtenidos de caída de voltaje en Cymdist, se procede a determinar la caída de voltaje en pu que se tiene en el prototipo mediante las mediciones que realiza el voltímetro inalámbrico, posteriormente se comparan los resultados obtenidos y se analiza el grado de exactitud que se tiene en las mediciones. El voltaje base para el prototipo es de 120 V.

$$\Delta V_{A/P-prototipo} = 0.00396791 \text{ V}$$

$$\Delta V_{A/P-prototipo}(pu) = \frac{\Delta V_{A/P-prototipo}}{V B_{sitema}}$$

$$\Delta V_{A/P-prototipo}(pu) = \frac{0.00396791 V}{120 V}$$

$$\Delta V_{A/P-prototipo}(pu) = 0.00003309$$

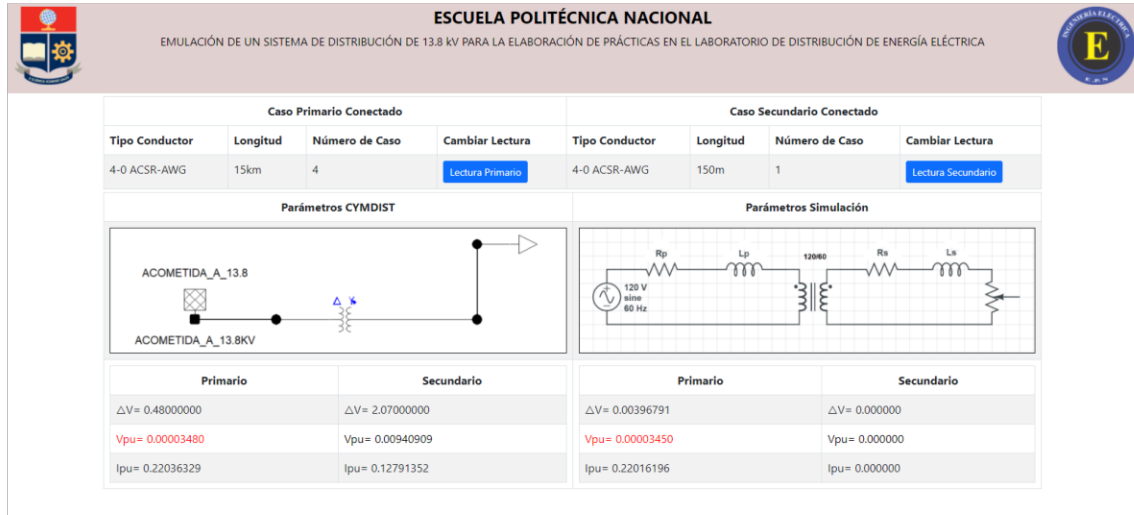


Figura 2.12. Resultados obtenidos mediante la medición inalámbrica en el prototipo

Se puede determinar que los resultados de caída de voltaje obtenidos mediante la medición del voltímetro inalámbrico del prototipo son diferentes a los obtenidos mediante Cymdist, pero al transformarlos al sistema en pu, dichos resultados coinciden validando de que la construcción del prototipo es eficiente. Por otra parte, para ser más exactos se determina el porcentaje de error en las mediciones existentes en el prototipo y los resultados arrojados por Cymdist.

$$Error(\%) = \frac{|\Delta V(pu)_{prototipo} - \Delta V(pu)_{CYME}|}{\Delta V(pu)_{CYME}} * 100$$

$$Error(\%) = \frac{|0.00003309 - 0.0000347|}{0.0000347} * 100$$

$$Error(\%) = 4.63\%$$

2.5 DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE DEL ALIMENTADOR PRIMARIO EN POR UNIDAD (p.u.)

Para determinar la corriente en por unidad del sistema de 13.8kV y del prototipo, se debe definir la potencia base y el voltaje base de los dos sistemas.

Para los resultados arrojados de Cymdist se toma como voltaje base 13.8kV y la potencia base de 50kVA.

$$SB_{13.8kV} = 50 \text{ kVA}$$

$$VB_{13.8kV} = 13.8 \text{ kV}$$

$$IB_{13.8kV} = \frac{SB_{13.8kV}}{\sqrt{3} * VB_{13.8kV}}$$

$$IB_{13.8kV} = \frac{50 \text{ KVA}}{\sqrt{3} * 13.8 \text{ KVA}} = 2.0919 \text{ [A]}$$

Para determinar el valor de corriente por unidad de cyme, se divide la corriente de línea para la corriente base calculada, obteniendo el siguiente resultado.

$$I(pu)_{13.8kV} = \frac{I_{por \text{ fase-cyme}}}{IB_{13.8kV}} \text{ [pu]}$$

$$I(pu)_{13.8kV} = \frac{0.461091}{2.0919} = 0.2203 \text{ [pu]}$$

Para determinar la corriente base del circuito primario del prototipo, se toma como voltaje base 120V que pertenece a la fuente estabilizadora y la potencia base de 50VA.

$$Sb_{prototipo} = 50 \text{ VA}$$

$$Vb_{prototipo} = 120 \text{ V}$$

$$Ib_{prototipo} = \frac{50 \text{ VA}}{\sqrt{3} * 120 \text{ V}}$$

$$Ib_{prototipo} = \frac{SB_{13.8kV}}{\sqrt{3} * VB_{13.8kV}} = 0.2405 \text{ [A]}$$

De los resultados de corriente medidos en el prototipo se tiene la corriente en pu

$$I(pu)_{prototipo} = 0.21996$$

2.5.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL IDENTIFICADOR DE CASOS

Se construye un identificador de casos ya que el prototipo contiene diferentes conexiones con distintos calibres de conductor, para ello es importante el uso de la circuitería electrónica misma que al identificar el tipo de caso encenderá un diodo led mostrando en que alimentador nos encontramos o a su vez en que tramo del circuito secundario se encuentra conectado el voltímetro inalámbrico.

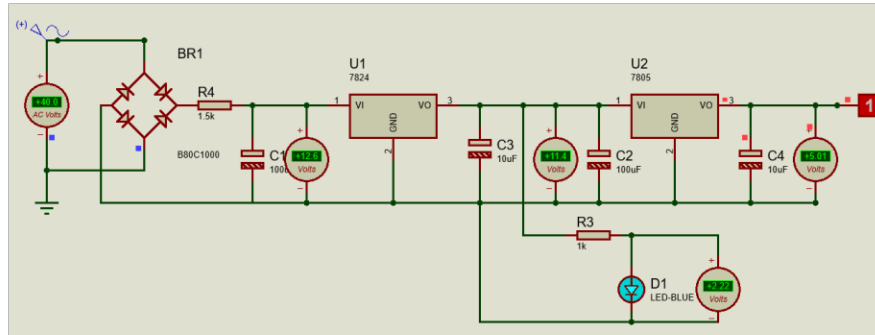


Figura 2.13. Circuito identificador de casos para el prototipo.

Para identificar los casos existentes en el prototipo se debe tener en cuenta los siguiente:

- Rectificación de voltaje: en Esta etapa el circuito electrónico recibe el voltaje Alterno de la impedancia del alimentador primario o del circuito secundario considerando que voltaje obtenido del prototipo no supera los 10V. La rectificación de voltaje es necesaria ya que el circuito electrónico se maneja con corriente directa.
- Regulación de voltaje DC: en esta etapa se toma el voltaje continuo rectificado, que ingresará a un regulador de voltaje LM7824 y cuyo voltaje de entrada “Vin” estará en el rango de 22 a 40 VDC, este regulador permite tener un voltaje DC estable en su salida “Vout” de 24 VDC.
- Detección del circuito mediante el diodo led: mediante el uso de un divisor de voltaje realizado con resistencias, se procede a la energización de un diodo led que se encenderá cuando detecte una línea en funcionamiento, mientras tanto el led permanecerá apagado.
- Envío de un bit lógico al circuito de control: en esta etapa, se reduce el voltaje a 5 Voltios de corriente continua mediante el uso del LM7805. Posteriormente se enviar un 1 o 0 lógico a un microprocesador, de esta forma se puede diferenciar con precisión entre cada caso construido, y que será direccionado inalámbricamente a una Tablet donde se podrá observar los resultados de corriente y caída de voltaje en por unidad, además de la caída de voltaje en voltios. Los resultados podrán ser comparados con los obtenidos en Cymdist y los medidos en tiempo real por el voltímetro inalámbrico mismo que ya se encuentra instalado en el prototipo.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON CYME RELACIONADOS A LA CAÍDA DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL FCV.

De los resultados obtenidos por la simulación realizada en Cyme se puede observar en la figura 3.7 que la caída de voltaje para el conductor 4/0 ACSR AWG conectado al sistema de 13.8kV con una potencia instalada de 2.11kVA, se encuentra alrededor de 1V.

Para obtener los resultados de caída de voltaje se debe correr un flujo de carga dentro de Cyme y posteriormente desplegar el cuadro de resultados para observar los voltajes que se tienen en cada final del tramo, tanto para el circuito primario como para el circuito secundario.

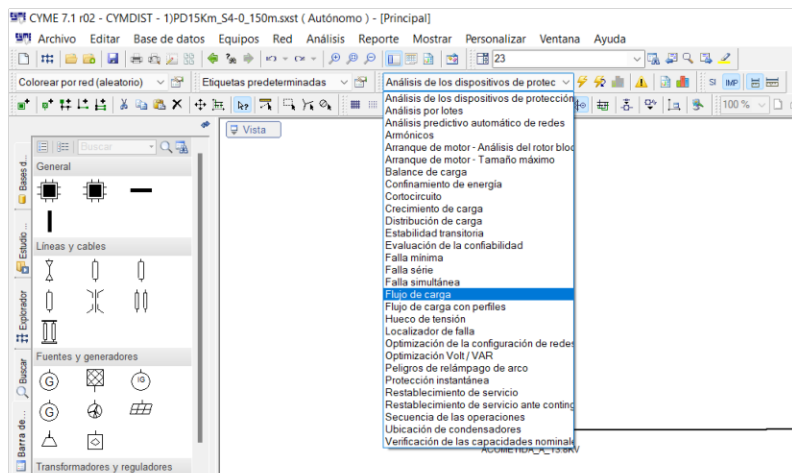


Figura 2.9. Flujo de carga para obtener las caídas de voltaje en Cyme

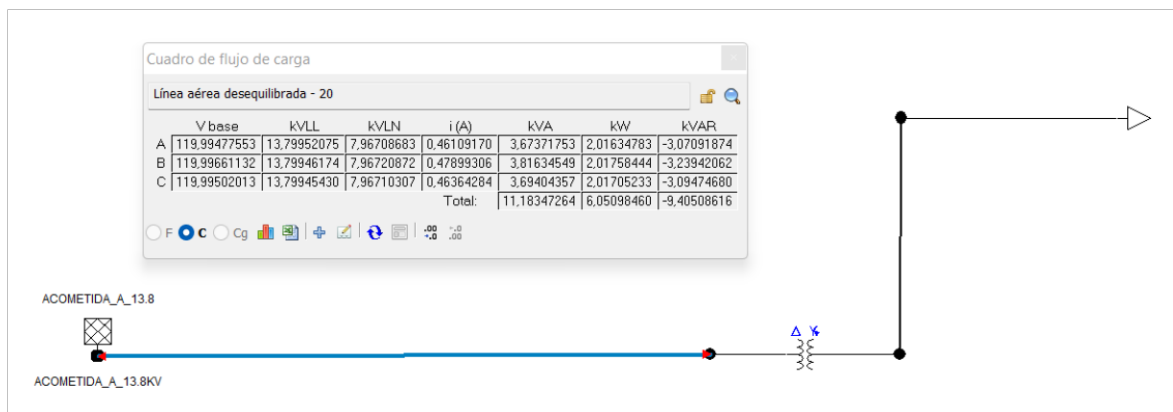


Figura 2.10. Cuadro de resultados de Flujo de Carga

En el cuadro de resultados se tiene los valores correspondientes a la caída de voltaje en cada fase tanto del circuito primario como secundario, además se tiene las corrientes que circulan por cada fase.

Para determinar la caída de voltaje se debe aplicar la ecuación que relaciona el voltaje de la fuente y el voltaje que se tiene al final del tramo de la siguiente manera.

$$\Delta V(\%) = \frac{|\text{voltaje al final del tramo} - \text{voltaje al inicio del tramo}|}{\text{voltaje al inicio del tramo}} * 100$$

Donde se observa en la figura 2.9 que el voltaje al final de Línea de la “fase a” es 13.799kV y el voltaje en el inicio del tramo es 13.8kV se puede determinar la caída de voltaje en dicho alimentador primario.

$$\Delta V(\%)_{CYME} = \frac{|13.799kV - 13.8kV|}{13.8KV} * 100$$

$$\Delta V(\%) = 0.0073$$

Se determina el porcentaje de error de caída de voltaje mediante los resultados obtenidos matemáticamente y los resultados arrojados por el Cyme, tomando como referencia los resultados de Cyme, se tiene lo siguiente.

$$Error(\%) = \frac{|\Delta V(\%)_{\text{calculado}} - \Delta V(\%)_{CYME}|}{\Delta V(\%)_{CYME}} * 100$$

$$Error(\%) = \frac{|0.0076 - 0.0073|}{0.0073} * 100$$

$$Error(\%) = 4.1\%$$

3.2 TABLAS DE CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDAS EN EL PROTOTIPO Y CYMDIST PARA EL ALIMENTADOR PRIMARIO

Tabla 3.1 Resultados obtenidos de Cyme y el prototipo para el circuito primario

Resultados obtenidos mediante mediciones en el prototipo-Alimentador Primario							
CAS OS	CIRCUITO PRIMARIO	$\Delta V(V)$ -CYME A/P	$\Delta V(\text{pu})$ -CYME A/P	% Error	$\Delta V(\text{pu})$ -PROTOTIPO-A/P	$\Delta V(V)$ -PROTOTIPO A/P	CIRCUITO SECUNDARIO
1	4-0 ACSR-AWG-15km	0,48	0,0000348	0,862068966	0,0000345	0,00396791	4-0 ACSR-AWG-150m
2	4-0 ACSR-AWG-15km	0,52	0,00003768	1,592356688	0,00003708	0,0042645	3-0 ACSR-AWG-250

3	4-0 ACSR-AWG-15km	0,51	0,00003 696	0,9740 25974	0,0000366	0,00420853	2-0 ACSR-AWG-200m
4	4-0 ACSR-AWG-15km	0,5	0,00003 623	0,5520 28705	0,00003603	0,00414298	#2ACSR-AWG-150m
5	4-0 ACSR-AWG-15km	0,62	0,00004 493	0,1112 8422	0,00004488	0,00516129	#2ACSR-AWG-300m

En la tabla 3.1 se muestra los resultados de las mediciones realizadas por el voltímetro inalámbrico del prototipo. En este caso las puntas de prueba del voltímetro fueron ubicadas en el alimentador primario.

Para el caso 1, se dispone a determinar la caída de voltaje en por unidad (p.u.) tanto del simulador de Cyme como del prototipo, para ello, en el prototipo se procedió a conectar el alimentador primario 4/0 ACSR AWG de 15km con el circuito secundario correspondiente al conductor número 4/0 ACSR-AWG de 150m, de donde el porcentaje de error correspondiente a las mediciones referidas al alimentador primario es de 0.86% aproximadamente, con esto se concluye que las mediciones para este circuito son los correctos.

Para el caso 2, de la misma forma, se conecta el prototipo correspondiente al alimentador primario 4/0 ACSR AWG de 15km con el circuito secundario correspondiente al conductor número 3/0 ACSR-AWG de 250m, de donde el porcentaje de error correspondiente a las mediciones referidas al alimentador primario es de 1.59% aproximadamente, siendo el error porcentual más elevado dentro de las mediciones obtenidas.

Para los demás casos donde se mantiene conectado el conductor 4/0 ACSR AWG en el alimentador primario, se puede visualizar en la tabla 3.1 que la caída de voltaje en el circuito primario aumenta debido a que en el circuito secundario se instalan conductores con menor calibre y vanos más largos. El incremento de la caída de voltaje en el circuito primario se debe a que la corriente aumenta debido a que se tiene una mayor impedancia en el circuito secundario y esto se refleja al alimentador primario mediante la relación de transformación provocando que las pérdidas de potencia sean incrementadas. La caída de voltaje más elevada presente en el alimentador primario se encuentra al instalar en el circuito secundario el conductor número 2 ACSR AWG con un vano aproximado de 300m.

3.3 TABLAS DE CAÍDA DE VOLTAJE OBTENIDAS EN EL PROTOTIPO Y CYMDIST PARA EL CIRCUITO SECUNDARIO

Tabla 3.2 Resultados obtenidos mediante Cyme y el prototipo para el circuito secundario

Resultados obtenidos mediante mediciones en el prototipo-Circuito secundario							
CAS OS	Circuito primario	$\Delta V(V)$ -CYME	V(pu)-CYME	% Error	V(pu)-PROTOTIPO	$\Delta V(V)$ -PROTOTIPO	CIRCUITO SECUNDARIO
1	4-0 ACSR-AWG-15km	2,07	0,00940909	0,813043557	0,00933259	0,55995566	4-0 ACSR-AWG-150m
2	4-0 ACSR-AWG-15km	2,775	0,01261364	0,237520652	0,0126436	0,75861585	4-0 ACSR-AWG-250m
3	4-0 ACSR-AWG-15km	3,48	0,01581818	0,857747225	0,0156825	0,94094984	4-0 ACSR-AWG-250m
4	4-0 ACSR-AWG-15km	4,2	0,01909091	0,118171423	0,01911347	1,146808014	4-0 ACSR-AWG-300m
5	4-0 ACSR-AWG-15km	2,45	0,01113636	3,998793142	0,01158168	0,69490074	3-0 ACSR-AWG-150m
6	4-0 ACSR-AWG-15km	3,3	0,015	6,6	0,01401	0,84054276	3-0 ACSR-AWG-200m
7	4-0 ACSR-AWG-15km	4,12	0,01872727	3,871466583	0,01800225	1,08013479	3-0 ACSR-AWG-250m
8	4-0 ACSR-AWG-15km	4,97	0,02260455	6,443746945	0,02114797	1,26887832	3-0 ACSR-AWG-250m
9	4-0 ACSR-AWG-15km	3,92	0,01781818	3,692464662	0,01716025	1,02961497	2-0 ACSR-AWG-200m
10	4-0 ACSR-AWG-15km	4,92	0,02236364	10,2768154	0,02006537	1,20392237	2-0 ACSR-AWG-200m
11	4-0 ACSR-AWG-15km	6	0,02727273	4,619632871	0,02601283	1,56076952	2-0 ACSR-AWG-300m
12	4-0 ACSR-AWG-15km	4,9	0,02227273	1,259791682	0,02199214	1,31952815	#2ACSR-AWG-150m
13	4-0 ACSR-AWG-15km	6,64	0,03018182	2,704807066	0,02936546	1,76192751	#2ACSR-AWG-200m
14	4-0 ACSR-AWG-15km	8,4	0,03818182	3,045297474	0,03701907	2,22114423	#2ACSR-AWG-250m
15	4-0 ACSR-AWG-15km	10,134	0,0406364	6,214846788	0,04316189	2,58971347	#2ACSR-AWG-300m

Para los resultados obtenidos mediante el voltímetro inalámbrico conectado en el circuito secundario, se puede observar que existe un porcentaje de error menor al 10.2 % correspondientes a las mediciones.

En la tabla 3.2 se muestran los resultados al conectar las puntas de prueba en los terminales correspondientes al circuito secundario de donde se visualiza que las caídas de voltaje aumentan debido a la relación de transformación que existe en la corriente que circula por el circuito secundario.

En el caso 15, se presenta la mayor caída de voltaje en el circuito secundario, debido a que el conductor corresponde al calibre más delgado siendo el número 2 ACSR AWG con un vano aproximado de 300m.

Los parámetros de R y L referentes al circuito secundario ya se encontraban instalados en el prototipo por ende existe un mayor porcentaje de error en las mediciones ya que la caída de voltaje representada en el prototipo depende en su mayoría de la impedancia la línea.

3.4 CONCLUSIONES

- Se demostró que las ecuaciones de Carson son muy útiles para determinar las impedancias propias y mutuas de cada conductor que conforman la red de distribución, ya sea para el alimentador primario de 13.8 kV, como para el circuito secundario de 220V. Para encontrar dichas impedancias solo fue necesario los parámetros de los conductores, tanto de resistencia en ohmios por milla y el radio medio geométrico en pies, mismos que se obtienen mediante tablas establecidas en los libros de Distribución de Energía Eléctrica y Sistemas de Potencia escritos por William H Kersting y William D Stevenson.
- Mediante la matriz de impedancia primitiva obtenida al aplicar la ecuación modificada de Carson, se pudo determinar la matriz de impedancia por fase usando la forma reducida de Kron, los parámetros obtenidos sirvieron para determinar el valor real de resistencia e inductancia por fase de nuestra red de distribución de 13.8kV.
- Se determino que las caídas de voltaje más elevadas se registran en los conductores de menor calibre, debido a que son conductores de aluminio los cuales poseen una conductividad del 61% respecto al cobre recocido, mismo que es considerado el más eficiente dentro de la fabricación de cables con 100% de conductividad. Por otra parte, la resistencia perteneciente a los conductores de aluminio de menor calibre es mayor en comparación a uno de calibre más elevado, ya que el conductor de mayor calibre posee un incremento considerable en su área transversal misma que reduce la resistencia. En los sistemas de corriente alterna se estima el incremento de la resistencia debido al trenzado, temperatura y el efecto de la frecuencia ya que se trabaja a 60 Hz. Para este caso se verificó que el conductor número 4/0 del alimentador primario de 15 km con nivel de voltaje correspondiente a 13.8kV en la fuente principal, registra una caída de voltaje del 0.0035%, mientras que en el circuito secundario de 150m de longitud con conductor 4/0 y nivel de voltaje de 219.293V en el secundario del transformador, se registra una caída de voltaje aproximada del 0.94%. Para poder demostrar con exactitud que la caída de voltaje es mayor en un conductor de menor calibre conectado a una misma carga, se seleccionó el cable número 2/0 en el secundario manteniendo el

4/0 en el alimentador primario, donde los resultados referentes a caídas de voltaje fueron los siguientes: en el alimentador primario se obtuvo una caída de voltaje del 0.0036% mientras que en el circuito secundario, con un voltaje en los terminales del transformador de 219.291V se observó una caída de voltaje del 1.33%. Con los resultados obtenidos se observa que la caída de voltaje en el circuito secundario con conductor 2/0, se incrementa un 41% respecto al conductor 4/0, mientras que en el alimentador primario con conductor 4/0, la caída de voltaje aumenta un 2.77% debido al incremento de la corriente que se tiene al conectar un conductor con mayor resistencia en el circuito secundario.

- Usando la estructura 3CP (trifásica centrada pasante) con conductor ACSR 4/0 AWG tanto para las tres fases como para neutro y aplicado para una longitud de 15 km, se pudo observar en la matriz de impedancia por fase arrojado por el software de simulación Cymdist que el valor de resistencia correspondiente a una sola fase es de 6,92984 ohmios y el valor de inductancia es de 29,9402 mili henrios, estos valores fueron corroborados con los cálculos matemáticos que se realizaron en este proyecto de titulación.
- El software de simulación Cyme utilizado en este proyecto de titulación fue de gran ayuda, ya que nos proporcionó los resultados de corrientes y caídas de voltaje en cada tramo. Para obtener las caídas de voltaje, fue necesario realizar un flujo de carga y posteriormente mostrar la tabla de resultados, donde se observó que los voltajes existentes, corresponden a los voltajes de cada nodo, es decir, el alimentador primario de 13 800V con conductor 4/0 y longitud de 15 km arrojó un voltaje en el extremo final de 13 799.52V, donde la caída de voltaje resultó ser de 0.48V o 0.0000348pu. De manera similar en el prototipo, como la fuente estabilizadora que proporciona la energía eléctrica es de 120V, al final de la línea se obtuvo una caída de voltaje aproximada de 0.0039679V o 0.0000345pu correspondiente al tramo que simula la línea de 13.8kV. Los valores en pu fueron determinados al dividir la caída de voltaje respecto al voltaje base de dicho sistema ya sea de 13.8 kV o 120V, de esta manera se concluye que los valores en pu son casi exactos, con un porcentaje de error muy pequeño, demostrando que el prototipo está funcionando correctamente.
- En el caso del circuito secundario con conductor 4/0 se observó que el voltaje de línea a línea en terminales del transformador fue de 219.2937 V mas no de 220 como debería ser idealmente, y en el extremo del circuito secundario se observó un voltaje 217.22 V y para determinar la caída de voltaje en ese tramo fue necesario

restar el voltaje que se tiene en el secundario del transformador y el voltaje al final del tramo del circuito secundario.

- Con la ayuda de los cálculos matemáticos, se pudo observar que la diagonal correspondiente a la matriz primitiva contiene las impedancias propias de cada cable, cuyo parámetro de la parte real abarca la resistencia del conductor, mientras que los elementos fuera de la diagonal correspondiente a las impedancias mutuas, solamente dependen del espaciamiento de los conductores del alimentador primario el cual está conformado por las tres fases y el neutro.
- Los valores de caída de voltaje en por unidad del software de simulación Cymdist son comparados con los valores medidos por el voltímetro inalámbrico del prototipo, siendo el valor exacto de caída de voltaje, el que pertenece a la simulación de Cymdist ya que el software toma en cuenta los parámetros reales dentro de un sistema de distribución tales como la temperatura, el incremento de resistencia debido al trenzado en los conductores aéreos, la distancia entre conductores, el tipo de estructura mediante el cual el sistema está construido y otros parámetros importantes que influyen dentro del estudio de sistemas de distribución de energía eléctrica. Sin embargo, las mediciones obtenidas por el prototipo tienen un margen de error menor al 5%, por lo cual se considera un sistema bastante confiable para realizar prácticas en el laboratorio de distribución.
- Las pérdidas de potencia en los alimentadores primarios y circuitos secundarios deben ser las más mínimas posibles, por lo que al diseñar una red de distribución se debe seleccionar los conductores adecuadamente, considerando las caídas de voltaje máximas permitidas por la empresa eléctrica de la región, en nuestro caso la empresa eléctrica Quito (EEQ), permite una caída de voltaje de 4% en alimentadores primarios y 3.5% en circuitos secundarios, por otra parte se debe considerar los costos de construcción de manera que la instalación sea eficiente, proporcionando de esta manera la energía eléctrica al usuario en condiciones favorables de voltaje y factor de potencia.
- Los resultados obtenidos tanto de Cymdist como del prototipo fueron transformados al sistema en por unidad y comparados, para posteriormente observar el porcentaje de error que poseen las mediciones del prototipo que simula una red de 13.8 kV, los resultados obtenidos fueron los siguientes: mediante la simulación en cyme se obtuvo un valor de 0.0000348 pu de caída de voltaje para el alimentador primario conectado a una red de 13.8 kV con conductor 4/0 ACSR AWG, mientras que en el

prototipo se observó un valor de 0.0000345 pu de caída de voltaje conectado a una fuente estabilizadora de 120 V y a un circuito R-L serie, el cual simula el alimentador primario de 13.8 kV con conductor 4/0. Con los valores obtenidos en pu, se determinó que el porcentaje de error fue de 0.86%, haciendo que los resultados obtenidos sean confiables, no obstante, se menciona que siempre va a existir este margen de error ya que, al tratarse de un sistema a escala, existen corrientes parasitas que se inyectan al sistema, debido a que se usan bobinas para lograr obtener la inductancia deseada de las líneas de distribución reales, mismas que causan una distorsión en las mediciones del prototipo.

3.5 RECOMENDACIONES

- Para obtener unos resultados eficientes mediante los cálculos matemáticos, es importante trabajar con por lo menos 5 decimales, de esa manera podemos disminuir el porcentaje de error que se tiene con los resultados teóricos y simulados por el simulador Cymdist de Cyme.
- Dado que este trabajo de titulación se trata de la ampliación del emulador de 13.8 kV existente en el laboratorio de distribución, es necesario desconectar la fuente de energía para poder implementar cualquier elemento eléctrico o electrónico dentro del prototipo, ya que alguna mal maniobra podría ocasionar que otros elementos ya conectados se puedan quemar y el sistema pierda su funcionalidad.
- El prototipo ya existente cuenta con un interruptor perteneciente a la parte electrónica y otro interruptor para la parte eléctrica o de fuerza, por lo que es importante encender primero la parte electrónica y posteriormente después de unos segundos la parte eléctrica, ya que la parte electrónica es mas sensible y puede sufrir algún daño debido a la interferencia que pueda generar el circuito de fuerza.
- Se debe verificar las unidades de medida con las que se encuentre trabajando en los cálculos matemáticos y compararlas con las unidades de medida del simulador para llegar a obtener los resultados precisos, caso contrario se cometerá errores extremos, donde los cálculos teóricos no tendrán ninguna concordancia con los valores obtenidos por el simulador.
- Es importante colocar la debida protección eléctrica en el prototipo de 13.8kV, ya que de esta manera se desactivaría de forma inmediata, protegiendo el emulador en cualquier emergencia que pueda presentarse en el funcionamiento del mismo.

- Para realizar las debidas mediciones en el prototipo, se debe seleccionar las puntas de prueba correctas, ya que el circuito electrónico es muy sensible y podría quemarse o a su vez demostrar una lectura errónea en la medición, por lo que se debe evitar tocar con los dedos, las puntas conductoras del cable o utilizar el voltímetro inalámbrico para medir los voltajes de otros elementos conectados a otra red que estén fuera del prototipo. Estas malas maniobras podrían dañar de forma definitiva el voltímetro inalámbrico.
- Se debe seleccionar una resistencia de potencia eficiente para la construcción de la línea que simula el alimentador primario de 13.8kV en el prototipo, ya que las resistencias que se usan en la parte electrónica son muy defectuosas, debido a que se calientan de forma excesiva de manera que aumentan la resistencia del circuito, proporcionando datos erróneos de medición en el prototipo.
- Se recomienda seleccionar de forma correcta las bases de voltaje, potencia y corriente para la transformación del sistema en pu, ya que los resultados obtenidos serán comparados y posteriormente permitirán determinar el margen de error que existe al pasar los parámetros obtenidos de la simulación de Cymdist del sistema de 13.8kV, a los valores que se obtienen en el prototipo de 120V.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. R. Ruales Parreño, «ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD DE PERDIDAS TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN,» Quito, 1995.
- [2] Didacticas Electrónicas, «I+D Electrónica,» ESP32-C3-13U, [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/espressif-systems/esp32/tarjeta-de-desarrollo-wi-fi-bluetooth-esp32-c3-13u-tarjetas-modulos-de-desarrollo-comunicaci%C3%B3n-con-de-wifi-wi-fi-bluetooth-esp32-esp-32-c3-mini-iot-wroom->. [Último acceso: 02 Febrero 2022].
- [3] S. Ramirez Castaño, Redes de Distribución de Energía, Tercera Edición ed., Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [4] C. F. Pillo Santamaria, «CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICA 13.2 kV PARA LA SECCIÓN 67 Y TIGRE EN EL BLOQUE GUSTAVO GALINDO VELASCO,» Quito, 2013.
- [5] H. M. Jiménez Bautista y J. F. Llumiquinga Simbaña, «EMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 kV PARA LA ELABORACIÓN DE

PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» Quito, 2021.

- [6] REGULACION NO. CONELEC - 004/01, CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN, Quito: Consejo Nacional de Electricidad, 23 de mayo de 2001.
- [7] RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL - 018/18, EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD -ARCONEL-, Quito: Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 13 de Abril de 2018.
- [8] CELEC EP - TRANSELECTRIC, PLAN DE EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN, Quito: Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP, 2018.
- [9] J. J. Grainger y W. D. Stevenson Jr, ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE MEXICO,S,A , 1996.
- [10] C. A. Guerra Salcedo y C. G. Pazmiño Cuenca, «REPOTENCIACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 230kV CON CONDUCTORES DE ÚLTIMA GENERACIÓN TIPO "T",» Quito, 2008.
- [11] A. Fayos Álvarez, «LÍNEAS ELÉCTRICAS Y TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» Universidad Politécnica de Valéncia, Valéncia, 2009.
- [12] ZMS CABLE, «ZMS CABLE TRANS MORE,» China, 2020. [En línea]. Available: <https://zmscable.es/cable-electrico/>. [Último acceso: 2022].
- [13] Prysmian Group, «Cable ACAR,» 2019. [En línea]. Available: https://latam.prysmiangroup.com/sites/default/files/product_center/latam/files/006_PG_FT_AL_ESP_Cable_Aluminio_Reforzado_ACAR.pdf.
- [14] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, vol. 3, New Mexico States University , Las Cruces, Nuevo Mexico: CRC Press, 2012.
- [15] D. L. Sánchez, DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE DE PUESTA A TIERRA EN APOYOS Y CABLES DE TIERRA DE FORMA EXACTA MEDIANTE UN ANÁLISIS NODAL, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2017.

5 ANEXOS

ANEXO I. Parámetros de los conductores de aluminio más utilizados en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

ANEXO II. Parámetros que caracterizan a l conductor 4/0 ACSR AWG.

ANEXO III. Fotografías de los elementos utilizados para la construcción del prototipo, mismo que será acoplado al circuito emulador de 13.8kV que se encuentra instalado en el laboratorio de distribución de energía eléctrica.

ANEXO IV. Características de los cables del aluminio reforzados de acero

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

ANEXO VI. Resultados obtenidos de las mediciones del Prototipo.

ANEXO I

ANEXO I. Parámetros de los conductores de aluminio más utilizados en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Tabla I.1. Parámetros de los conductores de aluminio

Calibre AWG	Clase	Material	DIÁMETRO Pulgadas	GMR Pies	RES Ω/milla	CAPACIDAD Amperios
1		ACSR	0.355	0.00418	1.38	200
1	7 STRD	COBRE	0.328	0.00992	0.765	270
1	CLASE A	AA	0.328	0.00991	1.224	177
2	6/1	ACSR	0.316	0.00418	1.69	180
2	7 STRD	COBRE	0.292	0.00883	0.964	230
2	7/1	ACSR	0.325	0.00504	1.65	180
2	AWG SLD	COBRE	0.258	0.00836	0.945	220
2	CLASS A	AA	0.292	0.00883	1.541	156
3	6/1	ACSR	0.281	0.0043	2.07	160
3	AWG SLD	COBRE	0.229	0.00745	1.192	190

4	6/1	ACSR	0.25	0.00437	2.57	140
4	7/1	ACSR	0.257	0.00452	2.55	140
4	AWG SLD	COBRE	0.204	0.00663	1.503	170
4	CLASE A	AA	0.232	0.007	2.453	90
5	6/1	ACSR	0.223	0.00416	3.18	120
5	AWG SLD	COBRE	0.1819	0.0059	1.895	140
6	6/1	ACSR	0.198	0.00394	3.98	100
6	AWG SLD	COBRE	0.162	0.00526	2.39	120
6	CLASE A	AA	0.184	0.00555	3.903	65
7	AWG SLD	COBRE	0.1443	0.00468	3.01	110
8	AWG SLD	COBRE	0.1285	0.00416	3.8	90
9	AWG SLD	COBRE	0.1144	0.00371	4.6758	80
10	AWG SLD	COBRE	0.1019	0.00330	5.9026	75
12	AWG SLD	COBRE	0.0808	0.00262	9.3747	40
14	AWG SLD	COBRE	0.0641	0.00208	14.8722	20
16	AWG SLD	COBRE	0.0508	0.00164	23.7262	10
18	AWG SLD	COBRE	0.0403	0.00130	37.6726	5
19	AWG SLD	COBRE	0.0359	0.00116	47.5103	4
20	AWG SLD	COBRE	0.032	0.00103	59.684	3
22	AWG SLD	COBRE	0.0253	0.00082	95.4835	2
24	AWG SLD	COBRE	0.0201	0.00065	151.616	1
1/0		ACSR	0.398	0.00446	1.12	230
1/0	7 STRD	COBRE	0.368	0.01113	0.607	310
1/0	CLASE A	AA	0.368	0.0111	0.97	202
2/0		ACSR	0.447	0.0051	0.895	270
2/0	7 STRD	COBRE	0.414	0.01252	0.481	360

2/0	CLASE A	AA	0.414	0.0125	0.769	230
3/0	12 STRD	COBRE	0.492	0.01559	0.382	420
3/0	6/1	ACSR	0.502	0.006	0.723	300
3/0	7 STRD	COBRE	0.464	0.01404	0.382	420
3/0	CLASE A	AA	0.464	0.014	0.611	263
3/8	STE	ACERO	0.375	0.00001	4.3	150
4/0	12 STRD	COBRE	0.552	0.0175	0.303	490
4/0	19 STRD	COBRE	0.528	0.01668	0.303	480
4/0	6/1	ACSR	0.563	0.00814	0.592	340
4/0	7 STRD	COBRE	0.522	0.01579	0.303	480
4/0	CLASE A	AA	0.522	0.0158	0.484	299
250,000	12 STRD	COBRE	0.6	0.01902	0.257	540
250,000	19 STRD	COBRE	0.574	0.01813	0.257	540
250,000	CON LAY	AA	0.567	0.0171	0.41	329
266,800	26/7	ACSR	0.642	0.0217	0.385	460
266,800	CLASS A	AA	0.586	0.0177	0.384	320
300,000	12 STRD	COBRE	0.657	0.0208	0.215	610
300,000	19 STRD	COBRE	0.629	0.01987	0.215	610
300,000	26/7	ACSR	0.68	0.023	0.342	490
300,000	30/7	ACSR	0.7	0.0241	0.342	500
300,000	CON LAY	AA	0.629	0.0198	0.342	350
336,400	26/7	ACSR	0.721	0.0244	0.306	530
336,400	30/7	ACSR	0.741	0.0255	0.306	530
336,400	CLASE A	AA	0.666	0.021	0.305	410
350,000	12 STRD	COBRE	0.71	0.0225	0.1845	670
350,000	19 STRD	COBRE	0.679	0.0214	0.1845	670

350,000	CON LAY	AA	0.679	0.0214	0.294	399
397,500	26/7	ACSR	0.783	0.0265	0.259	590
397,500	30/7	ACSR	0.806	0.0278	0.259	600
397,500	CLASE A	AA	0.724	0.0228	0.258	440
400,000	19 STRD	COBRE	0.726	0.0229	0.1619	730
450,000	19 STRD	COBRE	0.77	0.0243	0.1443	780
450,000	CON LAG	AA	0.77	0.0243	0.229	450
477,000	26/7	ACSR	0.858	0.029	0.216	670
477,000	30/7	ACSR	0.883	0.0304	0.216	670
477,000	CLASE A	AA	0.795	0.0254	0.216	510
500,000	19 STRD	COBRE	0.811	0.0256	0.1303	840
500,000	37 STRD	COBRE	0.814	0.026	0.1303	840
500,000	CON LAY	AA	0.813	0.026	0.206	483
565,500	26/7	ACSR	0.927	0.0313	0.1859	730
565,500	30/7	ACSR	0.953	0.0328	0.1859	730
565,500	CLASE A	AA	0.858	0.0275	0.186	560
600,000	37 STRD	COBRE	0.891	0.0285	0.1095	940
600,000	CON LAY	AA	0.891	0.0285	0.172	520
605,000	26/7	ACSR	0.966	0.0327	0.172	760
605,000	54/7	ACSR	0.953	0.0321	0.1775	750
636,000	27/7	ACSR	0.99	0.0335	0.1618	780
636,000	30/19	ACSR	1.019	0.0335	0.1618	780
636,000	54/7	ACSR	0.977	0.0329	0.1688	770
636,000	CLASE A	AA	0.918	0.0294	0.163	620
666,600	54/7	ACSR	1	0.0337	0.1601	800
700,000	37 STRD	COBRE	0.963	0.0308	0.0947	1040

700,000	CON LAY	AA	0.963	0.0308	0.148	580
715,500	26/7	ACSR	1.051	0.0355	0.1442	840
715,500	30/19	ACSR	1.081	0.0372	0.1442	840
715,500	54/7	ACSR	1.036	0.0349	0.1482	830
715,500	CLASE A	AA	0.974	0.0312	0.145	680
750,000	37 STRD	AA	0.997	0.0319	0.0888	1090
750,000	CON LAY	AA	0.997	0.0319	0.139	602
795,000	26/7	ACSR	1.108	0.0375	0.1288	900
795,000	30/19	ACSR	1.14	0.0393	0.1288	910
795,000	54/7	ACSR	1.093	0.0368	0.1378	900
795,000	CLASE A	AA	1.026	0.0328	0.131	720

ANEXO II

ANEXO II. Parámetros que caracterizan al conductor 4/0 ACSR AWG.

Tabla II.1. Parámetros que caracterizan al conductor 4/0 ACSR AWG

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

ANEXO III

ANEXO III. Fotografías de los elementos utilizados para la construcción del prototipo, mismo que se encuentran acoplados al circuito emulador de 13.8kV que se encuentra instalado en el laboratorio de distribución de energía eléctrica.



Figura III.1. construcción de la resistencia e inductancia para el alimentador primario



Figura III.2. Impedancia del alimentador primario correspondiente con conductor 4/0 ACSR AWG



Figura III.3. Placa identificadora de casos para el alimentador primario

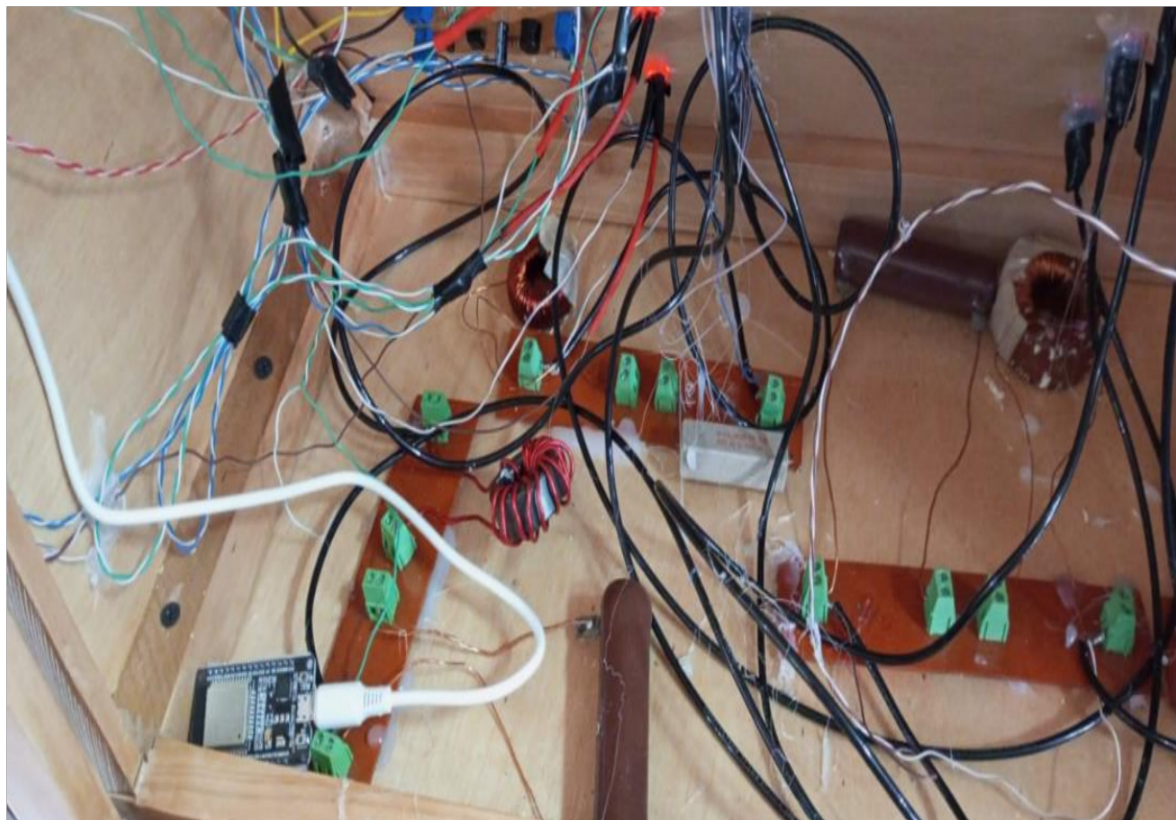


Figura III.4. Cableado y conexión respectiva dentro de los elementos del prototipo



Figura III.5. Construcción de la inductancia para el alimentador primario



Figura III.6. Construcción del módulo físico en donde se implementa la circuitería correspondiente



Figura III.7. Instalación del equipamiento eléctrico referidos a resistencia, inductancia, diodos led y borneras



Figura III.8. Acoplamiento del módulo correspondiente al sistema principal de 13.8kV con conductor 4/0 ACSR AWG

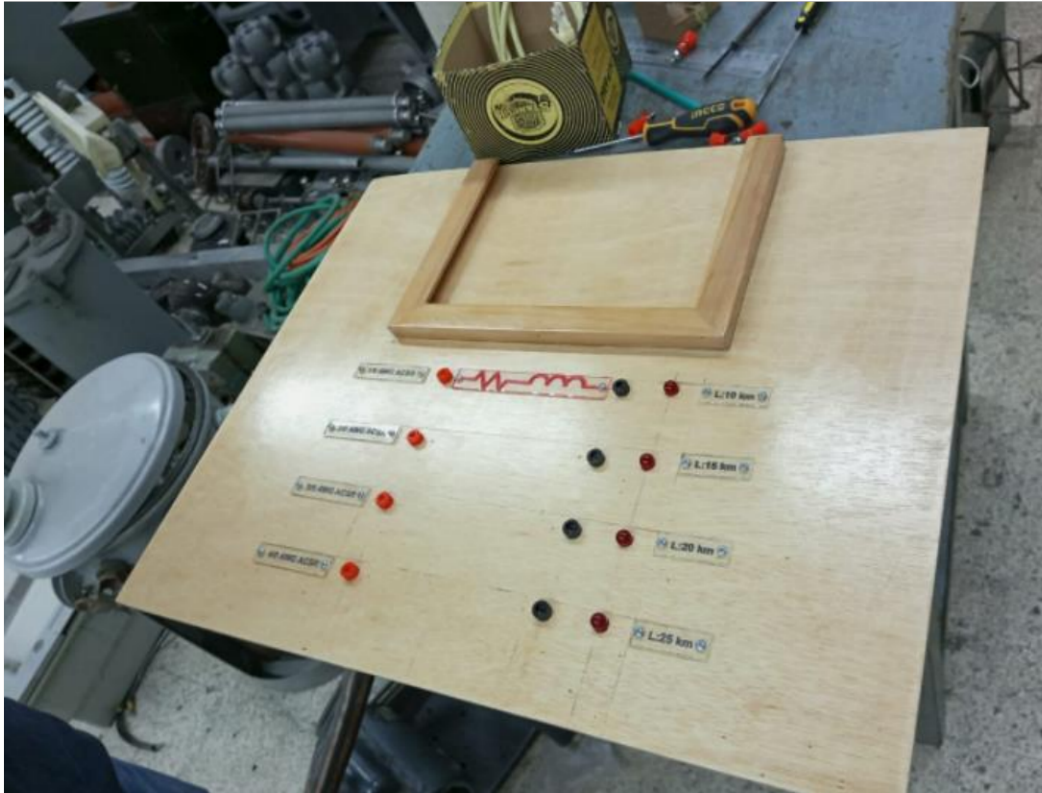


Figura III.9. Tablero principal del circuito emulador de 13.8kV

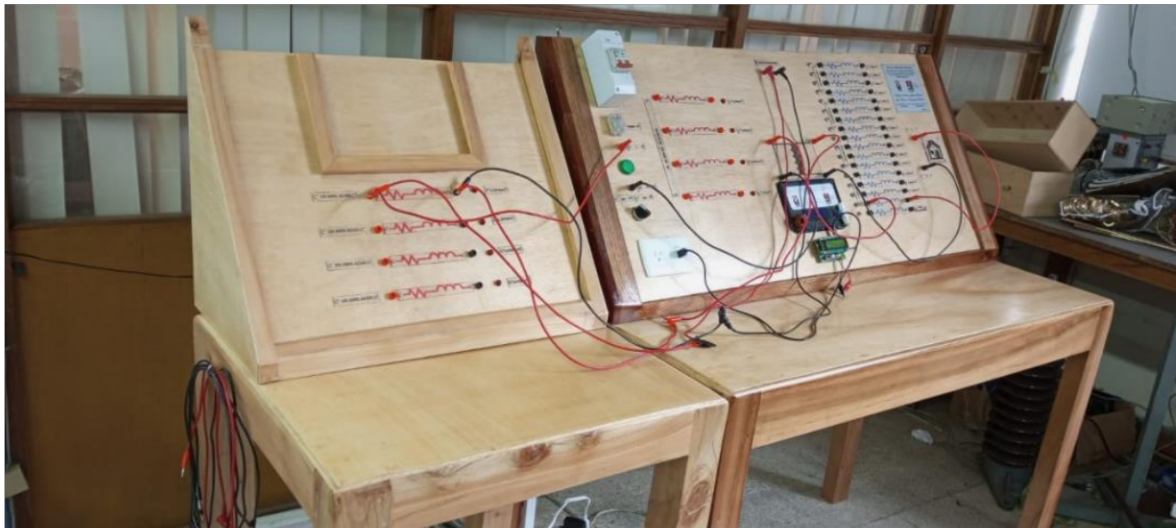


Figura III.10. Prototipo del alimentador primario de 13.8kV, acoplado al simulador a escala que se encuentra disponible en el laboratorio de distribución de energía eléctrica



Figura III.11. Conexionado para obtener las lecturas de caída de voltaje en el circuito secundario

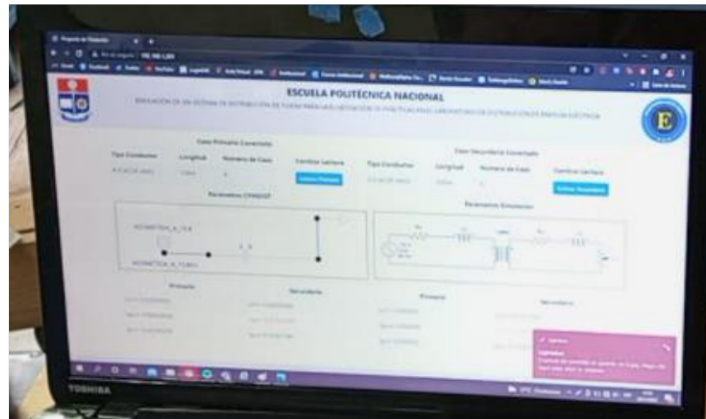


Figura III.12. visualización de los resultados obtenidos mediante la interfaz gráfica que proporciona el prototipo

ANEXO IV

ANEXO IV. Características de los cables del aluminio reforzados de acero

Tabla A. 2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES DE ALUMINIO REFORZADOS* DE ACERO

(Aluminum Company of America)

Conductores de una sola capa



Referencia Book con la autorización de Westinghouse Electric del 61 %.

* Véase el Referencia Book con la autorización de Westinghouse Electric del 61 %.

18C

* Véase el Referencia Book con la autorización de Westinghouse Electric del 61 %.

Circular mils* o galgas americanas de alambre (A.W.G.) de aluminio	Aluminio		Acero		Equiv. cobre* circular mils o A.W.G.	Carga de rotura lib*	Peso lib/milla*	Radio medio geométrico a 60 Hz para una corriente aprox. el 75% de su capacidad de conductor*	Capacidad aproximada de corriente A	Resistencia ohm/conductor/milla*												Reactancia inductiva ohm/conductor/milla* a 1 pie de separación			Reactancia capacitiva megohm/conductor/milla* a 1 pie de separación			
	Hilos	Capas	Diámetro hilo pulg*	Hilos						Diámetro hilo pulg*	25°C (77°F) corrientes pequeñas			50°C (122°F) corriente del 75% cap. &			Corrientes pequeñas			Corriente del 75% cap. &			25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz
											c.c.	25 Hz	50 Hz	60 Hz	c.c.	25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz							
																25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz							
1,590,000	54	3	0.1716	19	0.1030	1,545	56,000	10,777	0.8520	1,380	0.0587	0.0588	0.0590	0.0591	0.0646	0.0656	0.0675	0.0684	0.1495	0.289	0.339	0.1950	0.0077	0.0014				
1,310,500	54	3	0.1673	19	0.1004	1,506	53,000	10,237	0.8267	1,340	0.0618	0.0619	0.0621	0.0622	0.0680	0.0690	0.0710	0.0720	0.1508	0.302	0.362	0.1971	0.0086	0.0021				
1,431,000	54	3	0.1628	19	0.0977	1,465	50,000	9,699	0.8023	1,300	0.0650	0.0651	0.0652	0.0653	0.0710	0.0720	0.0740	0.0750	0.1523	0.304	0.365	0.1991	0.0096	0.0030				
1,351,000	54	3	0.1582	19	0.0949	1,424	47,600	9,160	0.7779	1,259	0.0681	0.0682	0.0683	0.0684	0.0740	0.0750	0.0770	0.0780	0.1538	0.306	0.367	0.201	0.0106	0.0033				
1,272,000	54	3	0.1537	19	0.0921	1,382	45,200	8,621	0.7534	1,218	0.0713	0.0714	0.0715	0.0716	0.0770	0.0780	0.0800	0.0810	0.1553	0.308	0.369	0.203	0.0116	0.0037				
1,192,500	54	3	0.1492	19	0.0892	1,339	42,800	8,082	0.7289	1,177	0.0745	0.0746	0.0747	0.0748	0.0800	0.0810	0.0830	0.0840	0.1568	0.310	0.371	0.205	0.0126	0.0040				
1,113,000	54	3	0.1447	19	0.0862	1,293	40,400	7,544	0.7043	1,136	0.0777	0.0778	0.0779	0.0780	0.0830	0.0840	0.0860	0.0870	0.1583	0.312	0.373	0.207	0.0136	0.0043				
1,033,500	54	3	0.1402	19	0.0832	1,246	38,000	7,005	0.6797	1,095	0.0809	0.0810	0.0811	0.0812	0.0860	0.0870	0.0890	0.0900	0.1598	0.314	0.375	0.209	0.0146	0.0046				
954,000	54	3	0.1357	19	0.0802	1,198	35,600	6,466	0.6551	1,054	0.0841	0.0842	0.0843	0.0844	0.0890	0.0900	0.0920	0.0930	0.1613	0.316	0.377	0.211	0.0156	0.0049				
900,000	54	3	0.1312	19	0.0772	1,150	33,200	5,927	0.6305	1,013	0.0873	0.0874	0.0875	0.0876	0.0920	0.0930	0.0950	0.0960	0.1628	0.318	0.379	0.213	0.0166	0.0052				
874,500	54	3	0.1273	19	0.0743	1,102	30,800	5,388	0.6059	972	0.0905	0.0906	0.0907	0.0908	0.0950	0.0960	0.0980	0.0990	0.1643	0.320	0.381	0.215	0.0176	0.0055				
795,000	54	3	0.1214	19	0.0713	1,054	28,400	4,849	0.5813	931	0.0937	0.0938	0.0939	0.0940	0.0980	0.0990	0.1010	0.1020	0.1658	0.322	0.383	0.217	0.0186	0.0058				
795,000	26	2	0.1749	7	0.1260	1,108	31,200	5,770	0.6375	900	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1230	0.1238	0.1246	0.1254	0.1673	0.324	0.385	0.219	0.0196	0.0061				
795,000	30	2	0.1623	7	0.1077	1,140	30,000	5,517	0.6139	910	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1230	0.1238	0.1246	0.1254	0.1688	0.326	0.387	0.221	0.0206	0.0064				
715,500	54	3	0.1161	7	0.1151	1,036	450,000	0,350	0.0949	830	0.131	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1452	0.1462	0.1472	0.1703	0.328	0.390	0.223	0.0216	0.0067				
715,500	28	2	0.1659	7	0.1190	1,051	450,000	29,100	5,193	0.355	840	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.1687	0.330	0.392	0.225	0.0226	0.0070				
715,500	30	2	0.1544	7	0.0926	1,081	450,000	24,800	5,865	0.337	840	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.1687	0.332	0.394	0.227	0.0236	0.0073				
696,000	54	3	0.1111	7	0.1111	1,000	419,000	24,500	4,537	0.307	800	0.140	0.140	0.140	0.1541	0.1541	0.1541	0.1541	0.1713	0.334	0.396	0.229	0.0246	0.0076				
639,000	54	3	0.1063	7	0.1085	0.977	400,000	23,600	4,319	0.3239	770	0.147	0.147	0.147	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1739	0.336	0.398	0.231	0.0256	0.0079				
636,000	26	2	0.1564	7	0.1216	0.960	400,000	25,000	4,616	0.3331	780	0.147	0.147	0.147	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1739	0.338	0.400	0.233	0.0266	0.0082				
636,000	30	2	0.1456	7	0.0874	1,019	400,000	21,500	5,213	0.351	780	0.147	0.147	0.147	0.1613	0.1613	0.1613	0.1613	0.1739	0.340	0.402	0.235	0.0276	0.0085				
605,000	54	3	0.1059	7	0.1059	0.953	380,500	22,500	4,109	0.3211	750	0.154	0.154	0.154	0.1695	0.1695	0.1695	0.1695	0.1773	0.342	0.404	0.237	0.0286	0.0088				
605,000	28	2	0.1525	7	0.1196	0.966	380,500	24,100	4,201	0.3217	760	0.154	0.154	0.154	0.1695	0.1695	0.1695	0.1695	0.1773	0.344	0.406	0.239	0.0296	0.0091				
599,000	26	2	0.1463	7	0.1138	0.927	350,000	22,400	4,039	0.3123	730	0.168	0.168	0.168	0.1849	0.1849	0.1849	0.1849	0.1751	0.350	0.420	0.242	0.0306	0.0094				

Figura IV.1. Características de los conductores de aluminio

ANEXO V

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

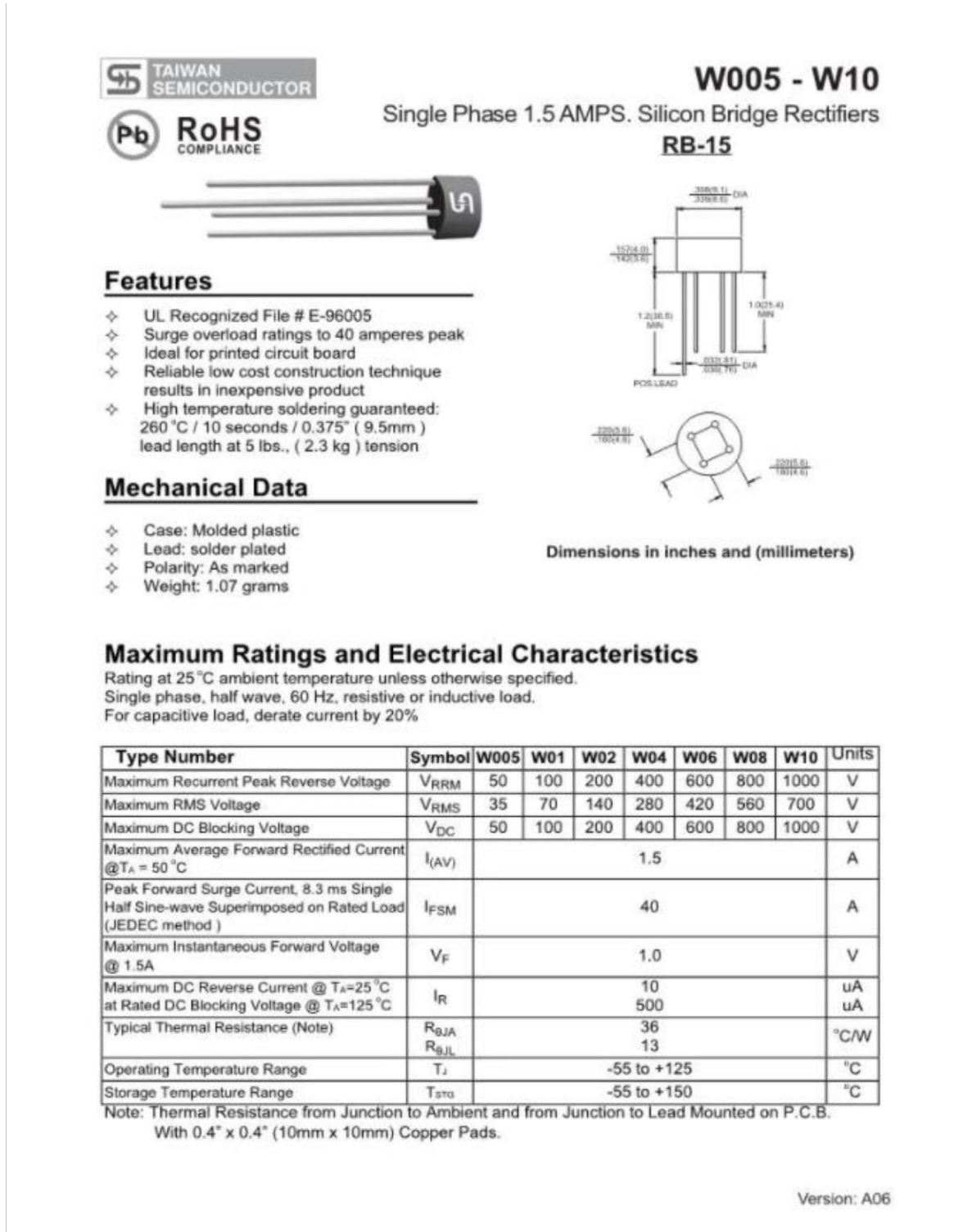


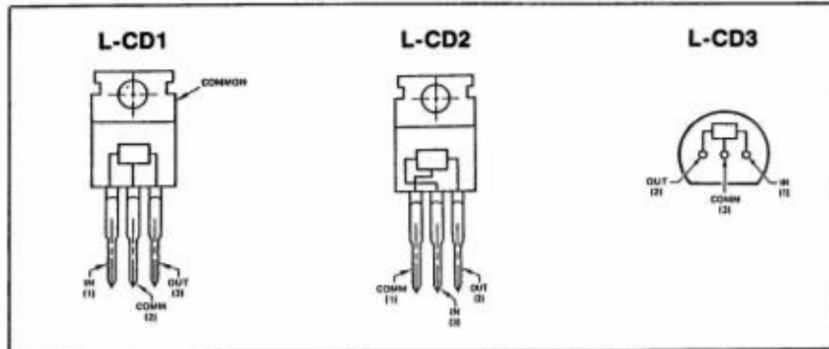
Figura V.1. Datasheet del rectificador



CODI Semiconductor, Inc.

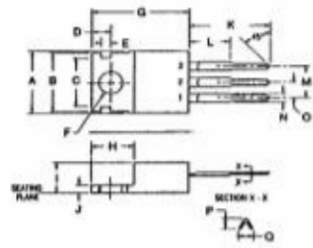
LINEAR

LOGIC SYMBOLS AND CONNECTION DIAGRAMS



PACKAGE OUTLINES

JEDEC TO-220 Outline Plastic Power Package

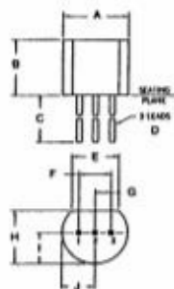


DIM.	INCHES			MILLIMETERS		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	.395		.410	10.03		10.41
B	.365		.385	9.27		9.77
C	.300		.320	7.62		8.13
D	.100		.120	2.54		3.05
E	.040		.040	1.02		1.52
F	.141		.145	3.58		3.68
G	.675		.800	14.6		15.24
H	.235		.265	5.97		6.73
I	.160		.190	4.06		4.83
J	.020		.055	.508		1.40
K			.500			12.70
L			.290			5.35
M	.190		.210	4.83		5.33
N	.045		.055	1.05		1.40
O	.095		.105	2.41		2.56
P	.015		.030	.381		.762
Q	.020		.045	.508		1.43

NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters
Center lead is electrical contact with the mounting tab

Package weight is 2.1 grams

JEDEC TO-92 Outline Plastic Package



DIM.	INCHES			MILLIMETERS		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	.175		.205	4.45		5.20
B	.170		.210	4.32		5.33
C	.600			12.70		
D	.015		.028	0.406		0.483
E	.135			.343		
F		.100			2.54	
G		.090			1.27	
H	.125		.165	3.18		4.19
I	.080		.105	2.03		2.67
J	.080		.105	2.03		2.67

NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters
Package material is transfer molded thermosetting plastic
Package weight is 0.25 grams

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

Figura V.1. Datasheet del LM78XX



CODI Semiconductor, Inc.

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS 3 - TERMINAL VOLTAGE REGULATORS

	1 AMP Pos. 7805-7824	1 AMP Neg. 7905-7924	.5A Pos. 7805-7824	.1A Pos. 78L05-78L24
Thermal resistance Kj-c Kj-a	5°C/w 70°C/w		7°C/w 160°C/w	
Power Dissipation	10W	10W	10W	500mW
Temperature range Operating Ambient Operating Junction Storage	-20 to +85°C -20 to +125°C -55 to +125°C		-20 to +75°C -20 to +125°C -60 to +125°C	
Line Regulation (mV) Vo/Ii (%)	2.0	1.0	2.0	2.0
Load Regulation (mV) Vo/Io (%)	2.0	1.0	2.0	2.0
Logic/Connection diagram	L-CD 1	L-CD 2	L-CD 1	L-CD 3
Package	TO-220		TO-92	

TYPE No.	Normal OUTPUT Voltage Range (V)	OUTPUT Voltage Range (V)	INPUT Voltage Range (V)	Quiescent Current (mA)	Ripple Rejection (dB) MIN	OUTPUT Noise Voltage (µV)	OUTPUT Voltage Drift (TYP) mV/°C
1 AMP POSITIVE							
7805	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	5.1	52	40	±0.4
7806	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	6.7	58	45	±0.4
7808	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	8.7	56	50	±0.4
7812	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	8.7	55	70	±0.4
7815	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	8.7	56	85	±1.0
7818	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	5.0	55	85	±1.2
7824	24.0	23.0-25.0	27.0-60.0	5.0	55	120	±1.4
1 AMP NEGATIVE							
7905	-5.0	-4.8-5.2	-7.0-35.0	1.0	54	100	±0.6
7906	-6.0	-5.75-6.25	-8.0-35.0	1.0	55	150	±0.5
7908	-8.0	-7.7-8.3	-10.5-35.0	1.0	54	200	±0.6
7912	-12.0	-11.5-12.5	-14.5-35.0	1.5	55	300	±0.8
7915	-15.0	-14.4-15.6	-17.5-35.0	1.5	56	375	±1.0
7918	-18.0	-17.3-18.7	-21.0-35.0	1.5	56	450	±1.0
7924	-24.0	-23.0-25.0	-27.0-60.0	1.5	51	600	±1.0
.5A (500ma) POSITIVE							
7805	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	5.1	62	40	±1.0
7806	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	6.6	58	45	±1.0
7808	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	6.6	54	52	±1.0
7812	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	6.8	55	75	±1.0
7815	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	6.8	56	90	±1.0
7818	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	6.8	55	100	±1.0
7824	24.0	23.0-25.0	27.0-60.0	5.0	50	120	±1.0
.1A (100ma) POSITIVE							
78L05	5.0	4.75-5.25	7.0-30.0	5.0*	50	60	±1.0
78L06	6.0	5.75-6.25	8.0-30.0	5.0*	59	50	±1.0
78L08	8.0	7.6-8.4	10.5-30.0	5.0*	59	60	±1.0
78L12	12.0	11.4-12.6	14.5-35.0	5.5*	57	80	±1.5
78L15	15.0	14.3-15.7	17.5-35.0	5.5*	56	90	±1.5
78L18	18.0	17.1-18.9	21.0-60.0	5.5*	57	120	±2.0
78L24	24.0	22.8-25.2	27.0-60.0	7.0*	52	200	±2.0

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

Figura V.1. Datasheet del LM78XX

ANEXO VI

ANEXO VI. Resultados obtenidos de las mediciones del Prototipo.

Todos los casos se encuentran conectados con el conductor 4/0 ASCR AWG en el alimentador primario.

Mediciones en el alimentador primario:

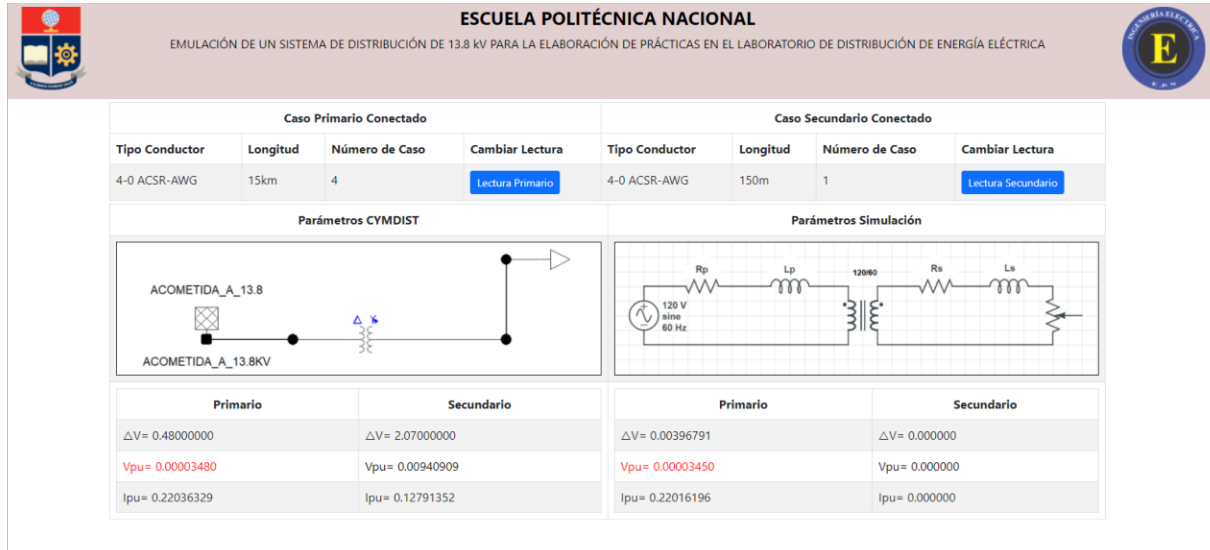


Figura VI.1. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el alimentador primario, con conductor 4/0 ASCR AWG de 150m en el circuito secundario

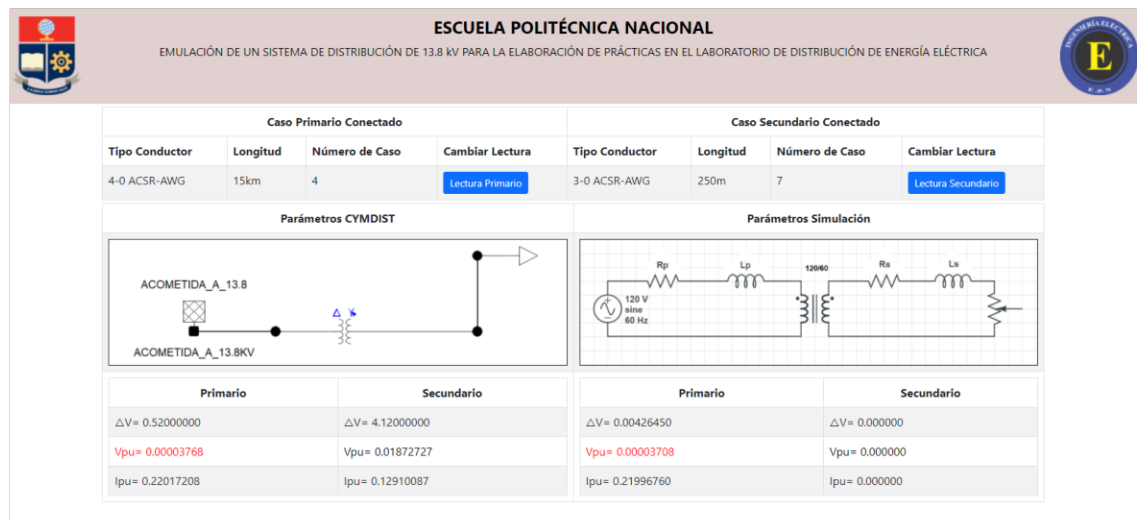


Figura VI.2. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el alimentador primario, con conductor 3/0 ASCR AWG de 250m en el circuito secundario

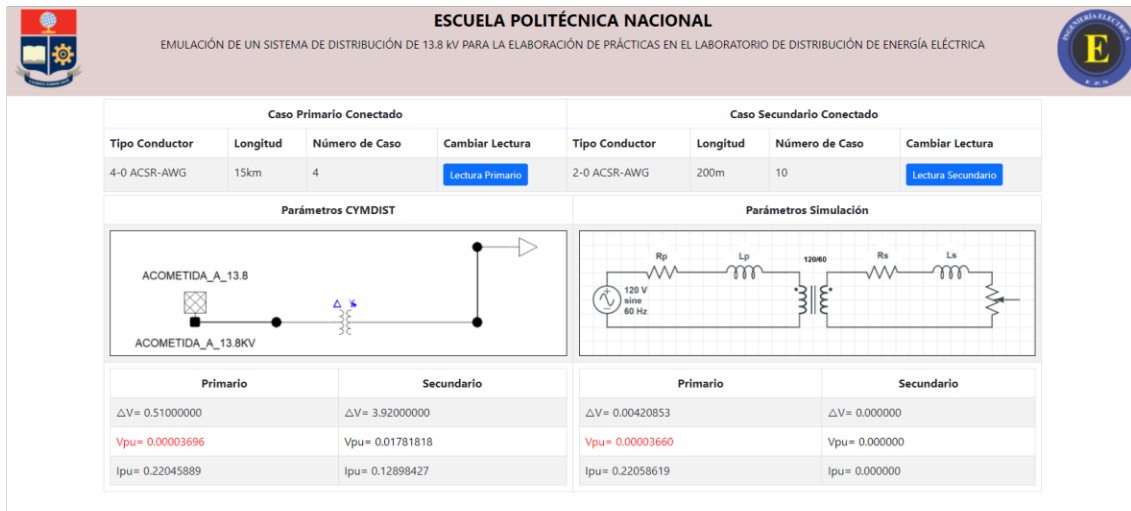


Figura VI.3. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el alimentador primario, con conductor 2/0 ACSR AWG de 200m en el circuito secundario

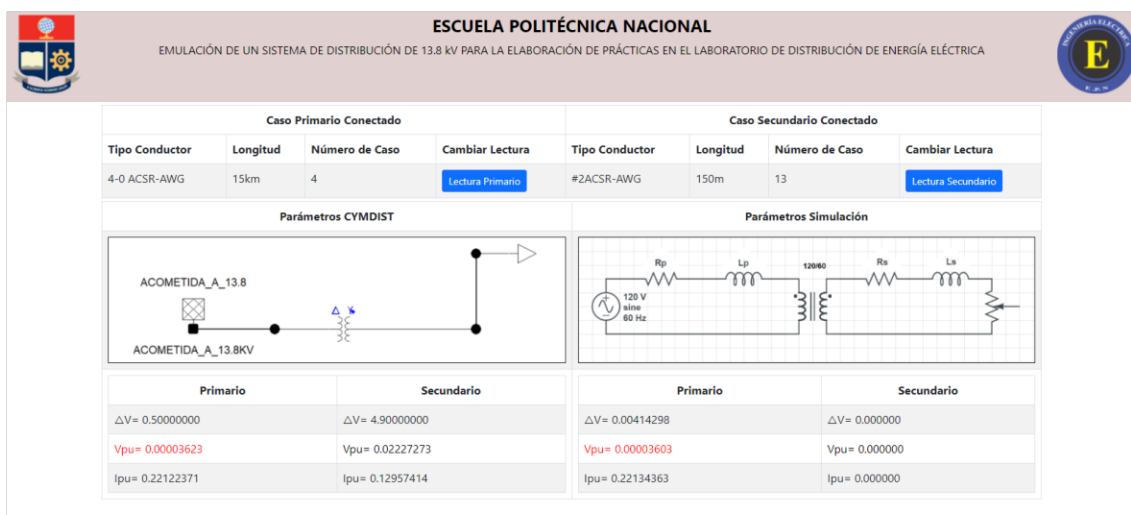


Figura VI.4. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el alimentador primario, con conductor #2ACSR AWG de 150m en el circuito secundario

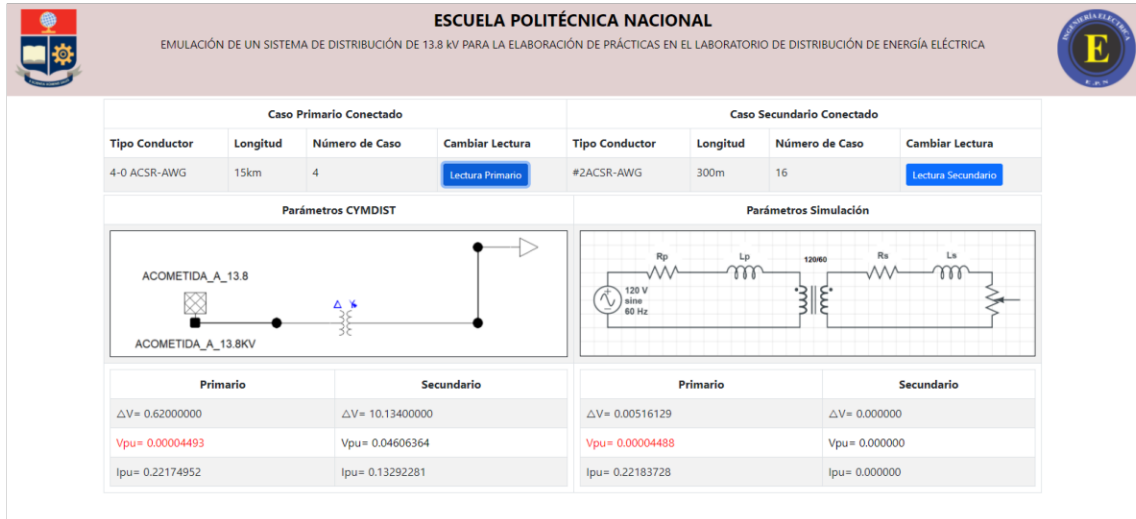


Figura VI.5. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el alimentador primario, con conductor número 2 ASCR AWG de 300m en el circuito secundario

Mediciones para el circuito secundario:

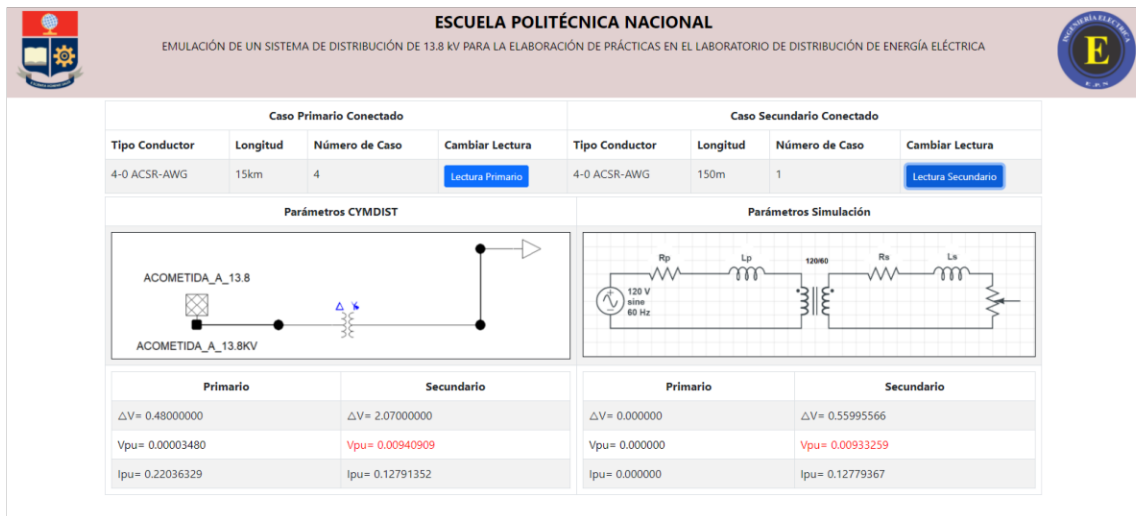


Figura VI.6. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 4/0 ASCR AWG de 150m en el circuito secundario

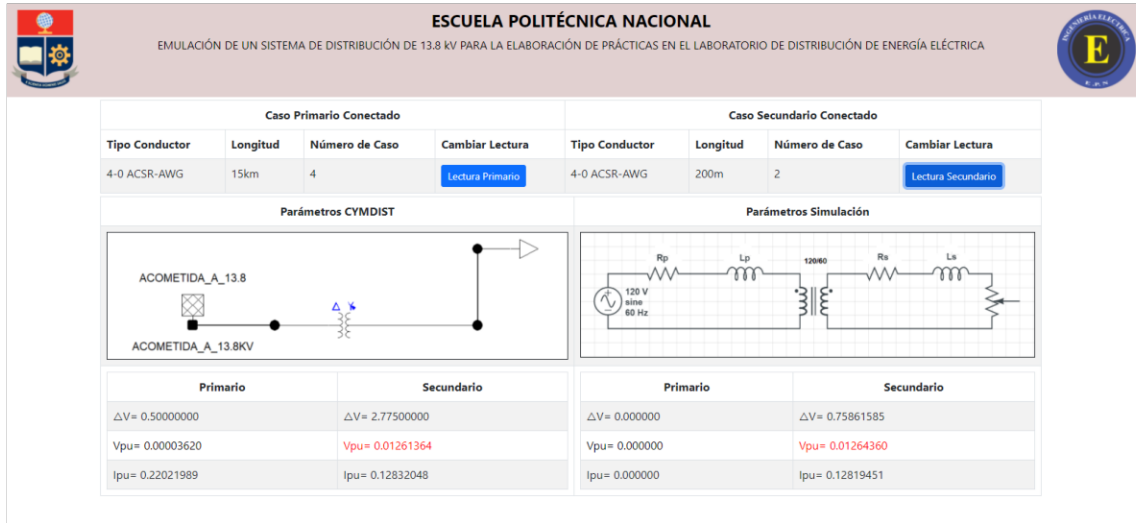


Figura VI.7. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 4/0 ACSR AWG de 200m en el circuito secundario



Figura VI.8. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 4/0 ACSR AWG de 250m en el circuito secundario

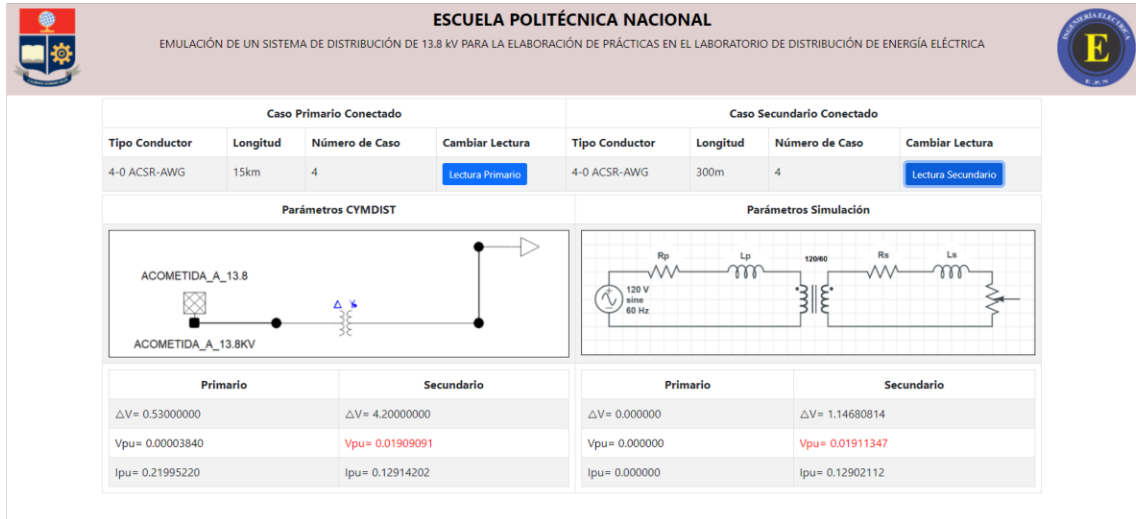


Figura VI.9. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 4/0 ASCR AWG de 300m en el circuito secundario

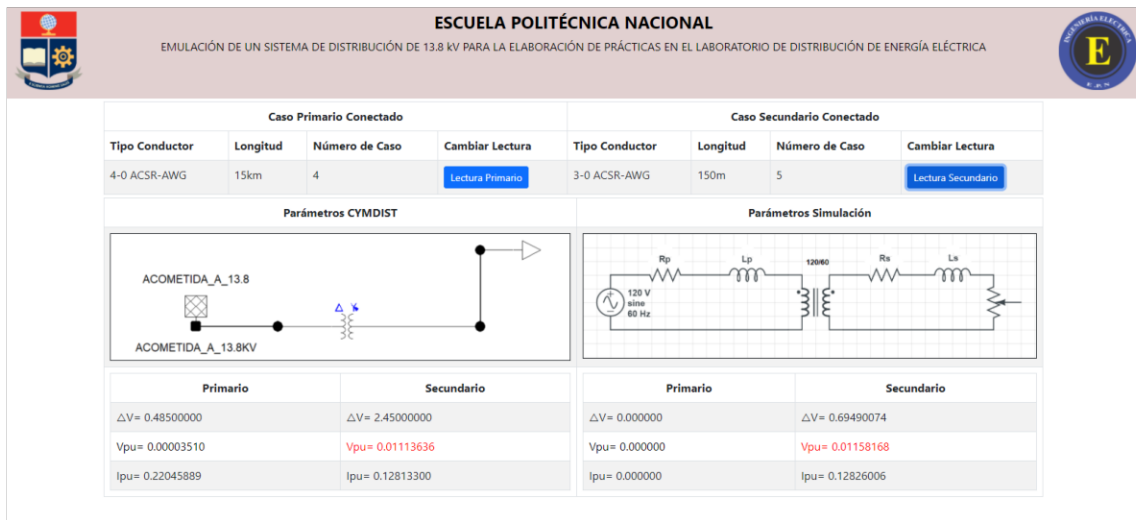


Figura VI.10. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 3/0 ASCR AWG de 150m en el circuito secundario

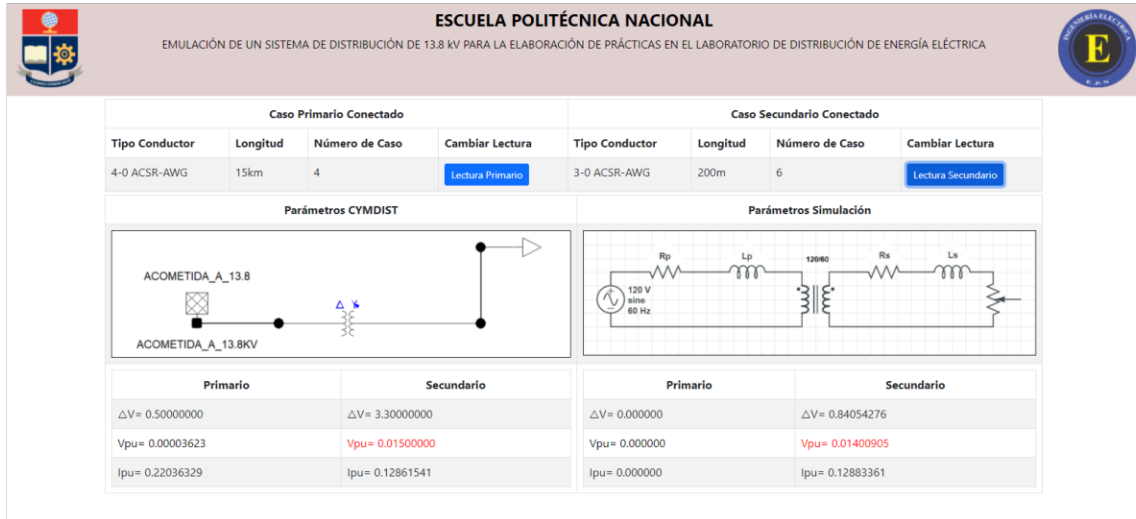


Figura VI.11. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 3/0 ACSR AWG de 200m en el circuito secundario

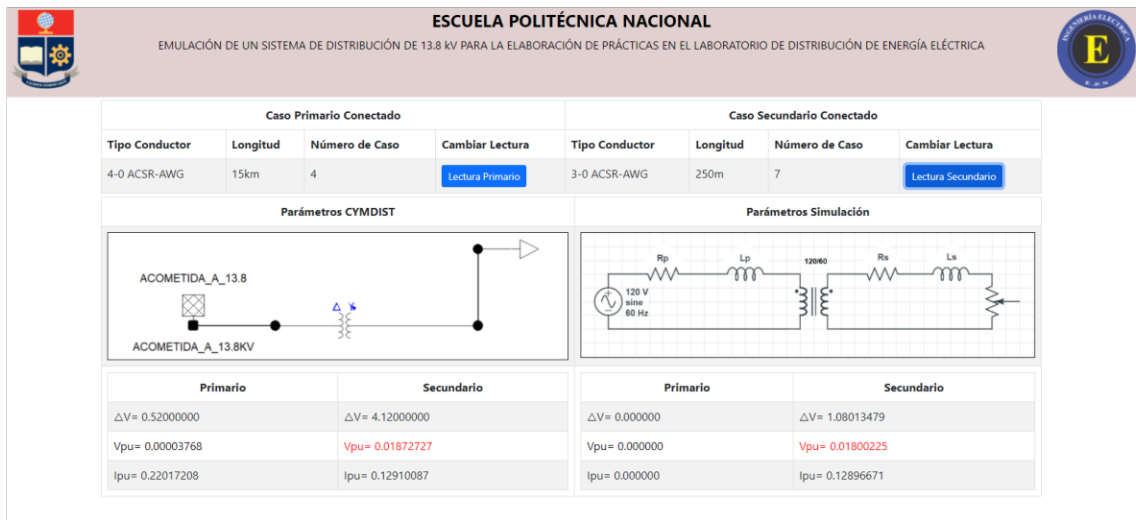


Figura VI.12. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 3/0 ACSR AWG de 250m en el circuito secundario

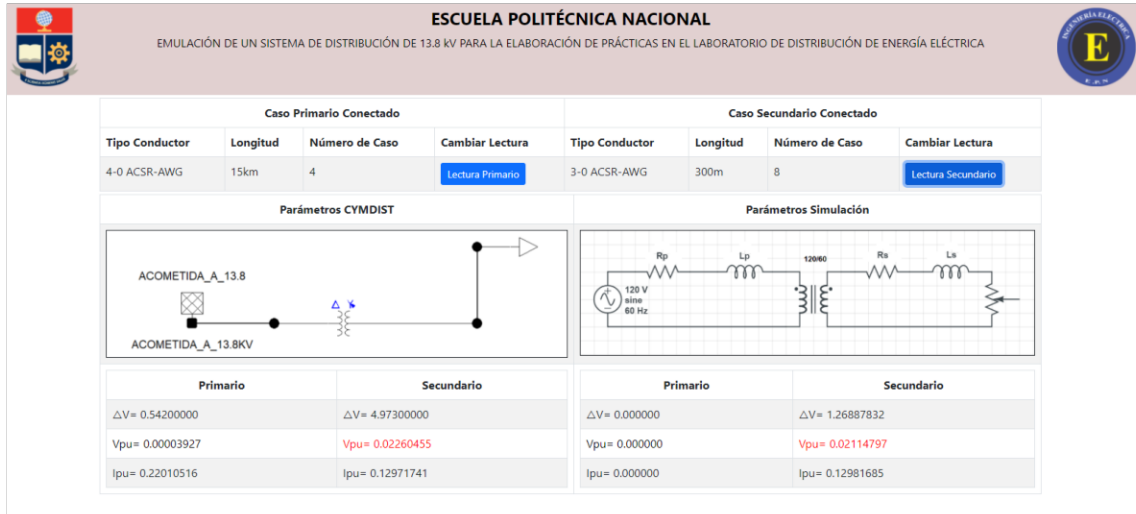


Figura VI.13. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 3/0 ACSR AWG de 300m en el circuito secundario

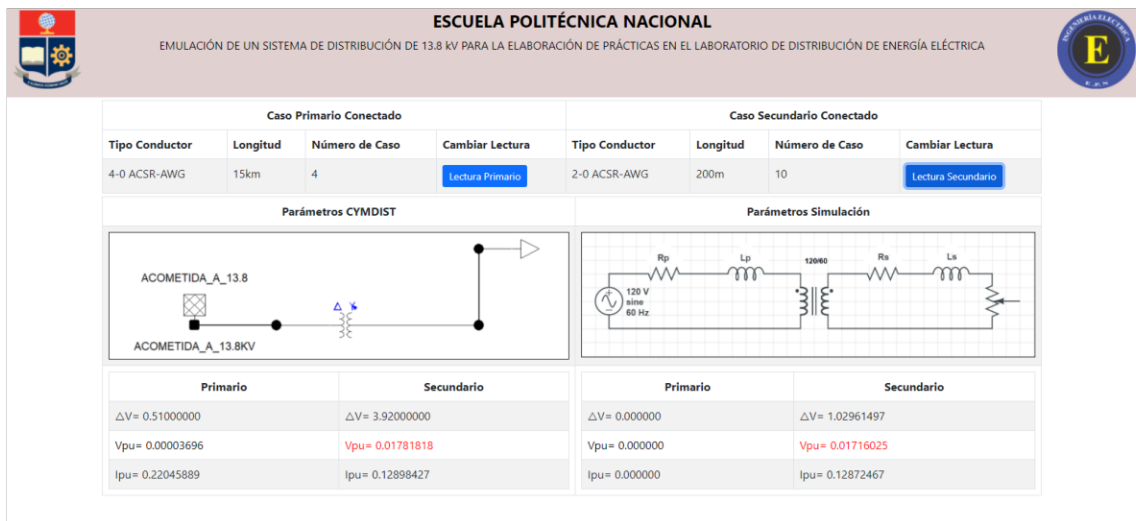


Figura VI.14. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2/0 ACSR AWG de 200m en el circuito secundario

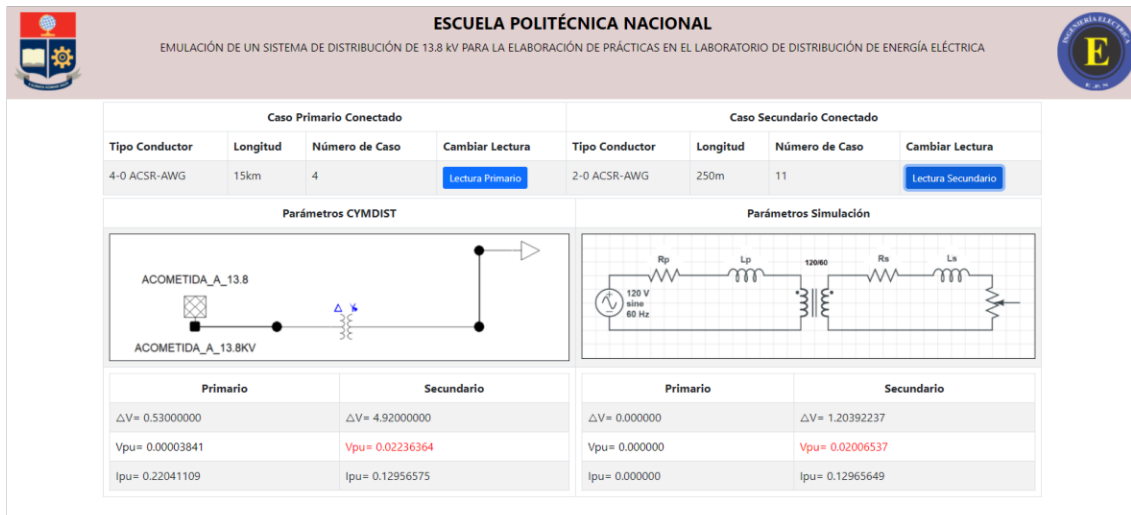


Figura VI.15. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2/0 ACSR AWG de 250m en el circuito secundario

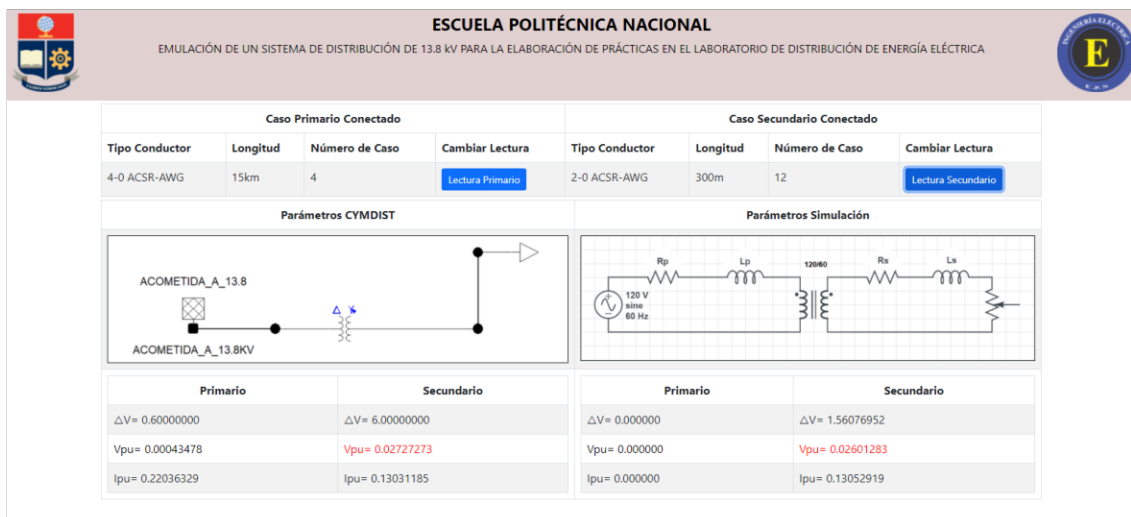


Figura VI.16. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2/0 ACSR AWG de 300m en el circuito secundario

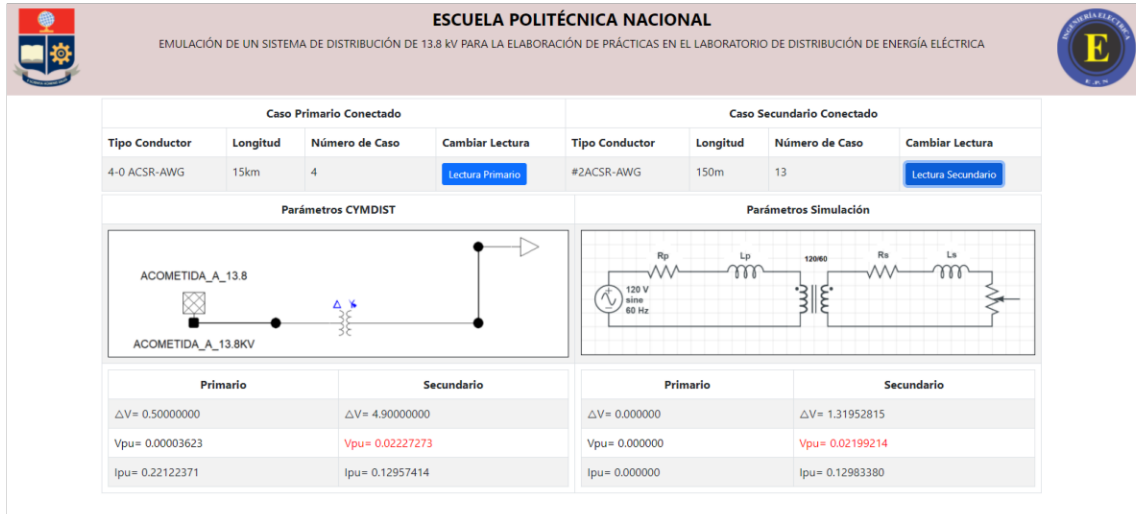


Figura VI.17. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2 ACSR AWG de 150m en el circuito secundario



Figura VI.18. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2 ACSR AWG de 200m en el circuito secundario

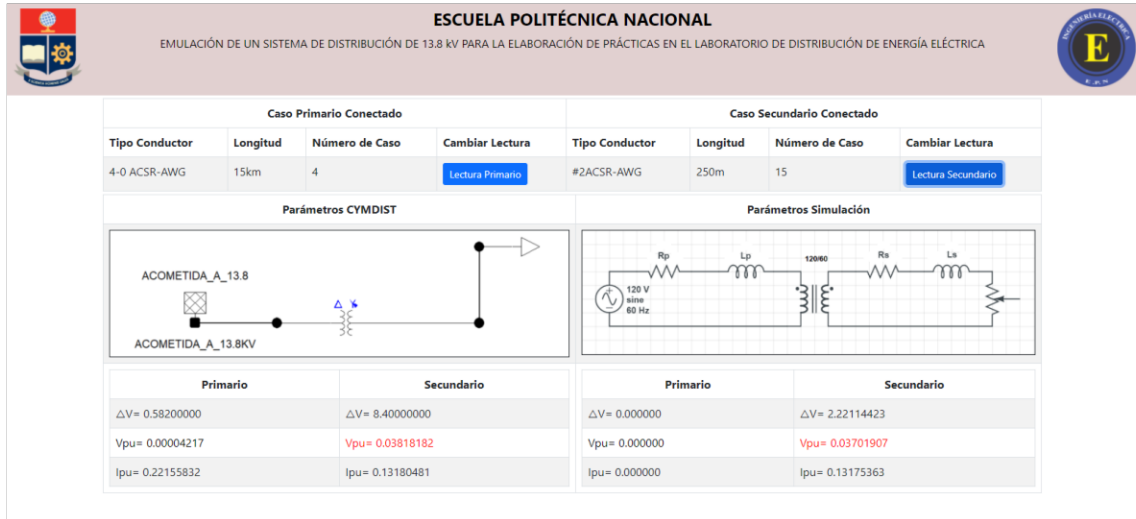


Figura VI.19. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2 ACSR AWG de 250m en el circuito secundario



Figura VI.20. Resultados obtenidos mediante la conexión del voltímetro inalámbrico en el circuito secundario, con conductor número 2 ACSR AWG de 300m en el circuito secundario