



SEDE GUAYAQUIL

## **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

### **PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previa la obtención del Título de:

### **INGENIERO ELÉCTRICO**

#### **TEMA**

“Análisis de Flujo de Corriente Alterna Aplicados a un Sistema Eléctrico de  
Potencia”

#### **AUTORES**

Richard David Pañora Reyna

Luis Fernando Pérez Moreno

#### **TUTOR**

Ing. David Humberto Cárdenas Villacrés M.Sc

GUAYAQUIL- ECUADOR

2019

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Richard David Pañora Reyna y Luis Fernando Pérez Moreno autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, febrero de 2019

---

Richard David Pañora Reyna

Cédula: 0922238951

---

Luis Fernando Pérez Moreno

Cédula: 0927195248

## **CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Yo, **RICHARD DAVID PAÑORA REYNA**, con documento de identificación N° **0922238951**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**Análisis de Flujo de Corriente Alterna Aplicados a un Sistema Eléctrico de Potencia**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, febrero de 2019

---

Richard David Pañora Reyna

Cédula: 0922238951

## **CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Yo, **LUIS FERNANDO PÉREZ MORENO** , con documento de identificación N° **0927195248**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**Análisis de Flujo de Corriente Alterna Aplicados a un Sistema Eléctrico de Potencia**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, febrero de 2019

---

Luis Fernando Pérez Moreno

Cédula: 0927195248

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS**, director del proyecto de Titulación denominado “Análisis de flujo de corriente alterna aplicados a un sistema eléctrico de potencia” realizado por los estudiantes Richard David Pañora Reyna y Luis Fernando Pérez Moreno, certificó que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, febrero de 2019

---

Ing. David Humberto Cárdenas Villacrés M.Sc

## **DEDICATORIA**

***RICHARD DAVID PAÑORA REYNA***

Este proyecto de titulación está dedicado a mis padres, ya que son el pilar de mi vida, quienes siempre me empujan a ser mejor persona. También está dedicada a la memoria de mi abuelo José Pañora, quien me enseñó a nunca rendirme.

***LUIS FERNANDO PEREZ MORENO***

Dar una vista al pasado y recordar todo lo que de niño soñé y ahora lo vivo como realidad, Dios estuvo siempre ahí proveyendo sabiduría y fuerza para perseverar, es por ello que le dedico a Él esta meta, así como también a mi madre y padre por ser mi motor de vida ayudándome a culminar esta loable carrera, que sus palabras alentadoras y su confianza puesta en mí, he podido llegar donde ahora estoy, dedicado también para mi hermana que he sentido su apoyo en gran medida y a todas esas personas que formaron parte de mí, convirtiéndome en la noble persona que soy.

## **AGRADECIMIENTOS**

### ***RICHARD DAVID PAÑORA REYNA***

A mis queridos padres por su dedicación, esfuerzo, paciencia, confianza y por todo lo que me han dado a lo largo de mi carrera y de mi vida. A mi hermano por siempre estar cuando lo necesito.

De manera especial al Ing. David Cárdenas e Ing. Miguel Morales, quienes, con su experiencia, conocimiento y motivación me guiaron en la elaboración de este trabajo de titulación.

Y por supuesto a mi querida Universidad, las autoridades y docentes en general que con su sabiduría me han formado como persona y profesional.

### ***LUIS FERNANDO PEREZ MORENO***

La vida es un reto y valiente aquel que triunfa a pesar de las circunstancias, Dios y mi familia son testigos de lo duro que ha sido el camino.

Por la confianza de mis seres queridos me he empoderado en creer en mí mismo.

Por la voluntad de Dios he logrado culminar una gran etapa de mi vida, agradezco primordialmente a mis padres quienes fueron mis mentores que forjaron mi camino ofreciéndome excelencia para mi preparación, mi hermana que fue de gran inspiración, mi amada abuela, tíos, tías, primos, primas y enamorada.

Así también a la Universidad Politécnica Salesiana que me formó como profesional, y me brindó conocimiento y anécdotas que recordar

No puedo decir más que gracias por creer en mí y el apoyo que todos en conjunto me han ofrecido para que esta meta se logre, ahora es una realidad.

## RESUMEN

Actualmente, la carrera de Ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario cuenta con recursos limitados para el aprendizaje del análisis del flujo de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia, por ello el objetivo principal del presente proyecto es realizar una propuesta y validación de un conjunto de prácticas de laboratorio para el análisis de flujo de corriente alterna en un Sistema Eléctrico de Potencia, junto con una metodología de investigación experimental, técnica, aplicativa y cuantitativa.

En el capítulo 2 se detalló el marco teórico del Sistema eléctrico, las ecuaciones del flujo de potencia y los diferentes métodos analíticos de Gauss-Seidel y Newton-Rapson.

En el capítulo 3, se construyó el módulo y se realizó la programación en Matlab, Simulink y Arduino con el integrado ACS712. Posteriormente, se presentó los resultados de la práctica en el capítulo 4 y se hizo la comparación de los valores teóricos vs práctico. Se concluyó que la construcción del módulo de pruebas de circuitos eléctricos ha sido un aprendizaje basado en problemas la cual se enfocó en el análisis. Así como también se evidenció el correcto funcionamiento del modelo.

**Palabras clave:** corriente alterna, ACS712, flujo de potencia, sistema eléctrico de potencia.

## **ABSTRACT**

Nowadays, the career of Electrical Engineering of the Universidad Politécnica Salesiana at Guayaquil (campus Centenario) has limited resources for learning the analysis of the alternating current in Electrical Power Flow System. Therefore, the main objective of this project is to make a proposal and validation of a set of laboratory practices for the analysis of alternating current flow in an Electric Power System, together with an experimental, technical, application and quantitative research methodology. The theoretical framework of the electrical system is detailed, the equations of the power flow. Chapter 2 detailed the theoretical framework of the electrical system, the equations of the power flow and the different analytical methods of Gauss-Seidel and Newton-Rapson.

In chapter 3, the module was built and programming was carried out in Matlab, Simulink and Arduino with the integrated ACS712. Then, the results of the practice were presented and the comparison of the theoretical vs practical values was made. It was concluded that the construction of the electrical circuit testing module has been a problem-based learning which focused on the analysis. As well as the correct functioning of the model was evidenced.

**Keywords:** alternating current, ACS712, power flow, power electrical system.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificados de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación .....	ii
Certificado de sesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la UPS .....	iii
Certificado de sesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la UPS .....	iv
Certificado de dirección del trabajo de titulación suscrito por el tutor .....	v
Dedicatoria .....	vi
Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	viii
Abstract .....	ix
Índice de figuras .....	xii
Índice de tablas .....	xiv
Índice de ecuaciones .....	xv
Índice de fórmula .....	xvii
Índice de anexos .....	xviii
Abreviaturas .....	xix
Simbología .....	xx
Introducción .....	1
CAPÍTULO I .....	3
EL PROBLEMA .....	3
1.1. Descripción del Problema. ....	3
1.2. Alcance y beneficiarios .....	3
1.3. Justificación .....	4
1.4. Delimitación .....	4
1.5. Objetivos .....	5
1.5.1 Objetivo General. ....	5
1.5.2. Objetivos Específicos .....	5
1.6. Marco metodológico .....	5
1.6.1. Método inductivo. ....	5
CAPÍTULO II .....	6
MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Teoría de los principios .....	6
2.1.1. Sistema Eléctrico de potencia. ....	6
2.1.2. Topología en sistemas eléctricos de potencia. ....	7
2.2 Subestaciones .....	8
2.2.1 Partes de una subestación .....	8
2.3 Representación de un SEP y métodos de la cantidad por unidad .....	9

2.3.1. Representación de un SEP. ....	9
2.3.2. Cantidades por unidad.....	10
2.3.3. Ventajas de los sistemas en p.u. ....	11
2.4 Análisis de flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos .....	12
2.5 Ecuaciones de flujo de potencia.....	17
2.6 Métodos analíticos Gauss-Seidel y Newton-Rapson .....	20
2.6.1. Gauss-Seidel. ....	20
2.6.2. Newton-Raphson.....	22
2.7 Modelo matemático para el Estudio de Flujos.....	23
2.8 Programas de flujo de potencia.....	24
2.8.1. Matlab. ....	25
2.8.2 Simulink.....	25
2.8.3 Arduino. ....	26
2.9 Porcentaje de error .....	26
CAPÍTULO III.....	27
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	27
3.1 Programación de Software .....	27
3.1.1 Matlab.....	27
3.1.2 Simulink.....	37
3.1.3 Arduino. ....	39
3.2 Construcción de módulo .....	43
3.2.1 Elementos internos del módulo.....	45
3.2.2 Circuito alimentador del módulo. ....	47
3.3 Circuito captura de datos .....	48
3.4 Conexiones entre Arduino y módulo ACS712 .....	49
CAPÍTULO IV.....	53
4.1 Análisis y presentación de resultados .....	53
4.2 Práctica.....	54
Conclusiones .....	64
Recomendaciones .....	64
Referencias Bibliográficas .....	65
Anexos .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Universidad Politécnica Salesiana en Google Maps. ....	4
Figura 2. Métodos de investigación .....	5
Figura 3. Esquema de un sistema eléctrico de potencia.....	6
Figura 4. Valores instantáneos de voltaje y corriente en un circuito con resistencia pura .....	7
Figura 5. Topologías en sistemas eléctricos de potencia .....	7
Figura 6. Partes que conforman una subestación.....	9
Figura 7. A) Diagrama unifilar de un SEP. B) Circuitos equivalentes de un SEP .....	10
Figura 8. A) Representación de una línea de transmisión. B) Representación vectorial.....	13
Figura 9. Sistema eléctrico de potencia .....	16
Figura 10. Representación de admitancias para cálculos de redes .....	18
Figura 11. Módulos de un programa de flujo de potencia .....	24
Figura 12. Módulos de un programa de flujo de potencia .....	25
Figura 13. Esquema de programación en Simulink.....	26
Figura 14. Software y materiales empleados .....	27
Figura 15. Esquema de modelos de línea corta y barra de carga.....	37
Figura 16. Esquema de primera práctica en Simulink .....	38
Figura 17. Esquema de modelo de doble barra y líneas cortas.....	38
Figura 18. Interfaz del software Arduino.....	39
Figura 19. Vista frontal del módulo de pruebas de circuitos eléctricos.....	44
Figura 20. Vinil del módulo de pruebas de circuitos eléctricos.....	44
Figura 21. Vinil de soporte del módulo de pruebas de circuitos eléctricos .....	45
Figura 22. Vista lateral del módulo de pruebas de circuitos eléctricos .....	45
Figura 23. Configuración interna resistiva.....	46
Figura 24. Configuración interna de inducción .....	46
Figura 25. Configuración interna capacitiva.....	47
Figura 26. Diagrama de conexiones de alimentación y distribución de energía del módulo ..	48
Figura 27. Variac .....	48
Figura 28. Diagrama interno del integrado ACS712 .....	49
Figura 29. Esquema del sensor ACS712.....	50
Figura 30. Diagrama de conexiones.....	50
Figura 31. Conexiones entre Arduino y el integrado ACS712 .....	51
Figura 32. Sistema de transmisión de 500 kV. Ecuador .....	53
Figura 33. Diagrama de conexión.....	55

Figura 34. Diagrama de conexión doble de alimentacion.....	55
Figura 35. Diagrama de conexiones.....	56
Figura 36. Toma de datos en 1 SG.....	61
Figura 37. Toma de datos en 2 SG.....	61
Figura 38. Toma de datos en 4 SG.....	62
Figura 39. Toma de datos en 10 SG.....	62
Figura 40. Toma de datos en 15 SG.....	63
Figura 41. Toma de datos en 20 SG.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de subestaciones.....	8
Tabla 2. Ejemplo de base de voltaje p.u, % .....	10
Tabla 3. Variables de un sistema eléctrico.....	12
Tabla 4. Código implementado en Matlab.....	27
Tabla 5. Código implementado en Arduino.....	39
Tabla 6. Valores de rango y sensibilidad del ACS712 .....	52
Tabla 7. Valores teóricos Vs. Valores medidos .....	60
Tabla 8. Valores teóricos Vs. Valores medidos de carga y fuente .....	60

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1: Potencia complejas.....	13
Ecuación 2: Potencia $S_s$ conjugado complejo .....	13
Ecuación 3: Representación vectorial de la corriente I.....	13
Ecuación 4: Representación de I conjugado .....	13
Ecuación 5: Potencia $S_s$ conjugado complejo con sus términos .....	14
Ecuación 6: Potencia compleja $S_s$ en su forma fasorial.....	14
Ecuación 7: Potencia real.....	14
Ecuación 8: Potencia reactiva .....	14
Ecuación 9: Potencia $S_r$ conjugado complejo en el receptor .....	14
Ecuación 10: Potencia real en el receptor .....	14
Ecuación 11: Potencia reactiva en el receptor .....	15
Ecuación 12: Potencia real máxima en el receptor .....	15
Ecuación 13: Potencia reactiva promedio.....	15
Ecuación 14: Potencia real en la línea .....	15
Ecuación 15: Multiplicación entre I y $I^*$ .....	16
Ecuación 16: Potencia en la línea .....	16
Ecuación 17: Potencia aparente en el segundo conductor .....	17
Ecuación 18: Corriente en el sistema.....	17
Ecuación 19: Voltaje de alimentación .....	17
Ecuación 20: Voltaje $V_2$ .....	17
Ecuación 21: Voltaje $V_2$ algorítmica .....	17
Ecuación 22: Ley de corrientes Kirchoff que representan la figura 9.B.....	18
Ecuación 23: Reducción de términos de la ecuación 18.....	18
Ecuación 24: Ley de corrientes de Kirchoff .....	18
Ecuación 25: Equivalencia de $Y_{conductor}$ .....	19
Ecuación 26: Corriente de entrada en un nodo. ....	19
Ecuación 27: Corriente del nodo k-ésimo.....	19
Ecuación 28: Voltaje del nodo k-ésimo .....	19
Ecuación 29: Voltaje del nodo k-ésimo expresado mediante potencia S.....	20
Ecuación 30: Corriente del nodo k-ésimo expresado mediante potencia S. ....	20
Ecuación 31: Ecuaciones de flujo de potencia.....	20
Ecuación 32: Algoritmo Gauss-Seidel.....	22
Ecuación 33: Potencia compleja inyectada.....	23

Ecuación 34: Potencia compleja inyectada representación en su conjugada.....	23
Ecuación 35: Potencia neta en el nodo M.....	23
Ecuación 36: Voltaje Vs. Corriente del sensor .....	51
Ecuación 37: Corriente entregada por el sensor .....	52

## ÍNDICE DE FÓRMULA

Fórmula 1. Porcentaje de error .....	26
--------------------------------------	----

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Práctica 1. ....	69
Anexo 2. Práctica 2. ....	73

## ABREVIATURAS

SEP	Sistema Eléctrico de Potencia	
kV	kilovoltios	
kA	kiloamperios	
MVA	Mega voltamperios	
KVA	Kilo voltamperios	
Vt	Voltaje de transmisión	
Vr	Voltaje de recepción	
p.u.	por unidades	
V	Voltaje	Voltios
V <sub>máx</sub>	Voltaje máximo	Voltios
I <sub>máx</sub>	Corriente máximo	Amperios
I	Corriente	Amperios
t	Tiempo	Segundos
KW	Kilowatts	
MW	Megawatts	
P	Potencia	

## SIMBOLOGÍA

$P_s$	Potencia de emisor
$I^*$	Conjugado complejo de la corriente I
$V_S^*$	Voltaje emisor
$V_R^*$	Voltaje receptor
$\delta$	Angulo del fasor
$Q_S$	Potencia reactiva en el emisor
$P_R$	Potencia real en el receptor
$Q_R$	Potencia reactiva en el receptor
$P_{R(máx)}$	Potencia real máxima en el receptor
$Q_{prom}$	Potencia reactiva promedio
$P_{línea}$	Potencia real en la línea
$S_2$	Potencia aparente en el segundo conductor
$V_2^{(k)}$	Voltaje algorítmico
$I_k$	Corriente de entrada en un nodo
$V_k$	Voltaje del nodo k-enésimo
$S_m$	Potencia compleja inyectada
$I_m$	Potencia compleja inyectada representación en su conjugada
$\Omega$	Ohmio

## Introducción

El flujo de potencia es el estudio que se utiliza para evaluar las operaciones de los sistemas de potencia, el cual proporciona información sobre las potencias que son: potencia activa y la potencia reactiva. En la primera en un circuito de corriente alterna, se refieren a la suma de energías que se transforman en trabajo y se disipan en las líneas, su medida está dada en watts. La potencia reactiva es la energía desaprovechada en una instalación eléctrica, es necesaria para generar el campo magnético que se requiere para los equipos inductivos como motores y transformadores y el campo eléctrico asociado a las capacitancias del sistema. De manera conjunta, se obtiene como respuesta los fásores de voltaje en cada barra y las corrientes en cada conductor del sistema [1] [2] [3].

Lo dicho anteriormente es de gran importancia debido a que debe resolverse la dirección de los flujos en cada línea, es decir, si la potencia es absorbida o generada las cantidades de tensión y corriente. Otro factor primordial es la determinación de la magnitud y ángulo de la fase del voltaje de cada barra y las potencias tanto activas como reactivas, las cuales son las que fluyen en cada línea. La mayoría de estos aspectos se irán haciendo evidentes en el transcurso del análisis de flujo de potencia. [4] Por ello, estos estudios de potencia son de vital envergadura para la planificación y diseño de implementación de próximos sistemas de potencia, así como también la determinación para optimizar las operaciones de los sistemas ya existentes; la principal información obtenida de los estudios de flujo son: la magnitud y el ángulo de la fase de cada voltaje de barra, junto a los tipos de potencias real y reactiva que fluyen en cada línea, de igual manera se puede analizar por medio de la salida ya impresa de los programas que suelen emplear las compañías eléctricas de generación [5] [6] [7].

Se debe conocer que entre los enfoques más precisos del modelo de corriente alterna de flujo de potencia se modela un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales que representan la inyección activa y reactiva de cada nodo, pero estas pueden presentar un problema lineal al asumir las magnitudes de tensión en las barras son planas, entonces los flujos de potencia reactiva son insignificantes. También cumplen un papel significativo en el funcionamiento de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), debido a que es un problema para determinar su rendimiento óptimo y así logra satisfacer las limitaciones operativas del mismo [8].

El objetivo planteado para el problema del flujo de potencia óptimo en corriente alterna y en corriente continua es lograr minimizar conjuntamente el costo de generación y las pérdidas en las líneas y los convertidores. Por otro lado, el problema de optimización está sujeto a las restricciones de flujo de potencia, los límites de los voltajes y los flujos de línea, y los límites de operación de los convertidores [9].

Es así que, este proyecto es llevado a cabo para llenar las expectativas de estudio práctico siendo que los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana puedan de manera crítica y analítica comprender el diseño de un análisis de flujo en un SEP, así se les permita la oportunidad de practicar o crear circuitos en donde lleven parte de generación, transmisión y distribución de las teorías analizadas en clases y mediante un análisis poder concluir si el sistema eléctrico de potencia (SEP) está operativo.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1. Descripción del Problema.

El aprendizaje del análisis de flujo de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia exige de un componente de experimentación que actualmente está limitado en la carrera de Ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario. En este momento no existe un conjunto de prácticas de laboratorio, ni los medios de mediación didácticos y seguros para comparar los datos experimentales y los teóricos y profundizar así en los aspectos de la realidad práctica de la profesión en un tema tan necesario y determinante como lo es el análisis de flujo de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia.

### 1.2. Alcance y beneficiarios

En este proyecto se entregan herramientas didácticas, entre las cuales se simulan centrales eléctricas (Variac), sistemas de transmisión (Resistencias o cargas inductivas) y distribución, empleando este diseño para una buena interacción directa, de tal modo logrando la clara instrucción de los estudiantes de la carrera de ing. Eléctrica, con el propósito de obtener dichas prácticas en la UPS y que sean totalmente didácticas fomentadas para los estudiantes, obteniendo así la preparación profesional en forma teórica y práctica.

El principal beneficiario del proyecto de titulación propuesto es el proceso de enseñanza-aprendizaje que se efectúa en la universidad Politécnica Salesiana con el objetivo de formar a ingenieros eléctricos. En primer lugar, por la incorporación de recursos didácticos que son muy necesarios además son limitados actualmente y cuya adquisición es muy costosa.

Los docentes contarán con el diseño de un conjunto de prácticas de laboratorio pre elaborado y validado que formarán parte de los recursos didácticos de la materia.

Los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica, sede Guayaquil tendrán la oportunidad de poner a prueba experimental los conocimientos adquiridos en clases y profundizar en los aspectos prácticos del análisis de flujo de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia.

### 1.3. Justificación

En el laboratorio de Circuitos Eléctricos dentro de la UPS, sede Guayaquil existe un módulo que permite el análisis de circuitos eléctricos y un software profesional para la simulación de dichos circuitos eléctricos. Sin embargo, es limitado el número de prácticas que se realizan actualmente con este módulo orientado al aprendizaje del análisis de flujo de corriente alterna en sistemas eléctricos de potencia. Además, las actividades de aprendizaje que hoy se realizan están limitadas al componente teórico fundamentalmente, siendo la experimentación muy limitada en la actualidad y no existe la posibilidad de un análisis comparativo entre ambos resultados que permita a los estudiantes profundizar en los aspectos más notables de la realidad práctica.

La solución propuesta en esta alternativa económica a los elevados precios de los módulos profesionales que existen en el mercado.

### 1.4. Delimitación

El módulo se efectuará en el laboratorio de Circuitos Eléctricos I y II en el tercer piso, bloque B De la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus centenario se encuentra ubicado en la calle Gral. Francisco Robles 107. Guayaquil 090101

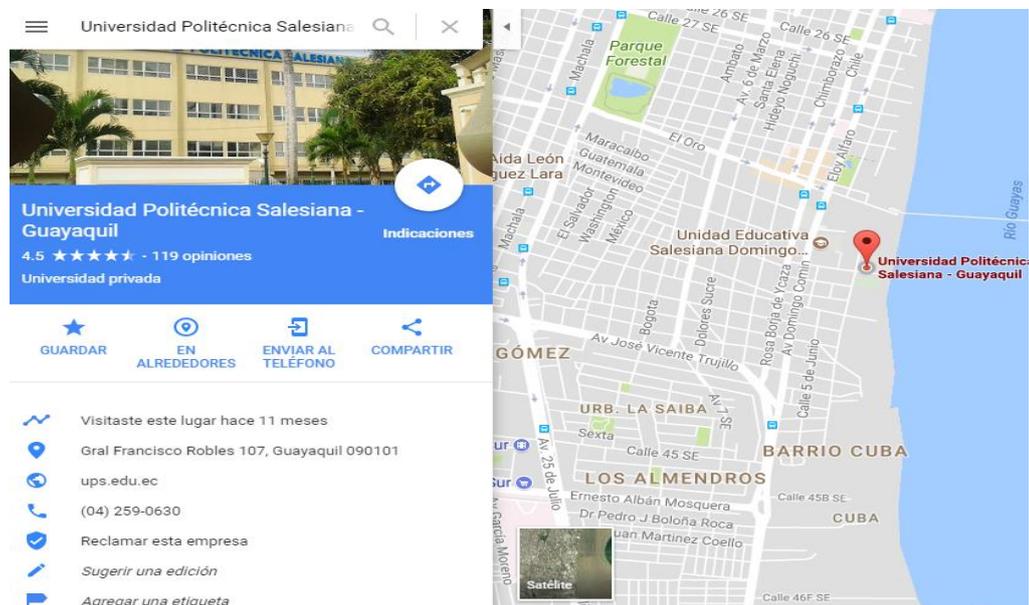


FIGURA 1. MAPA DE UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA EN GOOGLE MAPS.

ELABORADO POR: AUTORES

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General.

Realizar propuesta y validación de un conjunto de prácticas de laboratorio para el análisis de flujo de corriente alterna en un Sistema Eléctrico de Potencia o SEP.

### 1.5.2. Objetivos Específicos.

- Proponer un conjunto de prácticas de laboratorio que permitan el análisis de flujo en circuitos de corriente alterna balanceados.
- Analizar teóricamente el flujo en corriente alterna utilizando un método matemático y software de simulación del conjunto de prácticas propuestas.
- Implementar un módulo para la adquisición y comparación de datos de sistemas eléctricos de potencias.

## 1.6. Marco metodológico

### 1.6.1. Método inductivo.

La metodología son técnicas o procedimientos para abordar un problema en forma ordenada y eficiente. [10]

Los métodos de investigación a emplear serán:

**Experimental.** Es un método en el cual constan de la observación, planteamiento del problema, una búsqueda de información y estructura del marco teórico. Adicionalmente, se realiza un análisis, síntesis y finalmente un informe de la investigación realizada. [11]

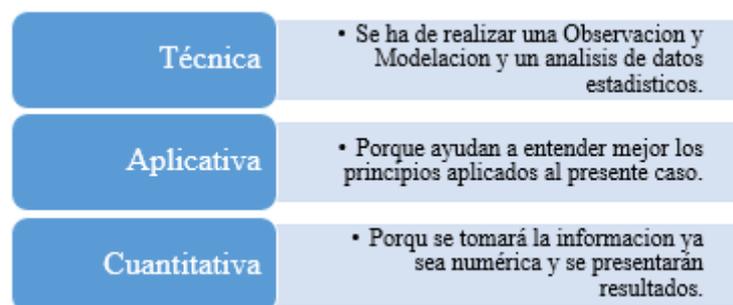


FIGURA 2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Teoría de los principios

#### 2.1.1. Sistema Eléctrico de potencia.

En trabajos como [12], [13] se define al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) como el conjunto de componentes que tiene como finalidad generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica, hasta los consumidores bajo ciertos requerimientos y condiciones.

Esta “red eléctrica”, está compuesta por plantas generadoras que se encargan de producir energía eléctrica que será consumida por las cargas, una red de transmisión que permite a la energía cruzar largas distancias y de distribución que permite la repartición de plantas que generan esa energía a los puntos de consumo. Los sistemas eléctricos de potencia también acoplan equipos que permiten una continuidad del servicio, regulación de voltaje y frecuencia de acuerdo a los requerimientos del usuario. En la figura 3 se aprecia un ejemplo de los componentes de un SEP.

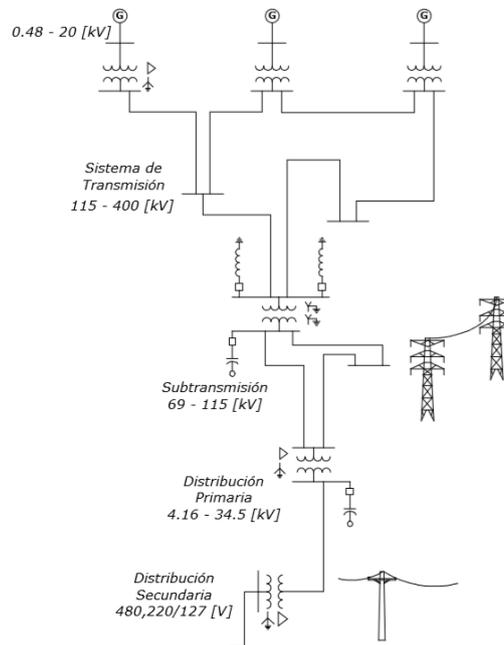


FIGURA 3. ESQUEMA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

ELABORADO POR: [14]

El consumo ocasionado por las cargas que pueden provenir de las industrias, comercio y residencias. Las cargas absorben la potencia real y potencia reactiva. Las cargas pueden ser reactivas, capacitivas e inductivas. Como se presenta en la figura 3, las cargas resistivas absorben la potencia reactiva. Las cargas inductivas e inductivas se encuentran en una gran mayoría en los dispositivos electrónicos comunes y de potencia.

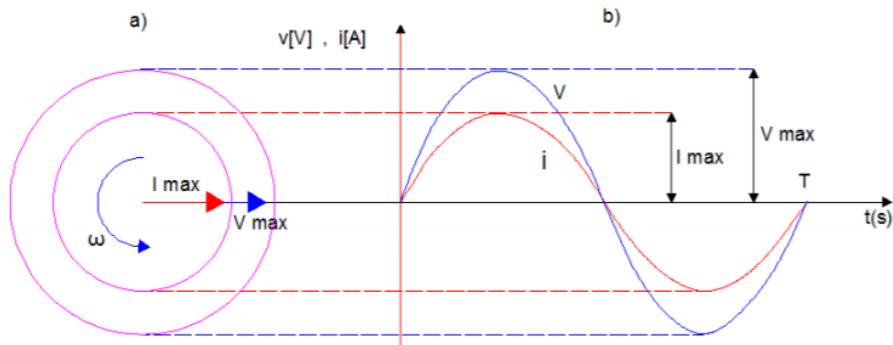


FIGURA 4. VALORES INSTANTÁNEOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA PURA

ELABORADO POR: [15]

Por lo tanto, el sistema eléctrico de potencia puede catalogarse como lineales y no lineales

### 2.1.2. Topología en sistemas eléctricos de potencia.

En la figura 5 se muestran algunos de las topologías más empleadas de acuerdo a su confiabilidad en la distribución de electricidad.

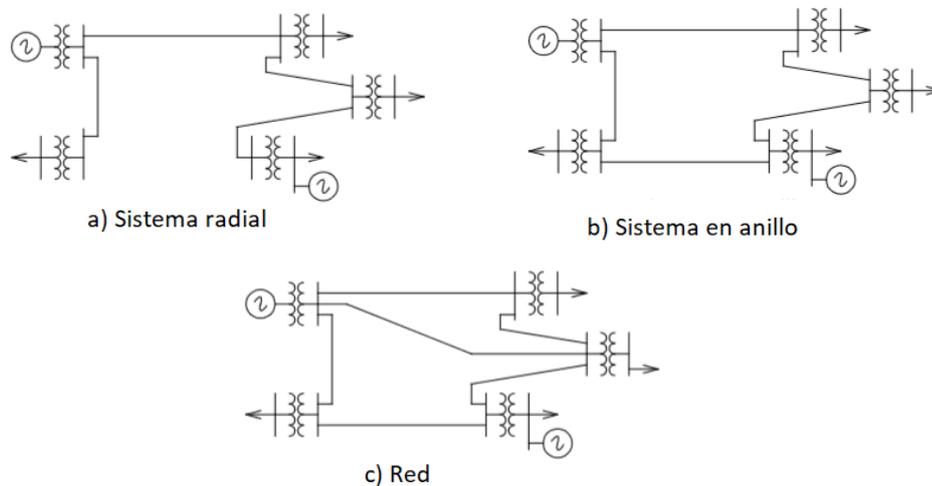


FIGURA 5. TOPOLOGÍAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA  
ELABORADO POR: AUTORES

a) Sistema radial. Tiene como característica ser más económico, pero menos confiable, las cargas están alimentados desde un solo punto, por ello, si la alimentación falla, se produce una interrupción en el suministro.

b) Sistema en anillo. Es más costosa y muestra mayor confianza. Las cargas constan de una doble alimentación, si una de las 2 se afectada, la alimentación de la carga no se ve interrumpida

c) Red. Mayor costo y confiabilidad. El sistema consta de más interconexiones que hacen que las cargas siempre cuenten con alimentación.

## 2.2 Subestaciones

Las subestaciones son las encargadas de transformar las tensiones y distribuir la misma en el sector de consumo. En estudios de casos como se ven en [16], [17] las subestaciones se clasifican por la función a desarrollar y por la potencia y voltaje de operación, tales como:

TABLA 1. TIPOS DE SUBESTACIONES

Subestaciones	Voltaje de maniobra
Transmisión	230kV a 400kV
Subtransmisión	69kV a 161kV
Distribución primaria	4.16kV a 34.5kV
Distribución secundaria	4.16kV a 34.5kV

ELABORADO POR: [14]

### 2.2.1 Partes de una subestación.

En la figura 6 se detallan las partes que componen una subestación. Muchos equipos son electrónicos que permiten mantener un control adecuado de la distribución del voltaje, así como la corrección del factor de potencia. En la actualidad, los Smart grid permiten tener un control de forma remota de las subestaciones, es decir, que el personal de mantenimiento puede tener desde cualquier lugar en que se encuentren ver información en línea de la subestación como fallas y temperaturas de la misma.

El estudio actual no contempla profundizar sobre las subestaciones, por ello, se enfatizará sus partes mediante la figura 6.

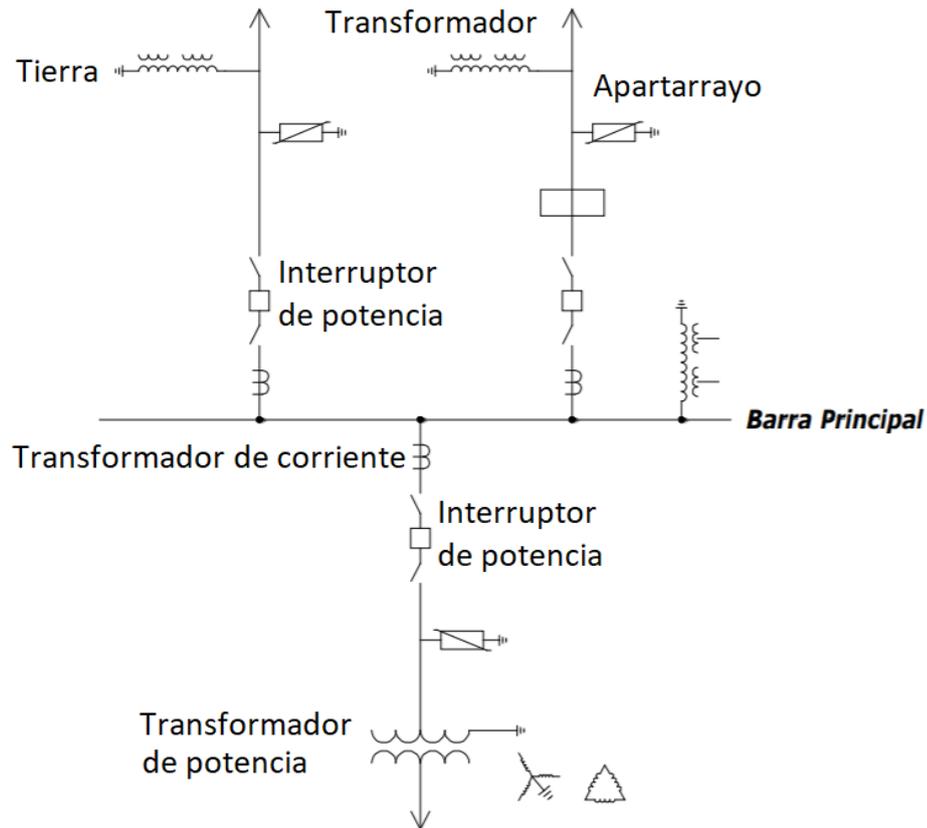


FIGURA 6. PARTES QUE CONFORMAN UNA SUBESTACIÓN  
ELABORADO POR: AUTORES

## 2.3 Representación de un SEP y métodos de la cantidad por unidad

### 2.3.1. Representación de un SEP.

Como se especificó en el ítem anterior, un SEP puede ser representado mediante simbologías para tener una idea clara de la distribución de los elementos que lo compone. Siendo así, en este trabajo se emplearán símbolos de la norma internacional CEI 617 y diagramas unifilares para representar los circuitos equivalentes. El circuito equivalente de acuerdo a [18] [19] pueden ser aplicados en 2 condiciones:

1. Funcionamiento del sistema en régimen permanente – Circuito monofásico equivalente
2. Funcionamiento del sistema asimétrico:

En la figura 7 se muestran los diagramas unifilares y su representación equivalente.

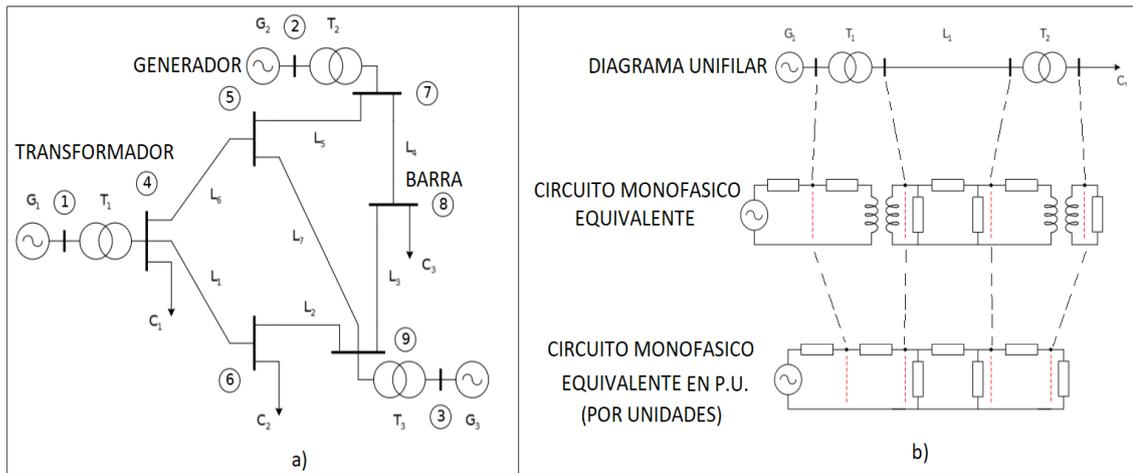


FIGURA 7. A) DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SEP. B) CIRCUITOS EQUIVALENTES DE UN SEP

ELABORADO POR: [18]

### 2.3.2. Cantidades por unidad.

En su trabajo [20] define que las líneas de transferencia de potencia trabajan a niveles de tensión en el orden de los kilovoltios (kV), esta unidad es la mejor para expresar los niveles de tensión, estos son transmitidos a una elevada potencia, y se expresan en la unidad de kilowatts o mega watts y los kilo voltamperios o mega voltamperios. Sin embargo, estos valores, al igual que los amperes y los ohms, se manifiestan con frecuencia en por ciento o en por unidad de un valor base. A continuación, se presenta una tabla 2 con ejemplos de p.u. y %.

TABLA 2. EJEMPLO DE BASE DE VOLTAJE, P.U., %

Base de Voltaje (kV)	Por unidad (p.u.)	Porcentaje (%)
108	0.90	90
120	1.00	100
126	1.05	105

ELABORADO POR: AUTORES

El valor en producto por unidad de alguna cantidad está definido como la relación de la cantidad a su base y está expresada en decimal. Mientras que la relación en porcentajes corresponde a 100 veces su valor en p.u. Los dos métodos de cálculo, porcentaje y en p.u., son sencillos e informativos a diferencia de los amperes, volts, y ohms reales.

La ventaja que tiene el método en p.u. sobre el porcentual radica en el producto de dos cantidades expresadas en p.u; mientras que el método del porcentaje se obtiene dividiendo entre 100 el producto de las dos cantidades. Obteniendo las cantidades de corriente y voltaje, se determinan su impedancia y de kilovoltamperios.

### **2.3.3. Ventajas de los sistemas en p.u.**

En el proceso de solución de problemas de SEP los valores adquiridos son de gran magnitud, como por ejemplo tenemos los siguientes: Kilovoltios (KV), Kiloamperios (KA), Mega voltamperios (MVA) [21].

Estos valores requieren más espacio de memoria en los sistemas de cómputo para ser almacenadas, su manipulación en los procesos consume mayor tiempo de máquina y se aumenta la posibilidad de producir y propagar errores numéricos [22].

En un análisis de sistema al utilizar valores de referencia o base se debe especificar los valores que son de interés, ya que el estado operativo es más específico cuando se realiza con cantidades reales, dado que estas cantidades en p.u. tienen similar interpretación de datos que cuando se utilizan valores en porcentaje.

Al tener valores por debajo de un valor nominal se infiere que son cantidades menores al 100% o a p.u. y en caso contrario cuando están por encima se infiere que son cantidades superiores al 100% o a p.u. Es importante considerar que la tensión no debe superar al 105% y tampoco debe ser menores al 95% del valor nominal, sin embargo, al establecer una relación se obtiene al dividir el valor en porcentaje por 100%.

Al realizar la conversión de los valores con sus unidades que eran reales a p.u. se anula el efecto de cambio de voltaje que producen los transformadores, es decir, que la tensión en un transformador podría ser en primario 115KV y en secundario 13.2KV. De igual forma se puede tener que en el primario y secundario tengan 1.0 p.u respectivamente y a esto se conoce como sistemas con voltajes planos.

Cuando trabajamos con valores en p.u. el valor de impedancia del transformador vista desde el lado primario es igual al valor de la impedancia vista desde el lado secundario. Cabe recalcar que esto no sucede cuando manejamos valores reales.

Los efectos de conexión Delta y Estrella de cargas y transformadores son eliminados así que no es indispensable dividir o multiplicar los tres valores de tensión

o corriente. Esto se debe a que las impedancias en p.u. no están sujetas al tipo de conexión que se utilizan en los circuitos trifásicos [21].

A continuación, se muestra la tabla 3 con las variables de un sistema eléctrico.

TABLA 3. VARIABLES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO

Cantidad	Símbolo	Magnitud
Corriente	$\bar{I}$	Amperes
Voltaje	$\bar{V}$	Voltios
Potencia	$\bar{S} = P + jQ$	Volt-amperes
Impedancia	$Z = R + jQ$	Ohmios
Factor de potencia	$F * P \cos\phi$	Adimensional
Tiempo	T	Segundos

ELABORADO POR: AUTORES

Las condiciones desbalanceadas de una falla provocan tensiones e intensidades desbalanceadas en el sistema trifásico.

Las impedancias constantes están relaciones con las intensidades y tensiones, se dice que es un sistema lineal y se atribuye el principio de superposición.

#### 2.4 Análisis de flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos

Como fue presentado en la introducción, los estudios de potencia son fundamentales para evaluar la operación de sistemas de potencia, para su futura expansión. Estos estudios proporcionan la potencia real y reactiva y un fásor de voltaje en cada línea conductor del sistema. Los principios que rigen un Sistema eléctrico son claros, los modelos obtenidos en diversos estudios solo pueden ser resueltos mediante la generación de programas por computadora, siendo así los métodos analíticos más utilizados Gauss-Seidel y Newton-Raphson. Para saber más sobre los métodos analíticos se explicarán en el ítem 2.6.

Como lo presentan [1], en su trabajo, el flujo de potencia puede ser obtenido mediante el estudio de flujo de potencia en líneas de transmisión corta, donde la resistencia es despreciable por la distancia, sin embargo, la línea posee una reactancia en serie  $jX$  ohms por fase. En los extremos de la línea se encuentra el voltaje de transmisión  $V_T$  y el voltaje de recepción  $V_R$ , donde,  $V_T$  adelanta a  $V_R$  por un ángulo  $\delta$ .

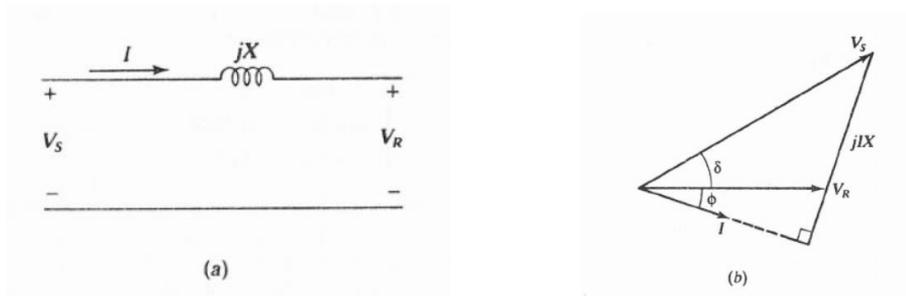


FIGURA 8. A) REPRESENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN. B) REPRESENTACIÓN VECTORIAL

ELABORADO POR: [1]

La fórmula general de la potencia compleja  $S$ , en su unidad voltio amperios [15], se define como:

ECUACIÓN 1: POTENCIA COMPLEJA  $S$

$$S = P + jQ = VI^*$$

Siendo  $I^*$  es el conjugado complejo de la corriente  $I$ . Entonces, en una base por fase, en el extremo transmisor es representado por:

ECUACIÓN 2: POTENCIA  $S_S$  CONJUGADO COMPLEJO

$$S_S = P_S + jQ_S = V_S I^* \text{ VA}$$

Como es presentado en la figura 7 (b) en su representación vectorial,  $I$  está dada por:

ECUACIÓN 3: REPRESENTACIÓN VECTORIAL DE LA CORRIENTE  $I$ .

$$I = \frac{1}{jX} (V_S - V_R)$$

Entonces,

ECUACIÓN 4: REPRESENTACIÓN DE  $I$  CONJUGADO

$$I^* = \frac{1}{-jX} (V_S^* - V_R^*)$$

Al sustituir la Ecuación 4 en la Ecuación 2 se consigue:

ECUACIÓN 5: POTENCIA  $S_S$  CONJUGADO COMPLEJO CON SUS TÉRMINOS

$$S_S = \frac{V_S^*}{-jX} (V_S^* - V_R^*)$$

Del diagrama fasorial de la figura 8 (b), se observa

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ \quad \text{Es decir, } V_R = V_R^*$$

$$V_S = |V_S| \angle \delta$$

La ecuación 5 se convierte en:

$$S_S = \frac{|V_S|^2 - |V_R||V_S|e^{j\delta}}{-jX}$$

ECUACIÓN 6: POTENCIA COMPLEJA  $S_S$  EN SU FORMA FASORIAL

$$S_S = \frac{|V_S||V_R|}{X} \sin \delta + j \frac{1}{X} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos \delta)$$

Finalmente, de la  $S_S = P_S + j Q_S$  se puede despejar  $P_S$  y  $Q_S$  respectivamente

ECUACIÓN 7: POTENCIA REAL

$$P_S = \frac{1}{X} (|V_S||V_R| \sin \delta) \text{ W}$$

Y

ECUACIÓN 8: POTENCIA REACTIVA

$$Q_S = \frac{1}{X} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos \delta) \text{ VAR}$$

De igual forma, en el extremo receptor se tiene:

ECUACIÓN 9: POTENCIA  $S_R$  CONJUGADO COMPLEJO EN EL RECEPTOR

$$S_R = P_R + jQ_R$$

$$S_R = V_R I^*$$

Se aplica el procedimiento anterior y se obtiene:

ECUACIÓN 10: POTENCIA REAL EN EL RECEPTOR

$$P_R = \frac{1}{X} (|V_S||V_R| \sin \delta) \text{ W}$$

Y

ECUACIÓN 11: POTENCIA REACTIVA EN EL RECEPTOR

$$Q_R = \frac{1}{X} (|V_S||V_R| \cos \delta - |V_R|^2) \text{ VAR}$$

De estas fórmulas se infieren varias conclusiones. Con respecto a la transferencia de la potencia real depende únicamente del ángulo  $\delta$ , al que se conoce como ángulo de potencia. Por lo tanto, las magnitudes relativas del voltaje del extremo transmisor y receptor no afectan a la potencia real. Adicionalmente, la potencia transmitida varía con una aproximación del cuadrado del nivel de voltaje.

La potencia máxima transferida se da cuando el ángulo  $\delta$  es igual a 90 grados y de ahí se obtiene:

ECUACIÓN 12: POTENCIA REAL MÁXIMA EN EL RECEPTOR

$$P_{R(máx)} = P_{S(máx)} = \frac{|V_S||V_R|}{X}$$

De la ecuación 8 y 11, se observa que la potencia reactiva fluirá en la dirección más bajo del voltaje. Un vez que el sistema opere con  $\delta \approx 0$ , entonces el flujo promedio de potencia reactiva en la línea estará definida por:

$$Q_{prom} = \frac{1}{2} (Q_S + Q_R)$$

ECUACIÓN 13: POTENCIA REACTIVA PROMEDIO

$$Q_{prom} = \frac{1}{2X} (|V_S|^2 - |V_R|^2) \text{ VAR}$$

La ecuación 13 presenta una gran dependencia del flujo de potencia reactivo en la diferencia de tensión.

Hasta el momento, no se ha tomado en cuenta la pérdida  $I^2 \cdot R$  en la línea. Si se supone que  $R$  es la resistencia en la línea por fase, entonces la pérdida en la línea es:

ECUACIÓN 14: POTENCIA REAL EN LA LÍNEA

$$P_{linea} = |I|^2 R \text{ W}$$

De la ecuación 2, se tiene que

$$I^* = \frac{P + jQ}{V}$$

Y

$$I = \frac{P - jQ}{V^*}$$

Entonces,

ECUACIÓN 15: MULTIPLICACIÓN ENTRE I Y I\*

$$II^* = |I|^2 = \frac{P^2 + Q^2}{|V|^2}$$

En la ecuación 14, se reemplaza

ECUACIÓN 16: POTENCIA EN LA LÍNEA

$$P_{línea} = \frac{(P^2 + Q^2)R}{|V|^2} \text{ W}$$

Podemos concluir entonces, que la potencia real y la reactiva, contribuyen a las pérdidas en la línea. Debido a esto, se ve la importancia de reducir el flujo de potencia reactiva y así disminuir las pérdidas en la línea. Del proceso anterior se ha obtenido para el flujo de potencia ideal una expresión analítica, sin embargo, en un sistema de potencia real las soluciones analíticas encontradas no son exactas debido a las fluctuaciones de carga en los conductores y al voltaje del extremo receptor no se puede conocer.

Por ello, se deben utilizar métodos numéricos para calcular las cantidades desconocidas, por lo general se emplean los procedimientos iterativos [23]

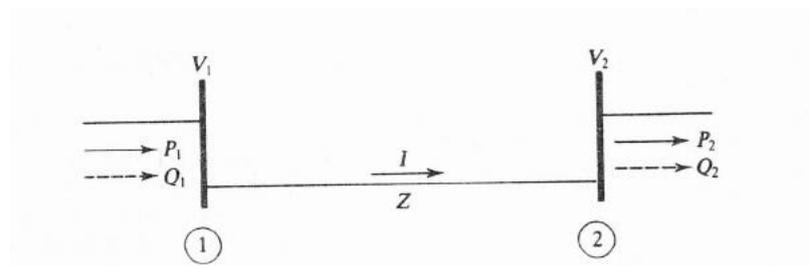


FIGURA 9. SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA  
ELABORADO POR: AUTORES

En la figura 9, se observa un sistema de transmisión de dos conductores, con las potencias real y reactiva (flechas con líneas continuas y entrecortadas). Las ecuaciones que dominan el sistema son:

ECUACIÓN 17: POTENCIA APARENTE EN EL SEGUNDO CONDUCTOR

$$S_2 = V_2 I^*$$

Donde despejando  $I$  se obtiene:

ECUACIÓN 18: CORRIENTE EN EL SISTEMA

$$I = \frac{S_2^*}{V_2^*}$$

El Voltaje de alimentación  $V_1$  se define como:

ECUACIÓN 19: VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN

$$V_1 = V_2 + Z_e I$$

Reemplazando la ecuación 18 en 19 obtenemos la ecuación que representará al voltaje  $V_2$ :

ECUACIÓN 20: VOLTAJE  $V_2$

$$V_2 = V_1 - Z_e \frac{S_2^*}{V_2^*}$$

En la ecuación 20 empleando es posible resolverla mediante iteraciones, para ello, se evalúa  $V_2$  con valores que pertenecen a los reales siendo denominado  $k$ . Luego de la primera iteración se puede sustituir por uno nuevo. Este proceso se repetirá hasta obtener una precisión deseada y puede ser representado por:

ECUACIÓN 21: VOLTAJE  $V_2$  ALGORÍTMICA

$$V_2^{(k)} = V_1 - Z_e \frac{S_2^*}{(V_2^{(k-1)})^*}$$

## 2.5 Ecuaciones de flujo de potencia.

La matriz de admitancia de un grupo de conductores como se aprecia en la figura 9.a, puede ser expresada como la figura de 9.b [24]. Donde las corrientes se representan mediante los nodos  $V_1$  al  $V_4$  y empleando ley de corrientes Kirchoff se obtiene una matriz de la forma de la ecuación 18.

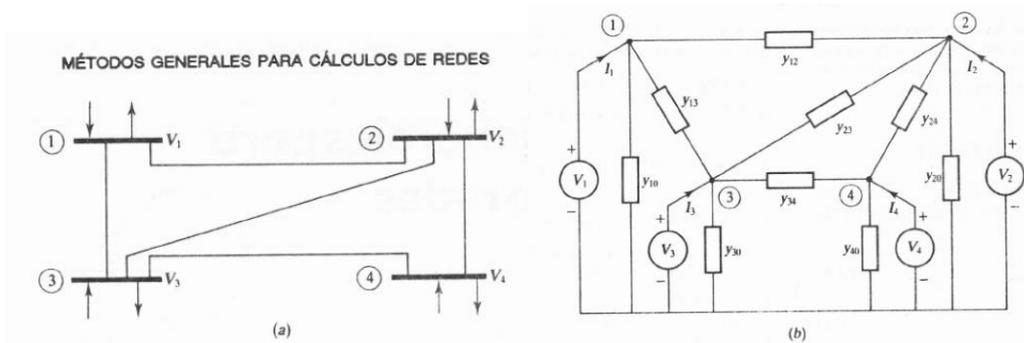


FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE ADMITANCIAS PARA CÁLCULOS DE REDES  
ELABORADO POR: AUTORES

ECUACIÓN 22: LEY DE CORRIENTES KIRCHOFF QUE REPRESENTAN LA FIGURA 9.B.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{Y_{11}} & \boxed{Y_{12}} & \boxed{Y_{13}} & \boxed{Y_{14}} \\ \overbrace{y_{10} + y_{11} + y_{12}} & \overbrace{-y_{12}} & \overbrace{-y_{13}} & \overbrace{0} \\ \boxed{Y_{21}} & Y_{22} & \boxed{Y_{23}} & \boxed{Y_{24}} \\ \overbrace{-y_{12}} & \overbrace{y_{20} + y_{12} + y_{23} + y_{24}} & \overbrace{-y_{23}} & \overbrace{-y_{24}} \\ \boxed{Y_{31}} & \boxed{Y_{32}} & \boxed{Y_{33}} & \boxed{Y_{34}} \\ \overbrace{-y_{13}} & \overbrace{-y_{23}} & \overbrace{y_{30} + y_{13} + y_{23} + y_{34}} & \overbrace{-y_{34}} \\ \boxed{Y_{41}} & \boxed{Y_{42}} & \boxed{Y_{43}} & \boxed{Y_{44}} \\ \overbrace{0} & \overbrace{-y_{24}} & \overbrace{-y_{34}} & \overbrace{y_{40} + y_{24} + y_{34}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

ECUACIÓN 23: REDUCCIÓN DE TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN 18

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Las admitancias determinadas como  $Y_{ii} = (i = 1,2,3,4)$  son la auto admitancia del nodo  $i$ , y son expresadas mediante la suma algebraica de todas admitancias que se encuentran conectadas al nodo. Las admitancias diagonales se denominan como admitancias mutuas, siendo  $Y_{ik} = (i, k = 1,2,3,4)$  entre los nodos  $i$  y  $k$ .

Entonces, para una red con  $N$  nodos se puede definir como:

ECUACIÓN 24: LEY DE CORRIENTES DE KIRCHOFF

$$I = Y_{conductor} V$$

Así tenemos que  $Y_{conductor}$  es:

ECUACIÓN 25: EQUIVALENCIA DE  $Y_{conductor}$

$$Y_{conductor} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix}$$

Empleando las ecuaciones 23 y 24 puede expresarse una ecuación que permita encontrar las corrientes de un sistema mediante iteraciones.

ECUACIÓN 26: CORRIENTE DE ENTRADA EN UN NODO.

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n$$

Para poder emplear un enfoque sistemático en la solución de dificultades con flujos de carga, es necesario definir algunos tipos de conductores:

1. Un conductor de carga se define así porque son conocidas las potencias activa P y reactiva Q, y  $|V|$  y  $\delta$  son desconocidas.
2. En un conductor del generador la magnitud del voltaje  $|V|$  y la potencia P son conocidas, mientras que Q y  $\delta$  se van a obtener.
3. En un conductor de respaldo, el voltaje generado  $|V|$  y  $\delta$  son conocidos, y P y Q van a ser determinados. Varios autores proponen escoger  $V \angle \delta = 1 \angle 0^\circ$  por unidad.

La ecuación 26 puede ser descrita por:

ECUACIÓN 27: CORRIENTE DEL NODO K-ENÉSIMO.

$$I_k = Y_{kk} V_k + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n$$

Despejando  $V_k$  de la ecuación anterior obtenemos:

ECUACIÓN 28: VOLTAJE DEL NODO K-ENÉSIMO

$$V_k = \frac{I_k}{Y_{kk}} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n$$

ECUACIÓN 29: VOLTAJE DEL NODO K-ENÉSIMO EXPRESADO MEDIANTE POTENCIA S.

$$V_k^* I_k = P_k - jQ_k$$

Despejando  $I_k$  de la ecuación 29 obtenemos:

ECUACIÓN 30: CORRIENTE DEL NODO K-ENÉSIMO EXPRESADO MEDIANTE POTENCIA S.

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*}$$

Insertando la ecuación 30 en la ecuación 28 se obtiene:

ECUACIÓN 31: ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA

$$V_k = \frac{I_k}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \right)$$

Para  $k = 1, 2, \dots, N$ , este conjunto de  $N$  ecuaciones representan las ecuaciones de flujo de carga.

## 2.6 Métodos analíticos Gauss-Seidel y Newton-Rapson

Los métodos analíticos representan una forma de resolver las ecuaciones de flujo de potencia a partir de establecer funciones no lineales por cada nodo. En trabajos como [25] [26] el método propone generar  $N-1$  funciones no lineales, las cuales se resuelven iterativamente hasta obtener la convergencia en los voltajes de cada nodo del SEP. Para el análisis se pueden emplear los métodos de Newton-Raphson y Gauss Seidel. Entre las fortalezas de los métodos es la ausencia de una programación sofisticada y que representa una opción más para calcular flujos de potencia.

### 2.6.1. Gauss-Seidel.

Es considerada un método de eliminación, con el cual, se resuelven ecuaciones no lineales simultáneamente con aproximaciones precisas. El método no está recomendado para una cantidad mayor a 20 ecuaciones por sistema.

A continuación, se explica un ejemplo empleando el método de Gauss [1]

Ejemplo: Despejar  $x$  y  $y$  del sistema de ecuaciones.

$$y - 3x + 1,9 = 0$$

$$+x^2 - 1,8 = 0$$

Al resolver por el método de Gauss se despeja  $x$  de la primera ecuación, y  $y$  de la segunda para reescribir las ecuaciones:

$$x = \frac{y}{3} + 0,633$$

$$y = 1,8 - x^2$$

Se asigna un valor inicial el cual será de  $x_0 = 1$  y  $y_0 = 1$ . Se reemplaza en la ecuación 1 y 2 y se obtiene lo siguiente:

$$x_1 = \frac{y_0}{3} + 0,633$$

$$y_1 = 1,8 - x^2$$

$$x_1 = \frac{1}{3} + 0,633$$

$$y_1 = 1,8 - 1$$

$$x_1 = 0,9663$$

$$y_1 = 0,8$$

Las iteraciones dadas por  $n$  se calculan de una forma general:

$$x_{n+1} = \frac{y_n}{3} + 0,633$$

$$y_{n+1} = 1,8 - x_n^2$$

Luego de varias iteraciones, se obtiene que  $x = 0,938$  y  $y = 0,917$ . Si se realiza más iteraciones, se aproximan a los resultados más exactos:  $x = 0,93926$  y  $y = 0,9178$ .

Sin embargo, se debe tener en cuenta que para una simple conjetura los valores iniciales, los cuales serán  $x_0 = y_0 = 100$ , en este caso la solución diverja.

Al usar el método de Gauss-Seidel para el ejemplo anterior, se podría calcular  $x_{n+1}$  para encontrar  $y_{n+1}$ . En este método el algoritmo estará dado por:

$$x_{n+1} = \frac{y_n}{3} + 0,633$$

$$y_{n+1} = 1,8 - x_{n+1}^2$$

Los resultados anteriores se extrapolan y se determina el algoritmo de Gauss-Seidel para las ecuaciones de flujo de potencia, la ecuación es:

ECUACIÓN 32: ALGORITMO GAUSS-SEIDEL

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left[ \frac{P_k - jPQ_k}{(V_k^{(i)})^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n^{(i)} \right]$$

Para  $k = 2, 3, \dots, N$

En la ecuación 24 se especifica  $V_1$ , y se calcula en el conductor 2.

### 2.6.2. Newton-Raphson.

Este método se emplea para la optimización iterativa que utiliza aproximaciones por medio de la serie de Taylor hasta el orden 2.

Para este método se considera dos funciones de dos variables  $x_1$  y  $x_2$ , tales que:

$$f_1(x_1, x_2) = C_1$$

$$f_2(x_1, x_2) = C_2$$

Donde las constantes corresponden a  $C_1$  y  $C_2$ .

Sean  $x_1^{(0)}$  y  $x_2^{(0)}$  estimaciones iniciales de soluciones para la funciones  $f_1$  y  $f_2$  y sean  $\Delta x_1^{(0)}$  y  $\Delta x_2^{(0)}$  los valores por los cuales las estimaciones iniciales difieren de las soluciones correctas. Esto es:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) = C_1$$

$$f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) = C_2$$

Aplicando una serie de Taylor a cada una de las ecuaciones en se obtiene:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1^{(0)}} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{x_2^{(0)}} + \dots = C_1$$

$$f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{x_1^{(0)}} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{x_2^{(0)}} + \dots = C_2$$

Despreciando las derivadas de orden mayor y escribiendo el resultado en forma de matriz, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} C_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \\ C_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} x_1^{(0)}, x_2^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

Este tipo de representaciones permite encontrar soluciones de forma iterativa.

## 2.7 Modelo matemático para el Estudio de Flujos

“Al establecer un modelo matemático del problema de flujos de potencia, es preciso la comprensión de como circulan los flujos de potencia sobre una red. Al considerar que cada nodo del sistema tiene una demanda de potencia constante, y al conocer o suponer un valor para la tensión nodal se halla la corriente nodal” [27].

La potencia compleja nodal  $S_m$ , inyectada en el nodo m está dada por:

ECUACIÓN 33: POTENCIA COMPLEJA INYECTADA

$$S_m = V_m I_m^*$$

$I_m^*$  Corriente compleja conjugada en el nodo m.

Suponiendo un valor para el voltaje  $V_m$ :

ECUACIÓN 34: POTENCIA COMPLEJA INYECTADA REPRESENTACIÓN EN SU CONJUGADA

$$I_m = \left( \frac{S_m}{V_m} \right)^* = \frac{P_m^{neta} - jQ_m^{neta}}{V_m^*}$$

En el planteamiento del problema de flujos de potencia, es relevante conocer el concepto de inyección de potencia a través de una fuente de generación; y las cargas tendrán una inyección de valor negativo.

En la ecuación 35 se expresa la potencia neta en nodo m [27] :

ECUACIÓN 35: POTENCIA NETA EN EL NODO M

$$\begin{aligned} S_m^{neta} &= S_{Gm} - S_{Dm} \\ P_m^{neta} &= P_{Gm} - p_{Dm} \\ Q_m^{neta} &= Q_{Gm} - Q_{Dm} \end{aligned}$$

## 2.8 Programas de flujo de potencia

Los programas de flujo de potencia tienen como objetivo el análisis del desempeño de una red eléctrica en régimen permanente bajo distintas condiciones de carga. Trabajos como [28] Hace referencia a una herramienta que se utiliza como análisis de base para la planificación, diseño y aprovechamiento de cualquier red de energía eléctrica, sea tipo pública o industrial.

En los diferentes programas se emplean los métodos más recientes para resolver el producto de matriz dispersa por vector y algoritmos de solución múltiple, siendo algunos de estos:

- Newton-Raphson completo
- Fast Decoupled
- Gauss-Seidel

En estos programas se puede lograr un interfaz con diferentes módulos, como se observa, a continuación:

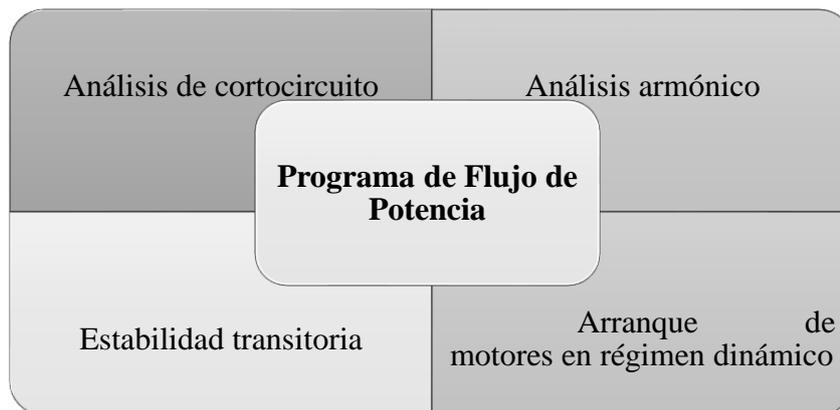


FIGURA 11. MÓDULOS DE UN PROGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA

ELABORADO POR: AUTORES

A continuación, se muestra una breve explicación de los módulos:

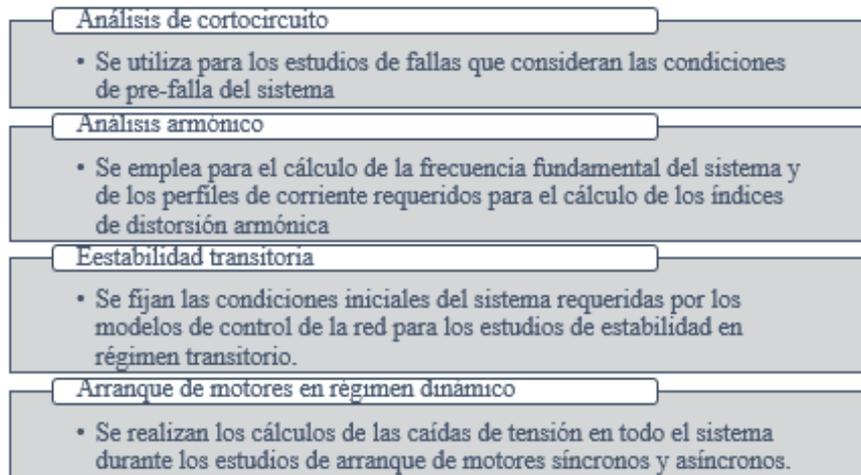


FIGURA 12. MÓDULOS DE UN PROGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA

### 2.8.1. Matlab.

Matlab es un popular software de simulación para la industria y la academia. Este tiene como fin realizar análisis numérico y control de sistemas. Siendo uno de sus fuertes el procesamiento de matrices numéricas. Gracias a su flexibilidad de permitir programación por parte de los usuarios, se ve incrementada la resolución de sistemas lineales y no lineales con programas que pueden ser descargados desde la página de Matlab así como toolboxes de estudios de casos especiales redes neuronales en control y sistemas de potencia para protecciones eléctricas [29].

### 2.8.2 Simulink.

Es una herramienta del Matlab que permite analizar varios dominios de sistemas dinámicos. La ventaja de emplear esta herramienta es su posibilidad de diseño en bloques mediante una representación gráfica. El Simulink puede resolver sistemas que hayan sido modelados mediante ecuaciones diferenciales continuas o discretas. O sistemas híbridos lineales y no lineales. La interfaz gráfica de usuario (GUI) que proporciona permite su fácil uso al momento de las programaciones [30].

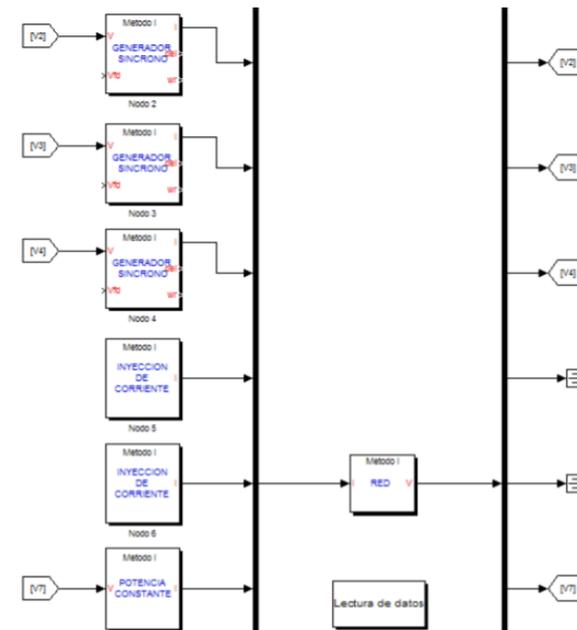


FIGURA 13. ESQUEMA DE PROGRAMACION EN SIMULINK

### 2.8.3 Arduino.

Arduino es una aplicación multiplataforma escrita en el lenguaje de programación Java y en la placa Arduino se puede escribir y subir programas. Arduino se puede ejecutar en diferentes sistemas operativos. Una de las ventajas de Arduino se debe a que dispone de un código abierto y software y hardware extensible. En Arduino los proyectos pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador. Las placas son baratas y pueden ser pre-ensambladas o ensambladas a mano. Adicionalmente, dispone de un entorno de programación simple y clara, sus diseños de referencia del hardware se encuentran open-source, ya que se encuentran disponibles bajo licencia. Este software es amigable y muy fácil de usar [31].

### 2.9 Porcentaje de error

Se define a la magnitud de la diferencia de un valor exacto y un valor aproximado, dividido por la magnitud del valor exacto por 100 casos. Este valor nos permite conocer cuán lejos está un valor aproximado del real a través de un porcentaje del valor real. Cuando se mide, el error se debe al método de medición es decir una herramienta o error humano [32].

#### FÓRMULA 1. PORCENTAJE DE ERROR

$$\% \text{ error} = \frac{|approx - exact|}{exact} \times 100$$

## CAPÍTULO III

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Actualmente, el proyecto Análisis de flujo de potencia en un SEP lo vamos a realizar con la ayuda de los siguientes materiales y softwares:



FIGURA 14. SOFTWARE Y MATERIALES EMPLEADOS

### 3.1 Programación de Software

#### 3.1.1 Matlab.

Es un software matemático que nos ayuda para resolver problemas matemáticos de Ingeniería.

Del cual nos va a servir dicho software para la transmisión de datos que va obtener el Arduino que serán nuestros resultados experimentales.

TABLA 4. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN MATLAB

```
%%Codificación de medición de corriente con ACS 712 en Matlab
clear all;
close all;
clc;
puerto=('COM4')
delete(instrfind({'Port'},{puerto}));
```

```

pserial=serial(puerto,'BaudRate',9600);
fopen(pserial);
nn=5; % tiempo de muestras en segundos
num=nn*3; % se designa el numero de muestras a tomar

val=zeros(1,num);
for i=1:num
    lectura=fscanf(pserial,'%d');
    lectura=lectura/10000;
    val(i)=lectura;
    sens={'sensor1','sensor2','sensor3'};
%   val1(i)=lectura
%   val2(i)=lectura
%   hold on
%   plot(i,val(i),'x');

end
vall=val(:);
t=table(vall)
dlmwrite('Valores_Obtendidos.dat', val, 'delimiter', '\n', 'precision', '%.4f')
fclose(pserial);
delete(pserial);
%% Codificación para obtención de gráficas en Matlab
h = animatedline;
axis([0 4*pi -1 1])
x = linspace(0,4*pi,10000);
y = sin(x);

for k = 1:length(x)
    addpoints(h,x(k),y(k));
    drawnow limitrate
end
drawnow

```

## **%%Codificación final Matlab**

```
function varargout = Final(varargin)
% FINAL MATLAB code for Final.fig
%   FINAL, by itself, creates a new FINAL or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = FINAL returns the handle to a new FINAL or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   FINAL('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in FINAL.M with the given input arguments.
%
%   FINAL('Property','Value',...) creates a new FINAL or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Final_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Final_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Final

% Last Modified by GUIDE v2.5 01-Feb-2019 20:31:14

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Final_OpeningFcn, ...
```

```

        'gui_OutputFcn', @Final_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [] , ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if narginout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Final is made visible.
function Final_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Final (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Final
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Final wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

```

```

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Final_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function puerto_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to puerto (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
puert=get(hObject,'String');
p=(puert)
global p;

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function puerto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to puerto (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function seg_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to seg (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of seg as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of seg as a double
global nn;
nn=str2double(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function seg_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to seg (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if    ispc    &&    isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in calcular.
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to calcular (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global p nn t;
clc;
puerto=p
delete(instrfind({'Port'},{puerto}));
pserial=serial(puerto,'BaudRate',9600);
fopen(pserial);
%nn = numero.... tiempo de muestras en segundos
num=nn*3; %se designa el numero de muestras a tomar

```

```

val=zeros(1,num);

h = animatedline;
axis([0 4*pi -1 1])
x = linspace(0,4*pi,100000);
y = sin(x);

for k = 1:length(x)
    addpoints(h,x(k),y(k));
    drawnow limitrate
end
drawnow
axes(handles.gra)

for i=1:num
    lectura=fscanf(pserial,'%d');
    lectura=lectura/10000;
    val(i)=lectura;
    sens={'sensor1','sensor2','sensor3'};
%   val1(i)=lectura
%   val2(i)=lectura
%   hold on
%   plot(i,val(i),'x');
end
vall=val(:);
t=val;
dlmwrite('Valores_Obtendidos.dat', val, 'delimiter', '\n', 'precision', '%.4f')
fclose(pserial);
delete(pserial);
set (handles.Tagtabla,'data',vall);

% --- Executes on button press in cerrar.

```

```

function cerrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to cerrar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close all

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function gra_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to gra (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate gra

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double
global s1;
s1=str2double(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double
global s2;
s2=str2double(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

global s3;
s3=str2double(get(hObject,'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in error.
function error_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to error (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global s1 s2 s3 t;
t=t
vs1= t(1,1)
vs2= t(1,2)
vs3= t(1,3)
err1=abs(vs1-s1);
err11=(err1/s1)*100;

err2=abs(vs2-s2);
err22=(err2/s2)*100;

```

```

err3=abs(vs3-s3);
err33=(err3/s3)*100;

e1= num2str(err11);
e2= num2str(err22);
e3= num2str(err33);
set(handles.sen1,'String',e1);
set(handles.sen2,'String',e2);
set(handles.sen3,'String',e3);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sen1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to sen1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sen2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to sen2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sen3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to sen3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

ELABORADO POR: AUTORES

### 3.1.2 Simulink.

Es un toolbox de MATLAB que sirve para la simulación de circuitos, a continuación, se visualiza el esquema de modelos de línea corta y barra de carga,

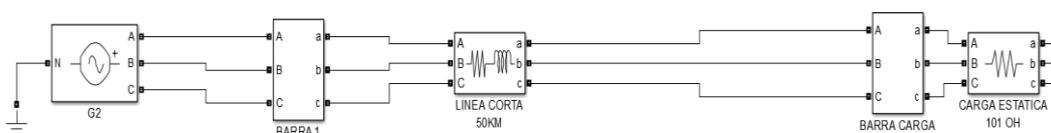


FIGURA 15. ESQUEMA DE MODELOS DE LINEA CORTA Y BARRA DE CARGA

Como se logra visualizar es como se presentará el circuito de la primera práctica en el plugin de Matlab (simulink).

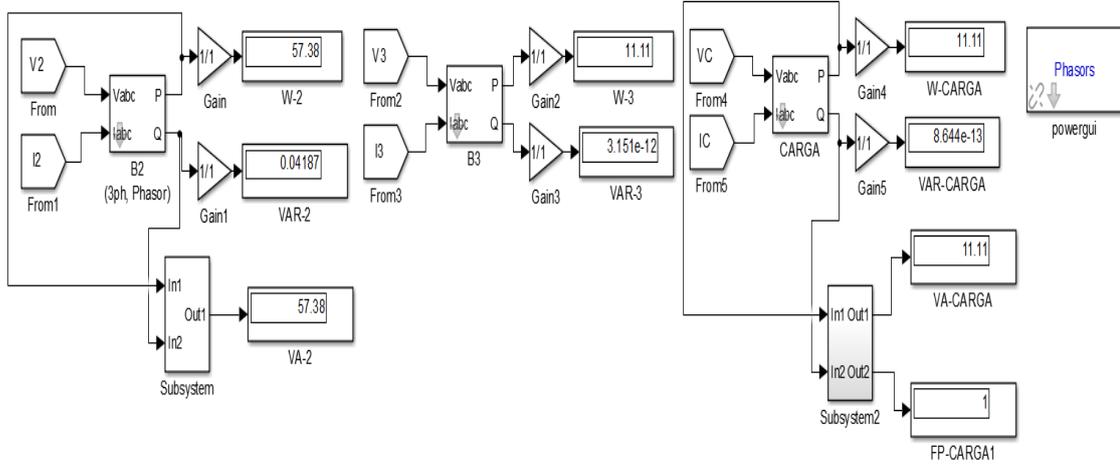


FIGURA 16. ESQUEMA DE PRIMERA PRACTICA EN SIMULINK

Este circuito representa nuestro sistema eléctrico de potencia con sus dos fuentes de generación que tiene a sus extremos aterrizados a tierra con sus barras y líneas cortas de 50 kilómetros y en su parte inferior se encuentra la carga estática que nosotros lo representamos con el módulo de carga resistiva de 4 kva.

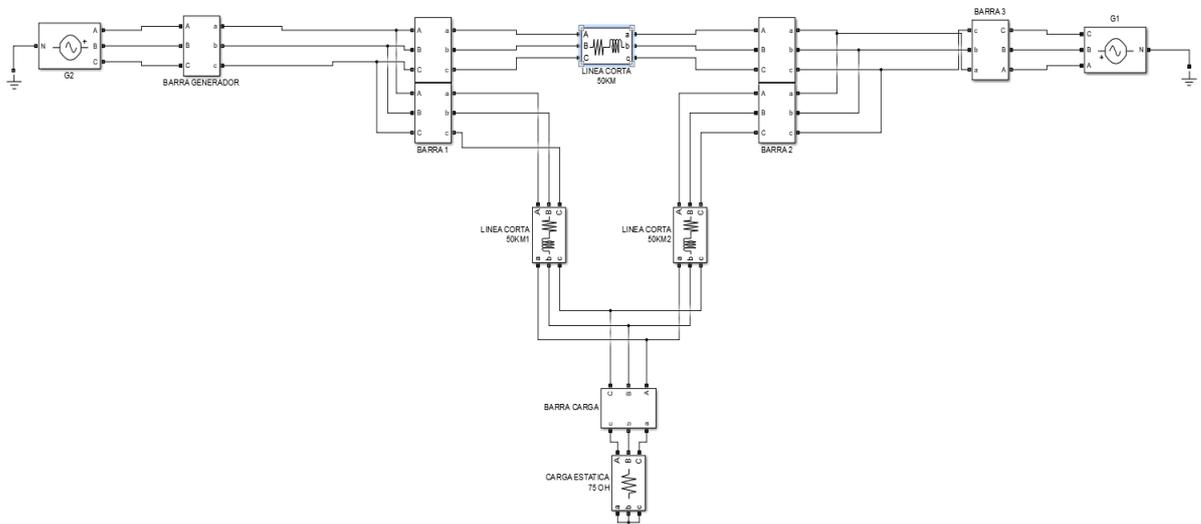


FIGURA 17. ESQUEMA DE MODELO DE DOBLE BARRA Y LINEAS CORTAS

### 3.1.3 Arduino.

Es un software que servirá para la programación en el Mega Arduino



FIGURA 18. INTERFAZ DEL SOFTWARE ARDUINO.

A continuación, se presenta la codificación que servirá para la toma de mediciones en Arduino

TABLA 5. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO

```
#include <Bridge.h>

#include <BridgeClient.h>

#include <BridgeServer.h>

#include <BridgeSSLClient.h>

#include <BridgeUdp.h>

#include <Console.h>

#include <FileIO.h>

#include <HttpClient.h>

#include <Mailbox.h>

#include <Process.h>

#include <YunClient.h>

#include <YunServer.h>
```

```

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  analogReference(INTERNAL);

  //analogReference(INTERNAL1V1); //solo Arduino Mega
}

void loop() {

float Irms=get_corriente(); //Corriente eficaz (A)

float Irms1=get_corriente1(); //Corriente eficaz (A)

float Irms2=get_corriente2(); //Corriente eficaz (A)

float P=Irms*220.0; // P=IV (Watts)

  Serial.print("Irms1: ");

  Serial.print(Irms,3);

  Serial.print("A, Irms2: ");

  Serial.print(Irms1,3);

  Serial.print("A, Irms3: ");

  Serial.print(Irms2,3);

  Serial.println("A");

  //Serial.print("A, Potencia: ");

  //Serial.print(P,3);

  //delay(100);

}

```

```

float get_corriente()
{
    float voltajeSensor;
    float corriente=0;
    float Sumatoria=0;
    long tiempo=millis();
    int N=0;
    while(millis()-tiempo<500)//Duración 0.5 segundos(Aprox. 30 ciclos de 60Hz)
    {
        voltajeSensor = analogRead(A0) * (1.1 / 1023.0);////voltaje del sensor
        corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)
        Sumatoria=Sumatoria+sq(corriente);//Sumatoria de Cuadrados
        N=N+1;
        delay(1);
    }
    Sumatoria=Sumatoria*2;//Para compensar los cuadrados de los semiciclos negativos.
    corriente=sqrt((Sumatoria)/N); //ecuación del RMS
    return(corriente);
}

float get_corriente1()
{
    float voltajeSensor;

```

```

float corriente=0;

float Sumatoria=0;

long tiempo=millis();

int N=0;

while(millis()-tiempo<500)//Duración 0.5 segundos(Aprox. 30 ciclos de 60Hz)

{

    voltajeSensor = analogRead(A1) * (1.1 / 1023.0);///voltaje del sensor

    corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)

    Sumatoria=Sumatoria+sq(corriente);//Sumatoria de Cuadrados

    N=N+1;

    delay(1);

}

Sumatoria=Sumatoria*2;//Para compensar los cuadrados de los semiciclos negativos.

corriente=sqrt((Sumatoria)/N); //ecuación del RMS

return(corriente);

}

float get_corriente2()

{

    float voltajeSensor;

    float corriente=0;

    float Sumatoria=0;

    long tiempo=millis();

    int N=0;

    while(millis()-tiempo<500)//Duración 0.5 segundos(Aprox. 30 ciclos de 60Hz)

```

```

{
    voltajeSensor = analogRead(A2) * (1.1 / 1023.0);////voltaje del sensor
    corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)
    Sumatoria=Sumatoria+sq(corriente);//Sumatoria de Cuadrados
    N=N+1;
    delay(1);
}
Sumatoria=Sumatoria*2;//Para compensar los cuadrados de los semiciclos negativos.
corriente=sqrt((Sumatoria)/N); //ecuación del RMS
return(corriente);
}

```

ELABORADO POR: AUTORES

### 3.2 Construcción de módulo

Previo a la captura de los datos de voltaje, corriente para poder realizar la validación de las simulaciones obtenidas de las programaciones realizadas anteriormente ha sido necesario realizar un módulo de pruebas el mismo que será explicado en esta sección.

En la figura 19. Se muestra la vista frontal del módulo de pruebas de circuitos eléctricos.

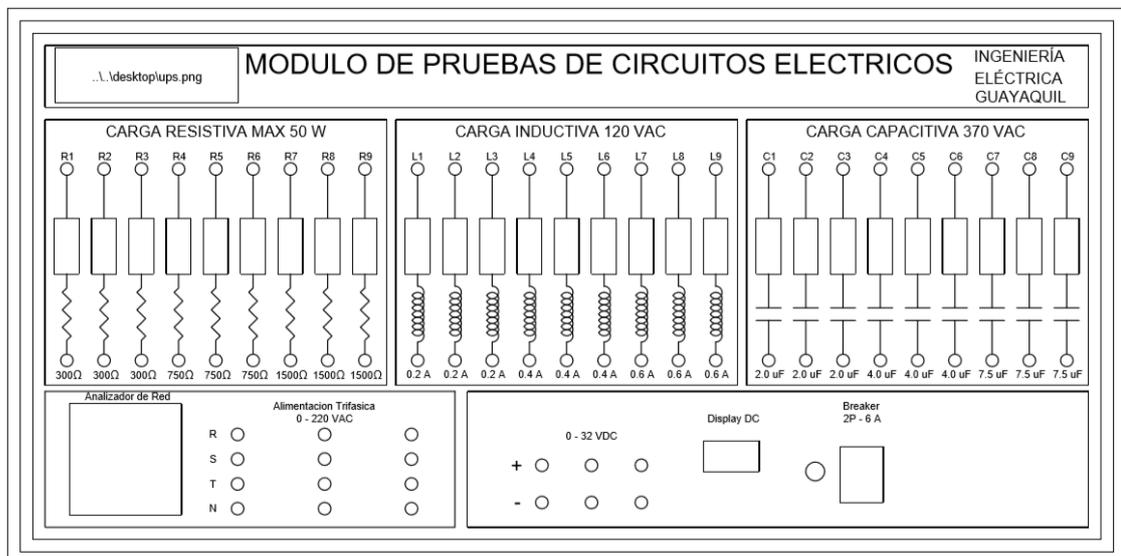


FIGURA 19. VISTA FRONTAL DEL MÓDULO DE PRUEBAS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

En las figuras 20 y 21 se muestran el vinil que indica las conexiones de las alimentaciones principales.

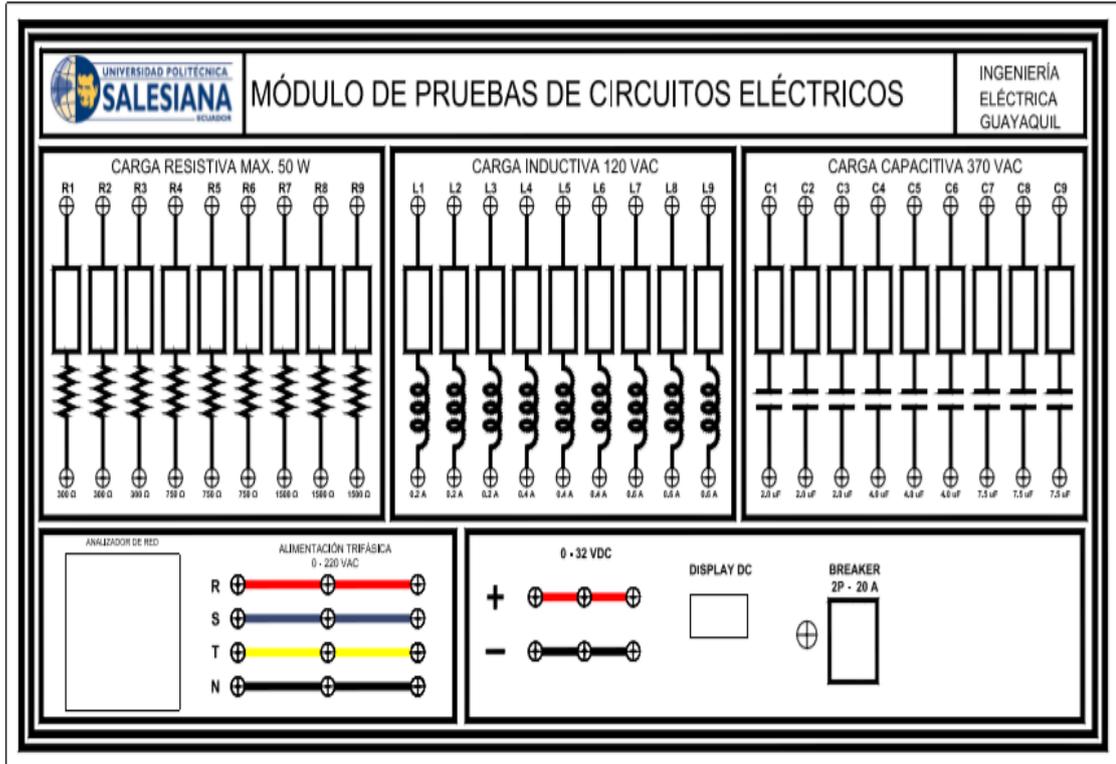


FIGURA 20. VINIL DEL MÓDULO DE PRUEBAS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

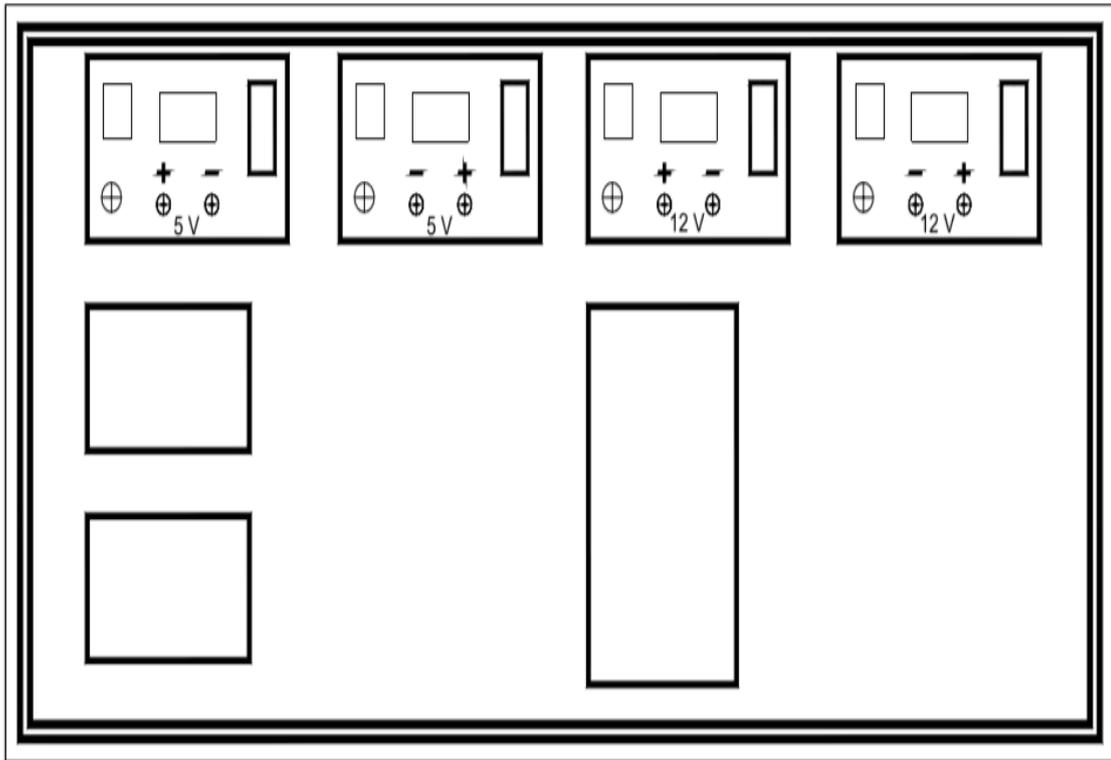


FIGURA 21. VINIL DE SOPORTE DEL MÓDULO DE PRUEBAS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

En la figura 22 se muestra la vista lateral del módulo de pruebas de circuitos eléctricos.

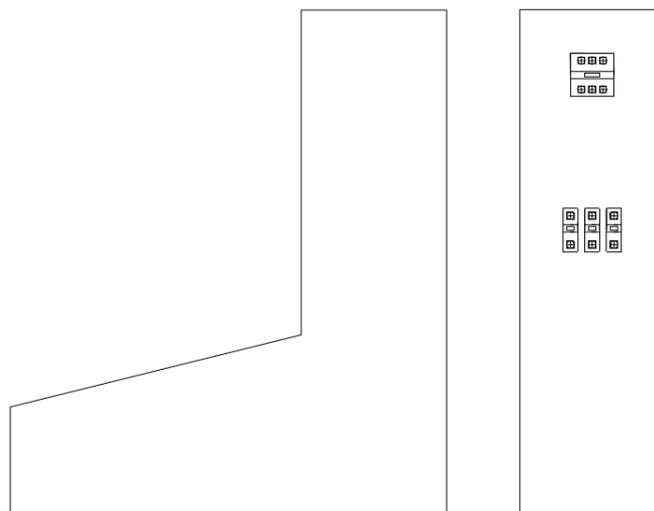


FIGURA 22. VISTA LATERAL DEL MÓDULO DE PRUEBAS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

### 3.2.1 Elementos internos del módulo.

A continuación, se establecen los elementos que conforman el módulo:

En la figura 23 se presenta la configuración interna de las 3 Resistencias de 300 ohms a 50W y de las 3 Resistencias de 750 ohms a 50W y 3 Resistencias de 1500 ohms a 50W.

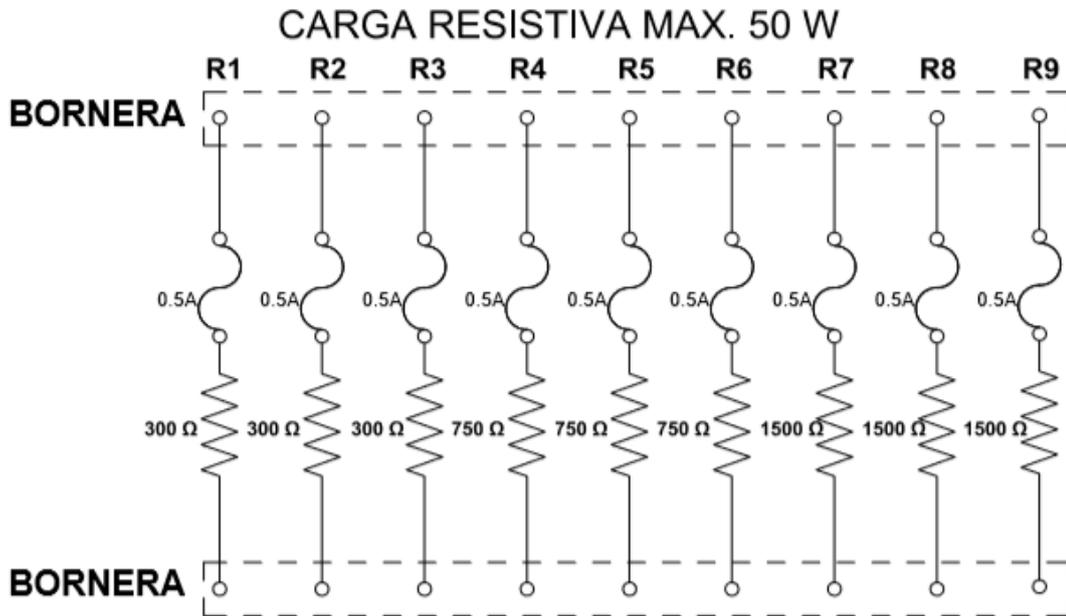


FIGURA 23.CONFIGURACIÓN INTERNA RESISTIVA

En la figura 24 se presenta la configuración interna de los 3 Inductores de 0.2 Amps, los 3 Inductores de 0.4 Amps y 3 Inductores de 0.6 Amps a 10 VAC.

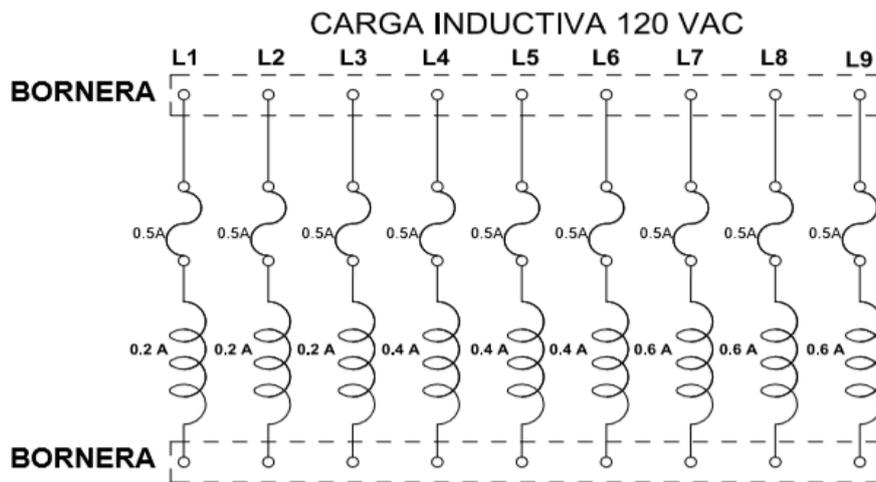


FIGURA 24.CONFIGURACIÓN INTERNA DE INDUCCIÓN

En la figura 25 se presenta la configuración interna de las 3 capacitores de 2.0 uf, 3 capacitores de 4.0 uf y 3 capacitores de 7.5 uf

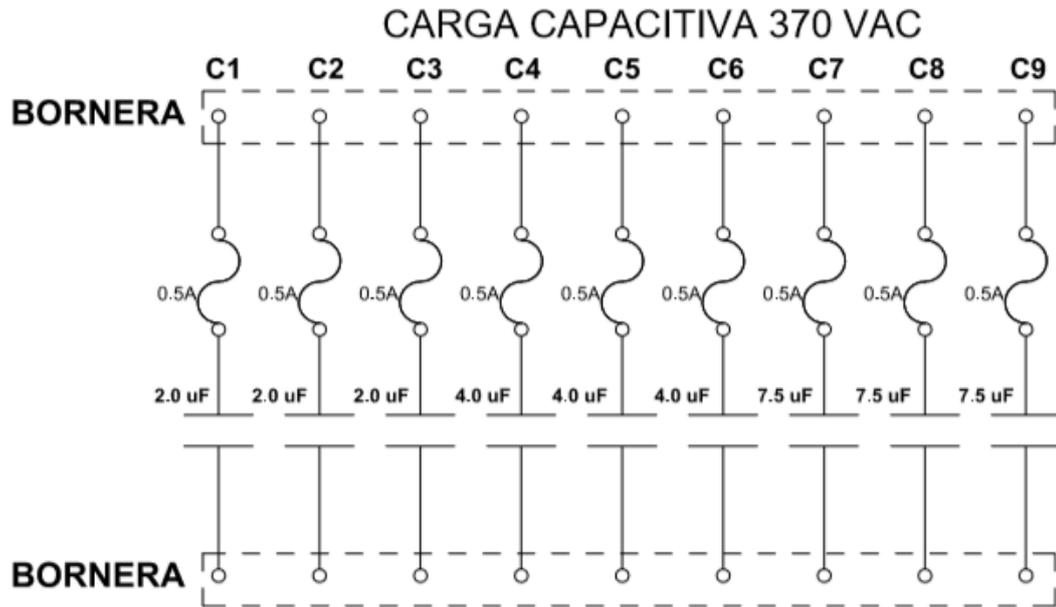


FIGURA 25. CONFIGURACIÓN INTERNA CAPACITIVA

### 3.2.2 Circuito alimentador del módulo.

En la figura 26 se presenta el diagrama de conexiones de alimentación y distribución de energía del módulo. La alimentación principal está formada por una conexión de voltaje trifásica con conexión a tierra y neutro. El breaker de 20 Amps protegerá a la red eléctrica de cualquier corte que se podría producir en las pruebas realizadas en el módulo, a su vez a la salida del breaker se encuentra conectado un medidor de parámetros eléctricos PM 500 con el cual se podrá: monitorear el voltaje de la red, la corriente consumida por los equipos conectados al módulo y el factor de potencia que produzcan los diferentes tipos de carga conectados.

La fuente variable como está representado en la figura 26 es un variador de voltaje (Variac) ver figura 27, el cual mediante tres bloques de resistencias variables permite variar el voltaje a su entrada y otorgar un voltaje modificable de acuerdo a la necesidad de la prueba. Varios equipos requieren un voltaje de corriente directa por ello se ha tomado de la línea trifásica, dos de sus fases para alimentar una fuente de 32 VDC y 6 Amps.

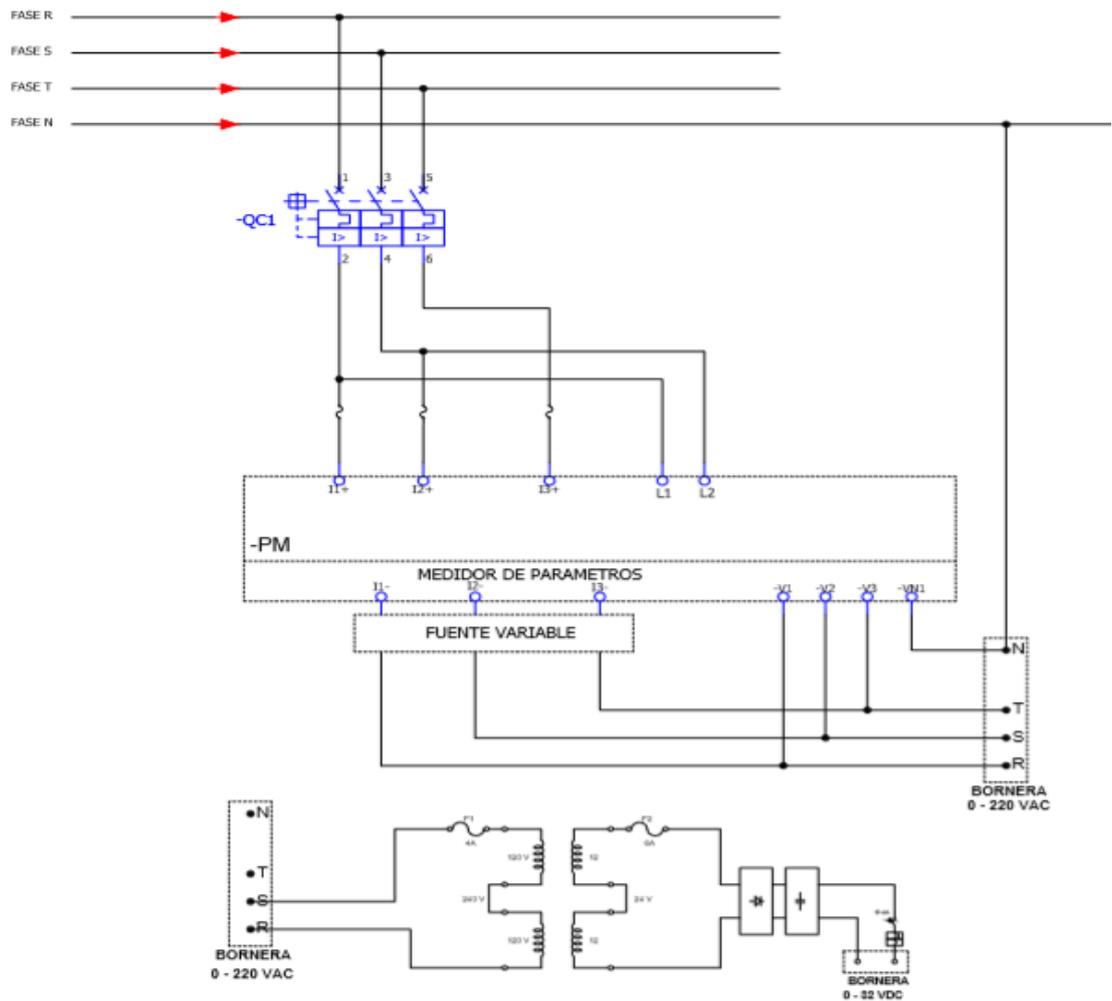


FIGURA 26. DIAGRAMA DE CONEXIONES DE ALIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DEL MÓDULO

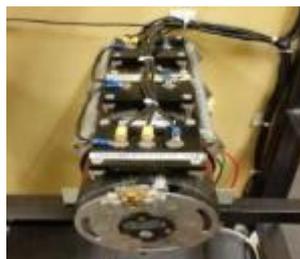


FIGURA 27. VARIAC

### 3.3 Circuito captura de datos

Para poder capturar los datos en tiempo real ha sido necesario crear y construir un circuito que nos permita captar las señales eléctricas como voltaje y corriente para poder digitalizarla y llevarlas a los objetos de simulación a la computadora.

A continuación, se mencionan los elementos empleados para la alimentación

**Mega Arduino:** Es una tarjeta controladora que tiene entradas y salidas tanto analógicas como digitales sirve para programar en un lenguaje Processing/Wiring.

La comunicación se la va a lograr mediante un puerto serial conversión con USB hacia la P.C.

Mega Arduino consta de 54 pines entre las cuales 14 corresponden a salidas PWM), 16 entradas análogas, cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset. Todo lo necesario para poder comunicarnos con la P.C.

Existen diferentes sensores de corriente, uno de ellos es el Acs712 que será empleado para el funcionamiento del microondas como el Arduino. Este sensor está compuesto por el chip allegro ACS712ELC y los valores de escala son: 5A, 20A, y 30, sin embargo, existen una diferencia en la escala en la salida.

Para nuestras prácticas usaremos los Acs712 para medir la corriente en 3 diferentes puntos. Los ACS712 son muy útiles para el circuito que vamos a realizar. A continuación, se presenta el diagrama del sensor. [33]

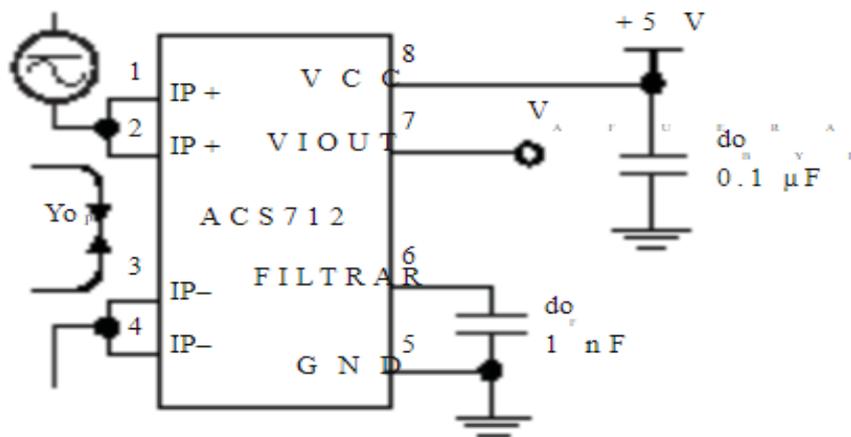


FIGURA 28. DIAGRAMA INTERNO DEL INTEGRADO ACS712

### 3.4 Conexiones entre Arduino y módulo ACS712

Para los módulos ACS712 se identifican las salidas de pines que se observan en la siguiente imagen.

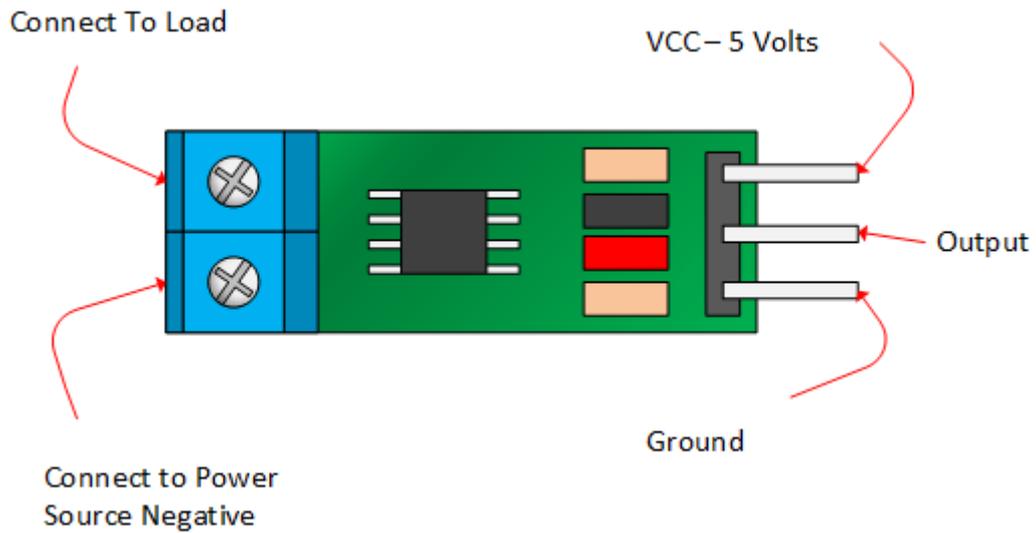


FIGURA 29. ESQUEMA DEL SENSOR ACS712

Es importante tomar en cuenta la polaridad en el extremo de carga del dispositivo en algunos casos la salida aumentara si está conectado de la manera que se muestra en la imagen. Por otro lado, si se conecta por su lado opuesto disminuirá la salida desde el offset de 2.5 voltios.

**Conexión básica y descripción funcional.**

Estos módulos son principalmente empleados para el uso con microcontroladores tales como el Arduino como ya antes se ha dicho, a continuación, se muestran cómo serían las conexiones.

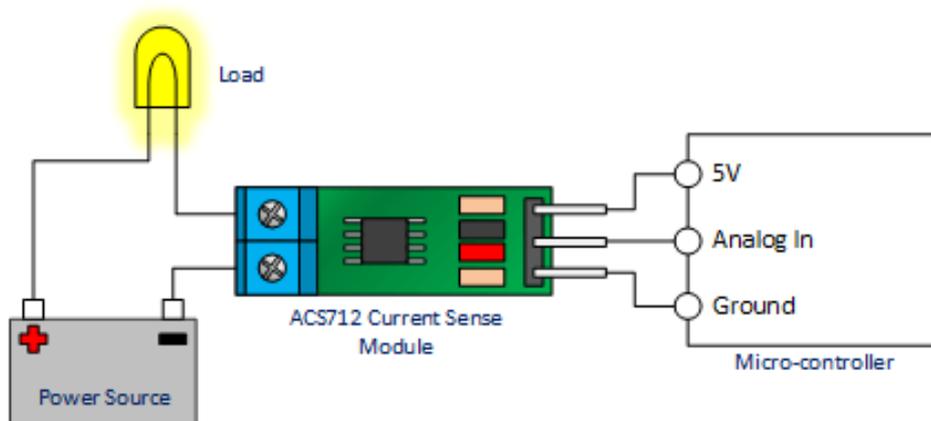


FIGURA 30. DIAGRAMA DE CONEXIONES

Como ejemplo si se desconectara la bombilla la salida del módulo ACS712 vendría ser de 2.500 voltios

Previamente conectado la corriente extraída por medio de la bombilla se escalará, en caso de que el modulo sea de 5 amperios y su bombilla le restara 1 amperio la salida de dicho modulo equivaldría a 2.685 voltios. En caso de que la polaridad de la batería sea invertida y el siendo el mismo módulo 5A, su salida equivaldría a 2.315 voltios

No está de más recordar que el transductor es de efecto Hall. Dicho esto, no debe usarse cerca de campos magnéticos a mayores escalas. [36].

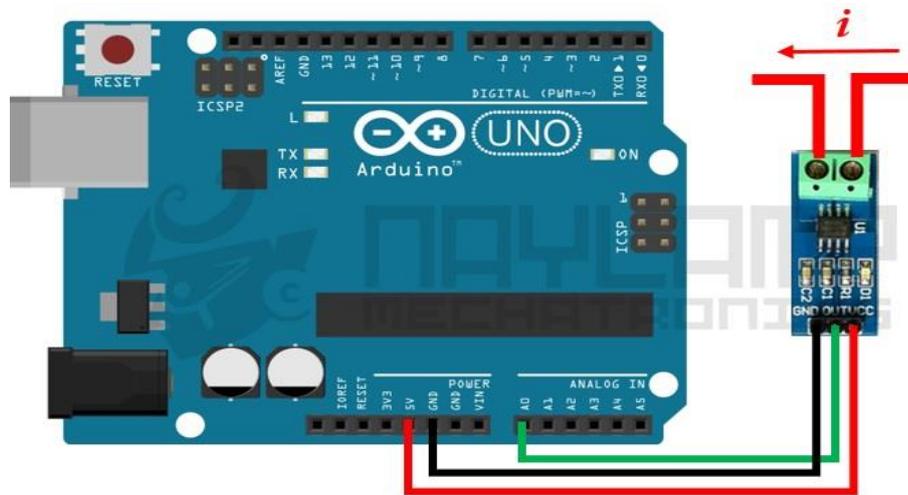


FIGURA 31. CONEXIONES ENTRE ARDUINO Y EL INTEGRADO ACS712

Los pines contienen nombre que ayudará a guiarse para las conexiones en el módulo, en algunos modelos el orden puede variar, en la bornera ingresa la línea que se va a medir, se debe conectar en serie para medir la corriente con el dispositivo o carga, no se debe enlazar en paralelo a la fuente de voltaje. Para una corriente de 0 amperios el sensor debe dar un valor de 2.5 voltios en secuencia aumenta siempre relativamente de acuerdo a la sensibilidad es así que mantiene una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente [34].

Se realiza una gráfica entre voltaje y corriente donde la pendiente es la sensibilidad del lado de (X) y en (Y) debe ser de 2.5 voltios por lo tanto la ecuación de la recta sería la siguiente:

ECUACIÓN 36: VOLTAJE VS CORRIENTE DEL SENSOR

$$V = m I + 2.5$$

La pendiente es m y equivale a la Sensibilidad

Al despejar se tiene la ecuación para encontrar la intensidad a partir de la lectura del sensor:

ECUACIÓN 37: CORRIENTE ENTREGADA POR EL SENSOR

$$I = \frac{V - 2.5}{Sensibilidad}$$

Una vez conseguida la ecuación el siguiente paso es realizar ejemplos con el Arduino.

### **Realizando medidas de corriente con el ACS712**

El modo en que vamos a observar la corriente, será leer la entrada analógica y con la fórmula previamente obtenida conseguir la intensidad.

De acuerdo al modelo del integrado el rango de corriente y sensibilidad podrían variar para los cuales existen 3 modelos que se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 6. VALORES DE RANGO Y SENSIBILIDAD DEL ACS712

Modelo	Rango	Sensibilidad
ACS712ELECTR-05B-T	-5 a 5 A	185 MV/A
ACS712ELECTR-20A-T	-20 a 20 A	100 MV/A
ACS712ELECTR-30A-T	-30 a 30 A	66 MV/A

ELABORADO POR: AUTORES

## CAPÍTULO IV

### 4.1 Análisis y presentación de resultados

En este capítulo son presentadas las pruebas a las cuales fue sometido el módulo de circuitos eléctricos con las conexiones a cargas inductivas como un motor trifásico y cargas resistivas provenientes de un banco de resistencias.

Como fue expresado en la introducción de este trabajo, el análisis de flujo de corriente alterna en los Sistemas Eléctricos de Potencia tiene un mayor impacto si es evaluado los resultados de los cálculos teóricos provenientes de las aulas con resultados obtenidos de módulos que pueden estar en los laboratorios. Esto permite profundizar el conocimiento del estudiante con casos reales en líneas de transmisión llevados a escala en un laboratorio y ver los fenómenos que pueden surgir al producirse un flujo de corriente en los conductores de medio y largo alcance. Un caso claro de flujos de corriente se ve en la figura 32, la cual, presenta el anillo interconectado del sistema de transmisión de 500kV en Ecuador, que transporta energía limpia producida por las centrales hidroeléctricas como Coca Codo Sinclair y Sopladora, que actualmente funcionan y que permiten satisfacer la demanda del servicio de energía eléctrica en mejores condiciones de calidad y confiabilidad.



FIGURA 32. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV. ECUADOR

## 4.2 Práctica

### 1. DATOS INFORMATIVOS

- a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA
- b. No. DE PRÁCTICA  
1
- c. NÚMERO DE ESTUDIANTES  
3 ESTUDIANTES POR MÓDULO
- d. NOMBRE DOCENTE  
DAVID CÁRDENAS V.
- e. TIEMPO ESTIMADO

### 2. DATOS DE LA PRÁCTICA

- a. TEMA  
FLUJO DE CORRIENTE.
- b. OBJETIVO GENERAL  
Analizar la corriente y los voltajes en diferentes puntos del diagrama planteado
- c. OBJETIVOS ESPECIFICOS
  - Conectar una alimentación trifásica y un medio inductivo y ver su comportamiento
  - Conectar una carga resistiva y ver su comportamiento
  - Comparar los valores teóricos con los datos reales
- d. MARCO PROCEDIMENTAL
  - **“CONEXIÓN BÁSICA DE UN CIRCUITO”.**  
Analizar el flujo de corriente en un circuito en serie de una resistencia y un inductor con carga resistiva.
    - 1. Conectar una Resistencia de 750 ohmios y un inductor de 0.4 uf con una carga resistiva de 400 voltios trifásicos
    - 2. Medir los parámetros eléctricos (voltaje y corriente) utilizando el software arduino y el multímetro.

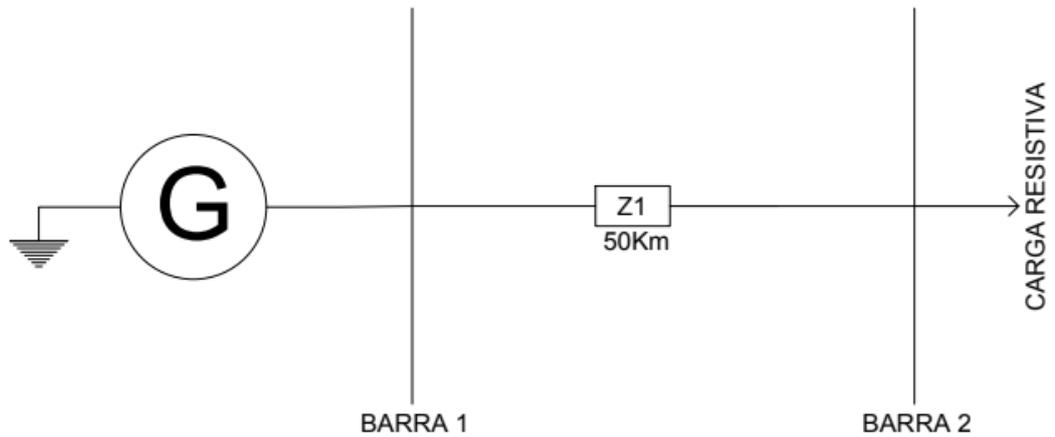


FIGURA 33. DIAGRAMA DE CONEXIÓN

- **CONEXIÓN DOBLE DE ALIMENTACIÓN.**

Analizar de flujo de corriente en líneas cortas con un banco de resistencias a 400V.

Se pretenderá con la siguiente conexión algo más complejo para que ver hacia donde será el flujo de corriente ahora ya con dos puntos de generación y tres barras. De las cuales, ya hemos denominado su largo en kilómetros y también está previsto usar una carga netamente resistiva al término de la barra 3 como veremos en la imagen a continuación:

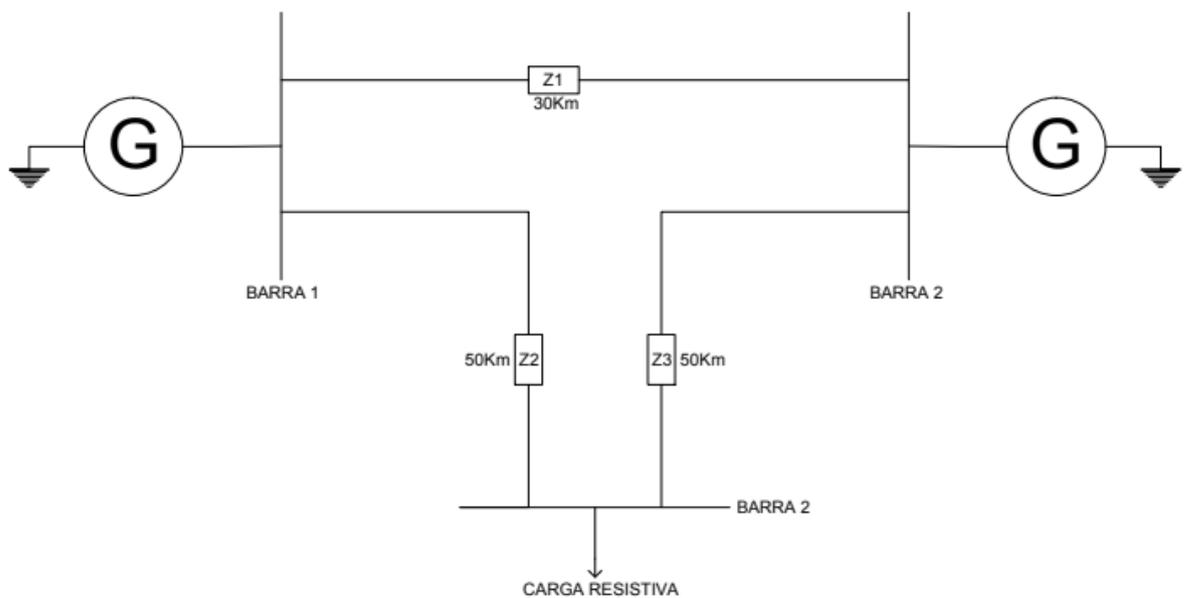


FIGURA 34. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DOBLE DE ALIMENTACIÓN

• CÁLCULOS

$$L * V * K+$$

$$V1 - (750 + j1.545663586)Ia - (Ia - Ib)(101) = 0$$

M1

$$AX = B$$

$$(851 + j1.545663586)Ia - 101Ib = V1 \quad (1)$$

$$X = A^{-1}B$$

$$-101(Ib - Ia) - (750 + j1.545663586)Ib - V2 = 0$$

M2

$$-101 + j1.545663586)Ib = -V2 \quad (2)$$

$$Ia = 0.121664388795 + j0.209940983255$$

$$V1 = 231 \underline{60^\circ}$$

$$Ib = 0.121664388795 - j0.209940983255$$

$$V2 = 231 \underline{60^\circ}$$

$$Ia = 0.242646739008 \quad \underline{59.9069748716^\circ} \quad (A)$$

$$Ib = 0.242646739008 \quad \underline{-120.093025128^\circ} \quad (A)$$

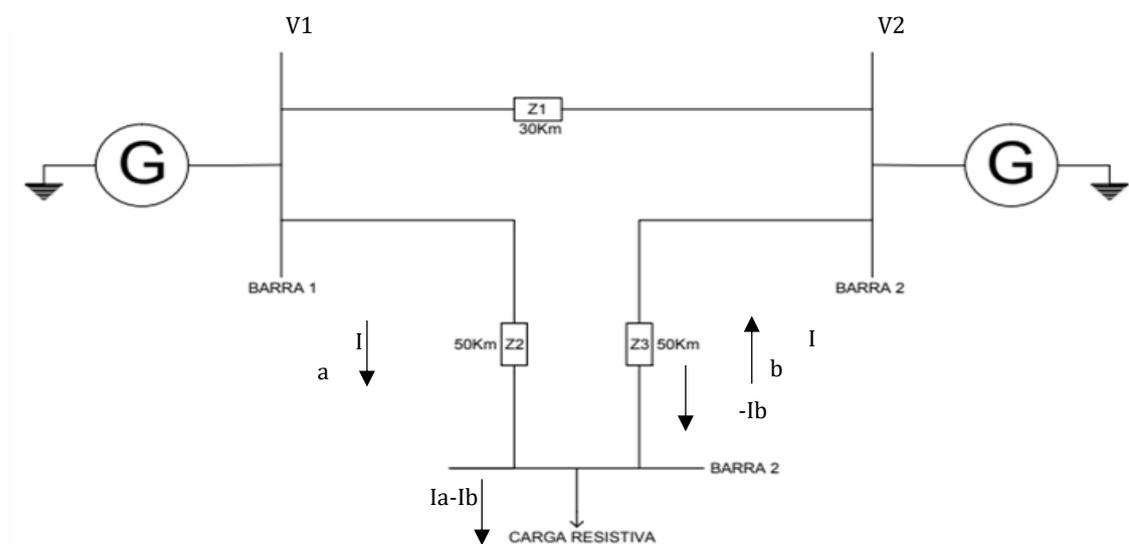


FIGURA 35. DIAGRAMA DE CONEXIONES

$$I_a = -I_b$$

$I_{\text{salen}} = \Sigma I_{\text{ingresan}}$

$$I_R + I_b = I_a$$

$$I_R = I_a - I_b$$

$$I_R = 2I_a$$

Corriente que sale de la carga

$$I_R = 2(0.242646739008 \underline{59.9069748716})$$

$$I_b = 0.485293478 \underline{59.9069748716} \quad (A)$$

$$Z = 101 \quad \underline{0^\circ}$$

$$\text{Carga } R = 101$$

$$I_R \quad \underline{59.9069}$$

$$P = I^2 R = (0.485293478)^2 (101)$$

$$P = 23.78648574 \text{ W}$$

$$V_p = \sqrt{2} V_n S$$

$$V = I * R = (0.485293478)(101)$$

$$V_{AB} = 49.01464128 \underline{59.9069748716^\circ} \quad (V)$$

$$V_{BC} = 49.01464128 \underline{59.9069748716^\circ - 120^\circ} \quad (V)$$

$$V_{CA} = 49.01464128 \underline{59.9069748716^\circ + 120^\circ} \quad (V)$$

$$V_F = \frac{V_{1-L}}{\sqrt{3}} \theta_{L-L} - 30^\circ$$

$$V_{AN} = 28.29861634 \underline{29.9069748716^\circ} \quad (V)$$

$$V_{BN} = 28.29861634 \underline{29.9069748716^\circ - 120^\circ}$$

$$V_{CN} = 28.29861634 \underline{29.9069748716^\circ + 120^\circ}$$

VOLTAJES DE FASE DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

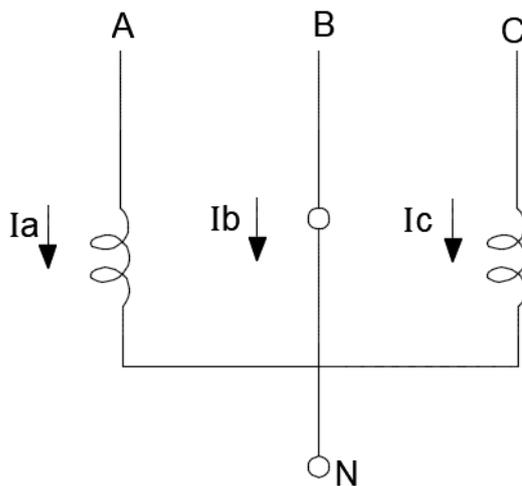
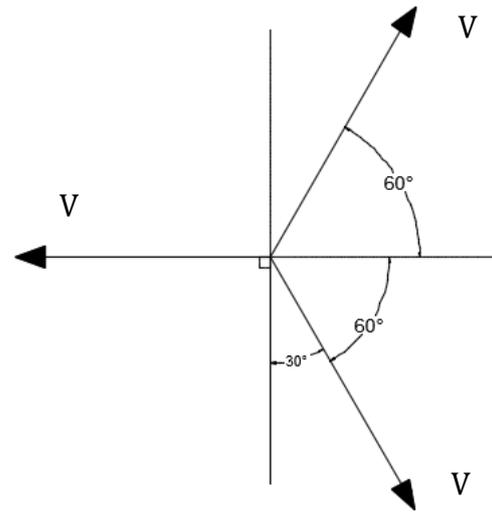
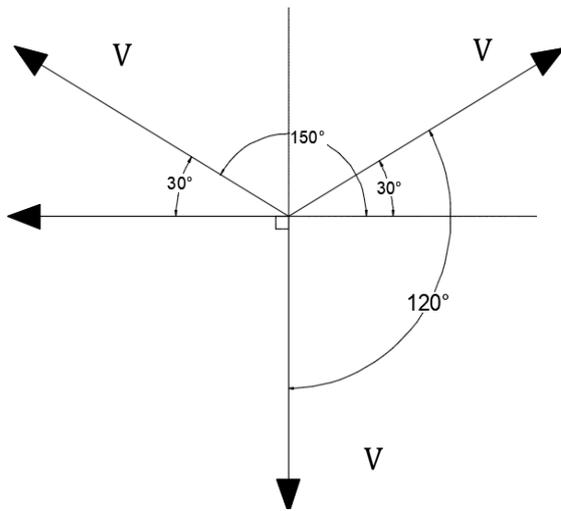
VOLTAJE ENTRE LA BARRA 1-3

$$V_{AB} = I_a * Z_2 = (0.242646739008 \angle 59.9069748716^\circ) * (750.00159 \angle 0.118^\circ)$$

$$V_{AB} = 181.95 \angle 60.01^\circ \text{ (V)}$$

$$VF = \frac{V_{1-L}}{\sqrt{3}} \theta_{L-L} - 30^\circ$$

$$V_{AN} = 105.04 \angle 30.01^\circ \text{ (V)}$$



$V_{AN}, V_{DN}, V_{CN}$

$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$

$$I_b = IF$$

G1

$$I_L = 0.242646739008 \angle 59.9061^\circ \text{ (A)}$$

G2

$$ILG1 = ILG2$$

$$S = VL + IL$$

$$S = (231 \underline{60^\circ}) (0.242646739008) - \underline{59.9061^\circ}$$

$$S = 56.0513 \underline{0.0939^\circ}$$

$$p = \cos(0.093^\circ) = 0.949998657$$

$$P = S \cos \theta = 56.0512W$$

$$Q = S \sin \theta = 0.09186 \text{ VAR}$$

Z1

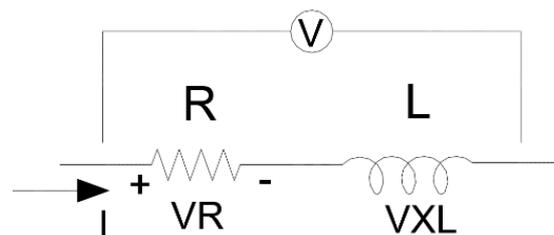
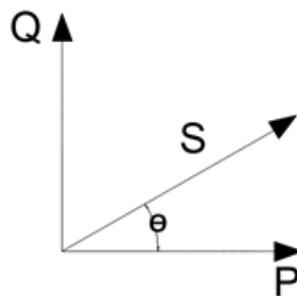
$$P = I a^2 R z1 = (0.242646739008)^2 (750)$$

$$Q = I a^2 X z1 = (0.242646739008)^2 (1.545663586)$$

$$P = 44.1581W$$

$$Q = 0.091 \text{ VAR} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$Q = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)$$



e. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE)

Los recursos virtuales

Las laptops con el software ARDUINO y SIMULINK

Módulos de Circuitos eléctricos

Papel para etiquetar las entradas y salidas asignadas.

f. REGISTRO DE RESULTADOS

TABLA 7. VALORES TEORICOS VS VALORES MEDIDOS

	Barra 1/2			Barra 2/3			Barra 1/3		
	Valor teórico	Valor simulado	Valor medido	Valor teórico	Valor simulado	Valor medido	Valor teórico	Valor simulado	Valor medido
<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	300	300	292	750	750	747	750	750	749
<b>Inductor (mH)</b>	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
<b>Corriente de fase(mA)</b>	0	0	0,04	140.1	140	118.6	140.1	140	115.5
<b>Voltaje de línea-linea (V)</b>	0	0	0	231	231	231	231	231	231

ELABORADO POR: AUTORES

TABLA 8. VALORES TEÓRICOS VS VALORES MEDIDOS DE CARGA Y FUENTE

	Carga		Fuente	
	V. teórico	V. medido	V. teórico	V. medido
<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	750 $\Omega$	121	---	---
<b>Inductor (mH)</b>	4.1	4.1	---	---
<b>Corriente de fase (mA)</b>	-	231,5 mA	---	---
<b>Voltaje de fase (V)</b>	28.29	28.503	231	231

ELABORADO POR: AUTORES

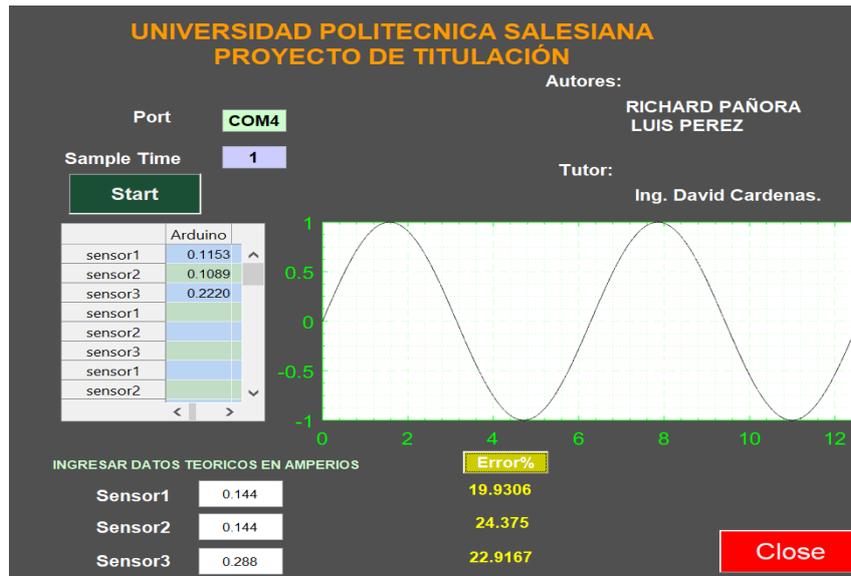


FIGURA 36. TOMA DE DATOS EN 1 SG

ELABORADO POR: AUTORES

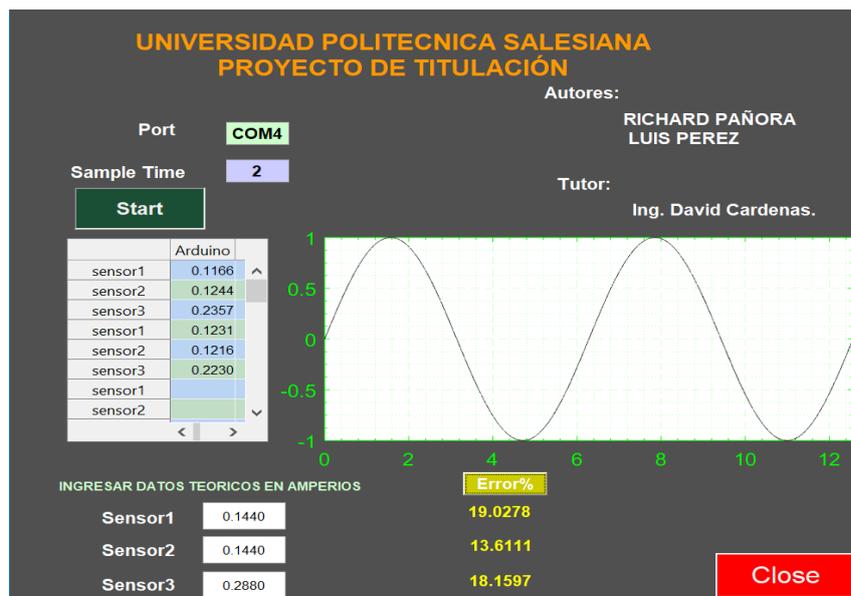


FIGURA 37. TOMA DE DATOS EN 2 SG

ELABORADO POR: AUTORES

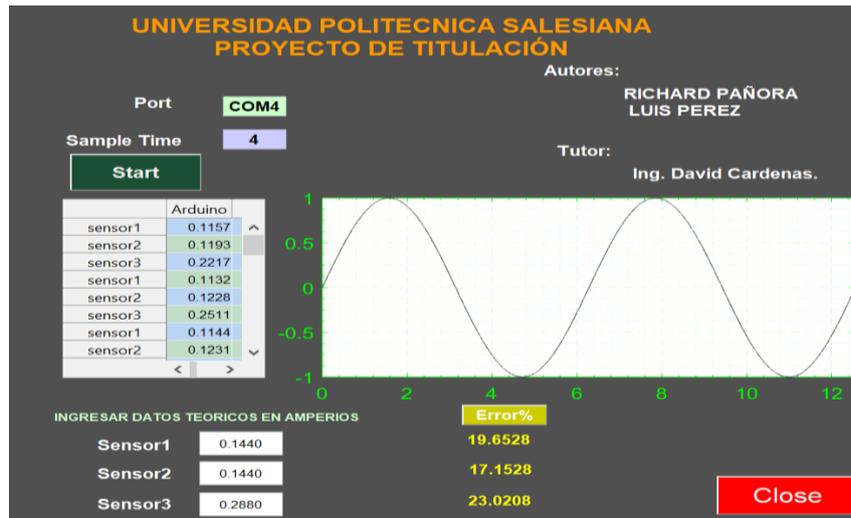


FIGURA 38. TOMA DE DATOS EN 4 SG

ELABORADO POR: AUTORES

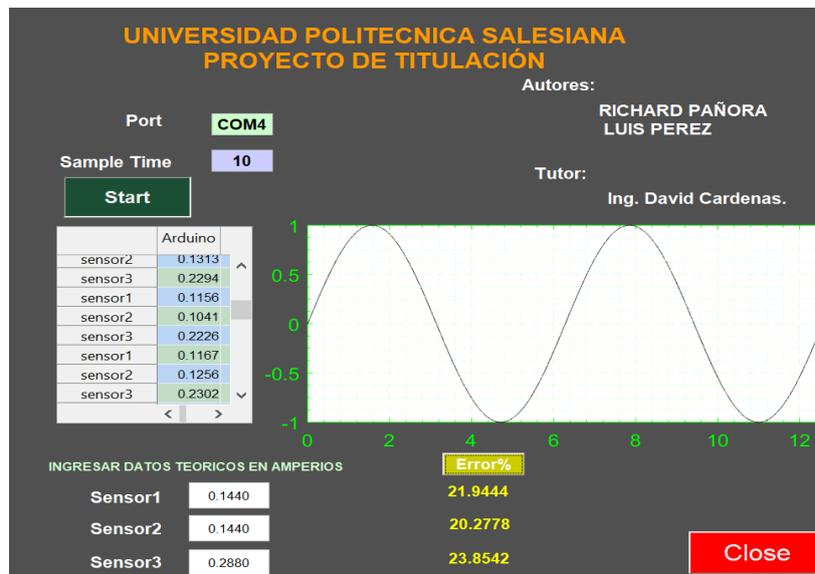


FIGURA 39. TOMA DE DATOS EN 10 SG

ELABORADO POR: AUTORES

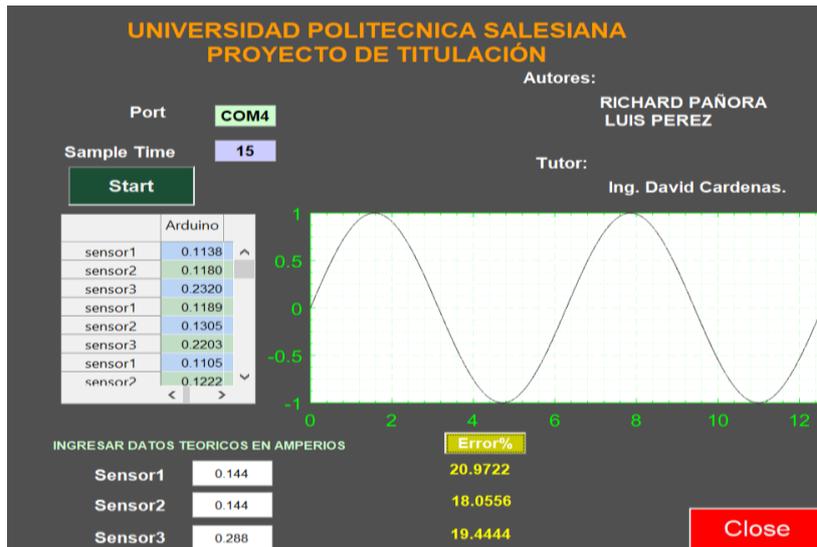


FIGURA 40. TOMA DE DATOS EN 15 SG

ELABORADO POR: AUTORES

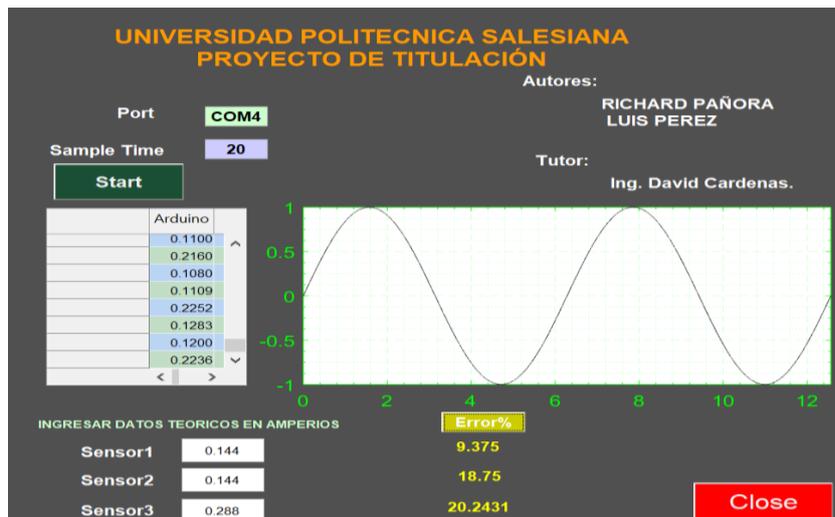


FIGURA 41. TOMA DE DATOS EN 20 SG

ELABORADO POR: AUTORES

## **Conclusiones**

La construcción del módulo de pruebas de circuitos eléctricos proporciona a los estudiantes un aprendizaje basado en problemas, donde el mismo estudiante pone a prueba de forma práctica la teoría dictada en las aulas mediante un conjunto de prácticas propuestas en el capítulo IV. Las cuales, están enfocadas en el análisis de flujos en circuitos de corriente alterna balanceados.

Mediante las ecuaciones planteadas por varios investigadores, tal como se expresa en las referencias a lo largo del trabajo expuesto, fue posible obtener resultados mediante software de simulación. A su vez, al realizar pruebas prácticas con el módulo de circuitos eléctricos, fue posible comparar ambos resultados y evidenciar el correcto funcionamiento del modelo.

Los equipos de marcas de alta gama proveen de módulos para la adquisición de datos de diferentes procesos eléctricos y mecánicos. En este trabajo fue diseñado y construido un micromódulo capaz de adquirir datos a una escala de 1ms, que es capaz de visualizar los picos de arranque de un motor. La inversión de construcción fue más baja que adquirirlo del extranjero.

## **Recomendaciones**

En esta tesis de grado se recomienda el continuo estudio relacionado con el análisis de circuitos eléctricos en corriente alterna ya que es un campo muy grande y conlleva mucho tiempo el comprender y relacionarlo tanto teórico como práctico.

Se deberá implementar manuales donde el estudiante pueda auto educarse para los módulos de circuitos eléctricos y sea más gratificante para los estudiantes.

Se recomienda realizar prácticas de análisis de flujo en corriente alterna con resistencias de mayor ohmio para que así no sufra tanto las resistencias y se puedan visualizar con la pinza amperométrica o sensores de medición de corriente de mejor manera.

## Referencias Bibliográficas

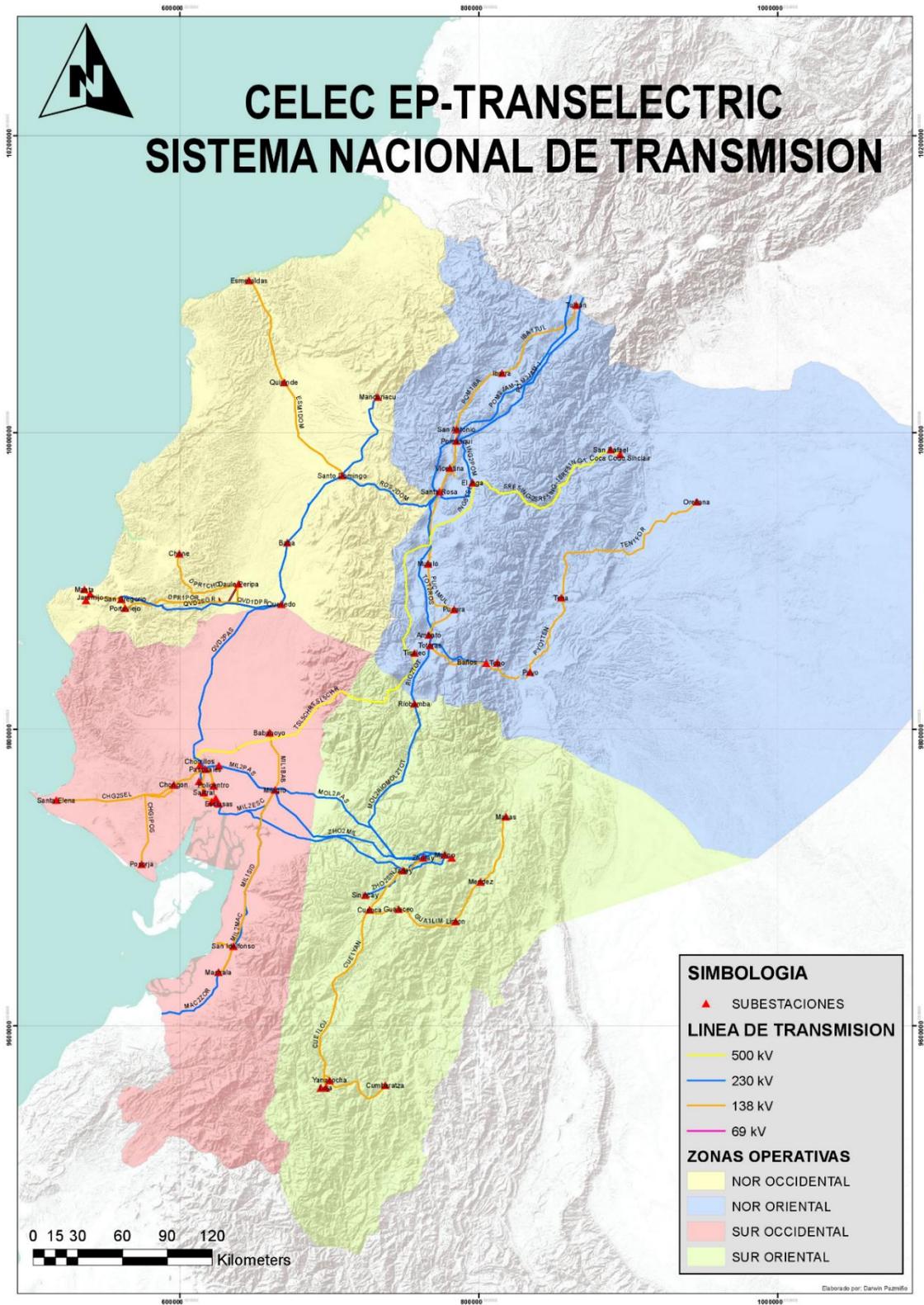
- [1] S. A. Nasar, *Sistemas Eléctricos de Potencia*. México: MCGRAW.HILL, 1991.
- [2] C. Zhang, C. Haoyong, H. Ngan, P. Yang, and D. Hua, “A Mixed Interval Power Flow Analysis under Rectangular and Polar Coordinate System,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1422–1429, 2017.
- [3] S. Kim and T. Overbye, “Hybrid power flow analysis: Combination of AC and DC models,” *Power Energy Conf. Illinois (PECI), 2011 IEEE*, pp. 1–4, 2011.
- [4] S. Kim and T. Overbye, “Mixed power flow analysis using AC and DC models,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 10, p. 1053, 2012.
- [5] J. Yang, N. Zhang, C. Kang, and Q. Xia, “A State-Independent Linear Power Flow Model with Accurate Estimation of Voltage Magnitude,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3607–3617, 2017.
- [6] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. McGraw-Hill, 2002.
- [7] J. K. Felder, I. A. Hiskens, and A. Arbor, “Optimal Power Flow with Storage,” *2014 Power Syst. Comput. Conf.*, pp. 1–7, 2014.
- [8] A. Sánchez, “Modelación del comportamiento de flujo de potencia en sistemas eléctricos de transmisión mediante sincrofasores de tensión y corriente,” *Politécnica Salesiana*, Quito, 2018.
- [9] S. Bahrami, S. Member, F. Therrien, and V. W. S. Wong, “Semidefinite Relaxation of Optimal Power Flow for AC – DC Grids,” *Inst. Electr. Electron. Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–16, 2016.
- [10] M. Gómez, *Introducción a la metodología de la investigación científica*, 1era Edici. Córdoba, 2006.
- [11] R. Valbuena, *La investigación científica avanzada: Con introducción a los programas de investigación científica, la investigación internivel y el razonamiento artificial*. Zulia, 2017.
- [12] K. Cruz, C. Morales, and R. Santana, *Diseño y construcción de módulo didáctico*

*de protecciones para sistemas eléctricos de potencia (SEP) aplicado a sistemas de transmisión.* 2016.

- [13] D. Valarezo and R. Robayo, “Análisis y descripción de los dispositivos electrónicos empleados en la protección de los sistemas eléctricos de potencia,” 2010.
- [14] D. Cuevas and F. Cuevas, “Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia,” 2011.
- [15] E. Mendoza and K. Carrion, *Diseño y Construcción de un banco de pruebas para control de factor de potencia.* 2015.
- [16] J. Malua and V. Orejuela, “Estudio de la Calidad del Producto primario 53C de la subestacion 53 de la EEQ,” p. 224, 2012.
- [17] E. M. Inga Ortega, “Redes de Comunicacion en Smart Grid,” *Ingenius Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 7, pp. 36–55, 2012.
- [18] J. Fuentes, “El método de las cantidades en por unidad Índice.” Cartajena, España, pp. 1–14, 2012.
- [19] N. Muñoz, F. Villada, and D. R. Cadavid, “Análisis de los flujos de potencia de sistemas eléctricos y su interpretación física,” *Inf. Tecnol.*, vol. 23, no. 5, pp. 57–68, 2012.
- [20] J. A. González, “Sistemas por unidad,” no. 4000. Tucumán, Argentina, 2015.
- [21] J. Celaya, “Joaquin Celaya Garcia Sistemas electricos de potencia 2018 5 paginas,” *Sistemas electricos de potencia*, 2018. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/249287051/1-7-Cantidades-en-Por-Unidad>.
- [22] T. Wildi, R. Navarro Salas, and L. M. Ortega González, “Máquinas eléctricas y sistemas de potencia.” 2007.
- [23] R. Villafuerte, R. A. Villafuerte, J. Medina, and E. Mejía, “Aplicación de un Método Iterativo de dos Pasos para el Cálculo de Flujos de Potencia,” *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 1, pp. 189–198, 2017.
- [24] A. Bedoya-Cadena, J. Mora-Flórez, and S. Pérez-Londoño, “Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de

- distribución de energía eléctrica.,” *Reduct. Strateg. Gen. Appl. FAULT LOCATORS Electr. POWER Distrib. Syst.*, no. 17, pp. 21–37, 2012.
- [25] C. Vazquez, G. Reyes, and G. Sanchez, “Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS-Sede Guayaquil,” 2017.
- [26] C. G. Játiva J., Constante G., “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” *Rev. Politécnica*, vol. 33, no. 3, p. 7, 2014.
- [27] J. Franco Izquierdo, “Estudio De Flujos De Potencia Y Analisis De Fallas En Sistemas Electricos De Distribucion Radial,” Universidad Autónoma de nuevo León, 2002.
- [28] I. Nestor and O. Sandoval, “Desarrollo de un programa para flujo de potencia para redes de distribución ligeramente malladas y generación distribuida.” pp. 82–89.
- [29] R. Guzmán Dolores, Misael Villafuerte Díaz and M. Ángeles Manual, “Flujos de potencia con matlab,” UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2012.
- [30] J. D. Carrillo and F. Moscoso, “Modelación, simulación y análisis de flujo de carga de la red eléctrica de transporte de Guatemala, utilizando software de libre acceso,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.
- [31] Arduino, “Arduino,” 2019. [Online]. Available: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [32] J. Devore, *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*, Séptima Ed. México, 2008.
- [33] H. Bench, “ACS712 Current Sensor User Manual.” .
- [34] M. Naylamp, *Tutorial sensor de corriente ACS712.* .

# Anexos



## Anexo 1. Práctica 1.



Valor de voltaje medido en la carga.



Valor de voltaje medido en la fuente.



Valor de voltaje medido en la barra 1-2



Flujo de corriente medido en la carga.



Flujo de corriente medido en la fuente.



Flujo de corriente medido en la barra 1-2.



Diseño de la construcción de la practica 1.

## Anexo 2. Práctica 2.



Valor de voltaje que tiene la carga



Tensión principal con la que vamos alimentar el circuito.



Valores de las barras 2-3 y barra 1-3



Valor de voltaje en barra 1-2 es igual a 0 voltios.

## Datos de corriente en circuito 2



Flujo de corriente que pasa por barra 1-3



Valor de corriente en la carga



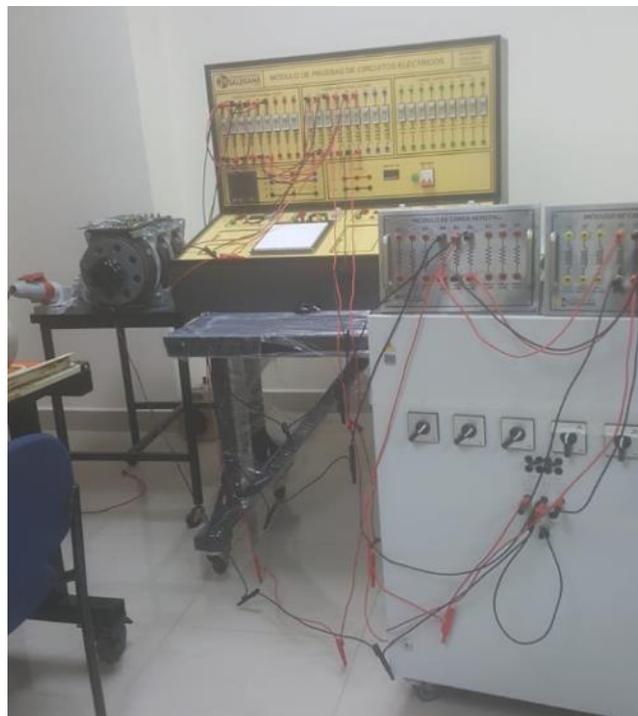
Valor de corriente que transcurre por la barra 1-3



Corriente que transcurre por barra 2-3.



Corriente que pasa por barra 1-2 es igual a cero.



Visualizamos el diseño de la práctica número 2 en nuestro sistema eléctrico de potencia.