



REVISTA INGENIO

Análisis de Flujo AC Aplicados a un Sistema Eléctrico de Potencia

Analysis of AC Flow Applied to an Electric Power System

Alexander Emanuel Torres Romero 1 | [ID](#) Grupo de Investigación SMART-TECH, Guayaquil (Ecuador)
David Humberto Cárdenas Villacres 2 | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)
Raquel de los Angeles Salas Ibarra 3 | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 18/09/2023
Recibido tras revisión:
06/10/2023
Aprobación: 06/11/2023
Publicación: 15/01/2024

PALABRAS CLAVE

Corriente alterna, ACS712, SEP, flujo de potencia, sistema eléctrico de potencia.

ARTICLE HISTORY

Received: 13/10/2023
Received after revision:
13/11/2023
Approved: 04/12/2023
Publication: 01/15/202

KEY WORDS

Alternating Current, ACS712, SEP, Power Flow, Power Electrical System.

RESUMEN

En la actualidad, la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil campus Centenario, se enfrenta a limitaciones de recursos para enseñar el análisis de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia. El objetivo de la presente investigación es proponer y validar prácticas de laboratorio que permitan analizar la corriente alterna en SEP. Se usa metodología experimental y cuantitativa. Las ecuaciones de flujo de potencia y los métodos analíticos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson permiten encontrar los valores teóricos. Este estudio construye un módulo de prácticas que realiza análisis de flujo utilizando herramientas como Matlab, Simulink, Arduino y ACS712. Este módulo emula y analiza la corriente alterna en un SEP. Como resultado de las cargas inductivas y capacitivas aplicadas al módulo, se obtienen valores de corriente, inductancia, voltaje de fase y corriente de fase teóricos, simulados y medidos.

ABSTRACT

Currently, the Electrical Engineering career at the Salesian Polytechnic University, Guayaquil campus Centenario, faces resource limitations to teach the analysis of alternating current in Electrical Power Systems. The objective of this research is to propose and validate laboratory practices that allow the analysis of alternating current in SEP. Experimental and quantitative methodology is used. The power flow equations and the analytical methods of Gauss-Seidel and Newton-Raphson allow finding the theoretical values. This study builds a practice module that performs flow analysis using tools such as Matlab, Simulink, Arduino and ACS712. This module emulates and analyzes alternating current in an SEP. As a result of inductive and capacitive loads applied to the module, theoretical, simulated and measured current, inductance, phase voltage and phase current values are obtained.

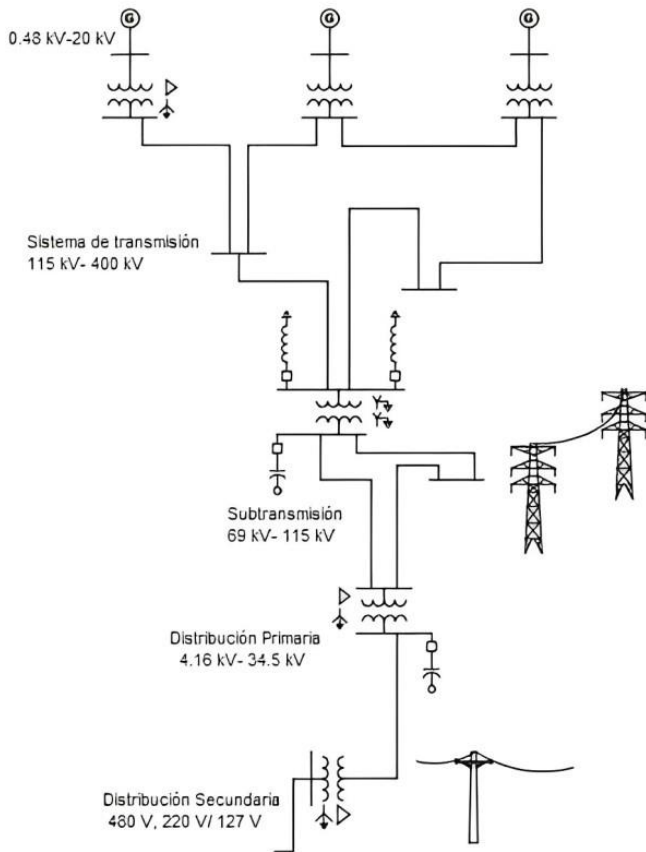
1. INTRODUCCIÓN

El análisis de flujo de potencia es una técnica utilizada en ingeniería eléctrica para evaluar el comportamiento de los sistemas de potencia. Esta herramienta proporciona información crucial acerca de las variables de potencia, que incluyen la potencia activa y la potencia reactiva. En un circuito de corriente alterna, la potencia activa se refiere a la cantidad de energía que se transforma en trabajo y se disipa en las líneas de transmisión, la potencia reactiva representa la energía que no se aprovecha en una instalación eléctrica y se requiere para generar el campo

magnético necesario en dispositivos inductivos como motores y transformadores, así como el campo eléctrico asociado a las capacitancias del sistema. Estos componentes de potencia interactúan conjuntamente en el análisis de flujo de potencia. Al llevar a cabo este análisis, se obtienen los fasores de voltaje en cada punto del sistema y las corrientes en cada conductor de este. Estos fasores representan la magnitud y fase de las variables eléctricas, permitiendo comprender y visualizar la distribución de voltajes en las barras de conexión y las corrientes en los conductores del sistema [1].

Figura 1.

Esquema de un sistema eléctrico de potencia



Nota: [1]

La dirección y el flujo de potencia en cada línea de un sistema eléctrico como se observa en la Figura 1. son aspectos de gran importancia, ya que es necesario determinar si la potencia se está generando o absorbiendo, así como conocer los valores de voltaje y corriente asociados [2]. Otro factor fundamental es la determinación de la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra del sistema, así como las potencias activas y reactivas que fluyen a través de cada línea. Estos aspectos se vuelven evidentes durante el análisis de flujo de potencia [3]. Por ello, esta investigación en el área de potencia es de vital importancia para la planeación y diseño de implementación de próximos sistemas de potencia, así como también la determinación para optimizar las operaciones de los sistemas ya existentes; según la literatura [4], menciona que con el crecimiento rápido de internet de la energía la penetración de los recursos energéticos está aumentando, proponer un método modificado que tiene en cuenta la corrección aritmética, la estructura en bucle semanal y los distintos tipos de GD. La principal información que se obtiene de los estudios de flujo es: 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].

En las empresas eléctricas, el flujo de potencia óptimo en corriente alterna (AC-OPF) es una herramienta crucial para determinar el funcionamiento óptimo de los diversos recursos. El problema AC-OPF generalmente se resuelve mediante una formulación de equilibrio de potencia que incluye ecuaciones de tensión y potencia [5].

En el modelo de corriente alterna de flujo de potencia, se utilizan ecuaciones algebraicas no lineales para representar la inyección de potencia activa y reactiva en cada nodo [6]. Sin embargo, en ciertos casos, se puede simplificar el problema asumiendo que las magnitudes de voltaje en las barras son constantes, lo que hace que los flujos de potencia reactiva sean insignificantes. Estos enfoques desempeñan un papel importante en el funcionamiento óptimo de los sistemas eléctricos de potencia, ya que ayudan a satisfacer las limitaciones operativas y determinar su rendimiento óptimo [7]. Gracias a sus numerosas ventajas, incluido el flujo de potencia bidireccional, el aislamiento galvánico, el bajo rizado de la corriente de salida y la conmutación suave interna, los convertidores trifásicos de doble puente activo (DAB3) son una topología muy utilizada en aplicaciones de carga [8]. baterías. Estas aplicaciones suelen utilizar tres transformadores monofásicos como enlace de CA para simplificar la fabricación y reducir costos. Para lograr una alta densidad de potencia, se puede utilizar la inductancia de fuga de estos transformadores en lugar de la inductancia de fuga externa. La suposición de uniformidad de estas inductancias, sin embargo, no siempre es precisa porque pueden cambiar significativamente durante la fabricación [9].

Utiliza una técnica de protección [10] basada en el aprendizaje automático (ML) para MGs de CA fundamentada en IIDGs utilizando características novedosas para detectar y clasificar fallas simétricas y asimétricas. Las simulaciones electromagnéticas de transitorios en DIGSILENT PowerFactory se utilizan para obtener 400 muestras de diferentes señales para variaciones en las condiciones de funcionamiento de una MG. Después de recuperar y preprocesar las señales, se utilizan diez métodos distintos de extracción de características para obtener 100 características. Esto incluye la nueva métrica de picos y el factor máximo. Uno de los estudios esenciales en la planificación y el funcionamiento de una microrred es el flujo de potencia (FP). Los métodos tradicionales de FP

no son aplicables a las microrredes en isla controladas por droop debido a la ausencia de un bus de holgura en el sistema. Las características de estado estacionario del sistema, como la frecuencia, las tensiones de bus, la potencia de salida de los generadores distribuidos (GD) y la demanda real de las cargas, se obtienen en función de las características de estatismo de los GD y de la dependencia de la frecuencia y la tensión de la carga. Por lo tanto [11] propone un método Newton Raphson mejorado (ENR) para la FP en las microrredes en isla controladas por droop. Los valores de tensión nodal en los sistemas eléctricos se pueden encontrar utilizando el problema de flujo de carga (PFC) en las redes de distribución eléctrica. Estos valores, junto con los parámetros del sistema, son útiles para identificar los índices operativos (técnicos, económicos y ambientales) y las restricciones que describen el comportamiento del sistema en un escenario de carga establecido. Debido a la naturaleza no lineal y no convexa de su modelo matemático, la solución de LFP requiere la implementación de métodos numéricos [12].

En la literatura se presenta un método iterativo para resolver las ecuaciones de flujo de potencia que comienzan con la creación de funciones no lineales para cada nodo. El método sugerido produce funciones N-1 no lineales que se resuelven iterativamente para lograr la convergencia en las tensiones de cada nodo del sistema de potencia. Como lo demuestra el análisis de convergencia, el método iterativo de dos pasos es de cuarto orden. En el primer paso de este trabajo se utiliza la fórmula original del método Newton-Raphson y el método de tipo Halley. Dichas ecuaciones nos permiten el cálculo de los valores teóricos a obtener [13].

2. MÉTODO

Este trabajo tiene como objetivo brindar al estudiante una comprensión más profunda de los casos reales que surgen en las líneas de transmisión, los cuales son llevados a escala en un laboratorio. Se busca estudiar los fenómenos que pueden ocurrir cuando hay un flujo de corriente en conductores de medio y largo alcance.

Un ejemplo claro de estos flujos de corriente se puede observar en la figura 1, que muestra el anillo interconectado del sistema de transmisión de 500kV en Ecuador. Este sistema es responsable de transportar energía limpia generada por centrales hidroeléctricas como Coca Codo Sinclair y Sopladora. Estas centrales están actualmente en funcionamiento y juegan un papel crucial al satisfacer la demanda del servicio de energía

eléctrica, brindando condiciones de calidad y confiabilidad superiores.

Figura 2.
Sistema de transmisión de 500KV



Nota:[14]

Para tener un mejor entendimiento del módulo, este está dividido en 4 etapas representadas en la figura 3.

Figura 3.
Hardware y software empleados.

SOFTWARE	MÓDULOS	FUENTE	MEDIDORES Y ENLACES
MATLAB	MÓDULO DE PRUEBAS CIRCUITOS ELÉCTRICOS	VARIADOR DE VOLTAJE ALTERNO DE 14 kVA	MEGA ARDUINO
SIMULINK			TRANSFORMADOR DE CORRIENTE
IDE ARDUINO	MÓDULO DE CARGA RESISTIVA DE 4kVA		MULTÍMETRO

Software: Matlab-Simulink.

En este software, fueron ingresadas las ecuaciones que forman parte de un SEP tales como:

Potencia compleja S .

$$S = P + jQ = VI^* \quad (1)$$

Potencia S conjugado complejo.

$$S_S = P_S + jQ_S = V_S I^* \quad (2)$$

Representación vectorial de la corriente I .

$$I = \frac{1}{jX} (V_S - V_R) \quad (3)$$

Representación de I conjugado.

$$I^* = \frac{1}{-jX} (V_S^* - V_R^*) \quad (4)$$

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

Potencia S_S conjugado complejo con sus términos.

$$S_S = \frac{V_S^*}{-jX} (V_S - V_R) \quad (5)$$

Del diagrama fasorial, se observa

$$\begin{aligned} V_R &= |V_R| < 0^\circ \\ V_R &= V_R^* \\ V_S &= |V_S| < \delta \end{aligned} \quad (6)$$

La ecuación 5 se convierte en:

$$S_S = \frac{|V_S|^2 - |V_R||V_S|e^{j\delta}}{-jX} \quad (7)$$

Potencia compleja S_S en su forma fasorial.

$$S_S = \frac{|V_S||V_R|}{x} \sin\delta + j \frac{1}{x} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos\delta) \quad (8)$$

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

Potencia Real.

$$P_S = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \sin\delta) W \quad (9)$$

Potencia reactiva.

$$Q_S = \frac{1}{x} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos\delta) VAR \quad (10)$$

De igual forma, en el extremo receptor se tiene:

Potencia S_R conjugado complejo en el Receptor.

$$\begin{aligned} S_R &= P_R + jQ_R \\ S_R &= V_R I^* \end{aligned} \quad (11)$$

Se aplica el procedimiento anterior y se obtiene:

Potencia Real en el Receptor.

$$P_R = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \sin\delta) W \quad (12)$$

Potencia Reactiva en el Receptor.

$$Q_R = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \cos\delta - |V_R|^2) VAR \quad (13)$$

Potencia Real Máxima en el Receptor.

$$\begin{aligned} P_{R(\max)} &= P_{S(\max)} \frac{|V_S||V_R|}{x} \\ Q_{prom} &= \frac{1}{2} (Q_S + Q_R) \end{aligned} \quad (14)$$

Potencia Reactiva Promedio.

$$Q_{prom} = \frac{1}{2x} (|V_S|^2 - |V_R|^2) VAR \quad (15)$$

Potencia Real en la línea.

$$P_{linea} = |I|^2 R W \quad (16)$$

De la ecuación 2, se tiene que:

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

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

Entonces,

Multiplicación entre I y I^*

$$II^* = |I|^2 \frac{P^2 + Q^2}{|V|^2} \quad (17)$$

En la ecuación 14, se reemplaza:

Potencia en la línea.

$$P_{linea} = \frac{(P^2 + Q^2)R}{|V|^2} W \quad (18)$$

Potencia aparente en el Segundo Conductor.

$$S_2 = V_2 I^* \quad (19)$$

Donde despejando I se obtiene:

Corriente en el sistema.

$$I = \frac{S_2}{V_2} \quad (20)$$

El Voltaje de alimentación V_1 se define como:

Voltaje de Alimentación.

$$V_1 = V_2 + Z_e I \quad (21)$$

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

Voltaje V_2 .

$$V_2 = V_1 + Z_e \frac{S_2}{V_2} \quad (22)$$

Voltaje V_2 Algorítmica.

$$V_2^{(k)} = V_1 - Z_e \frac{S_2}{(V_2^{(k-1)})} \quad (23)$$

A continuación, son presentados los bloques de Simulink que conforman la propuesta. Fig. 4, Fig.5 y Anexo Fig. 6.

Figura 4.

Esquema de modelos de línea corta y barra de carga.

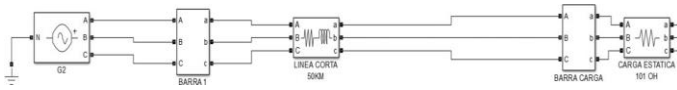
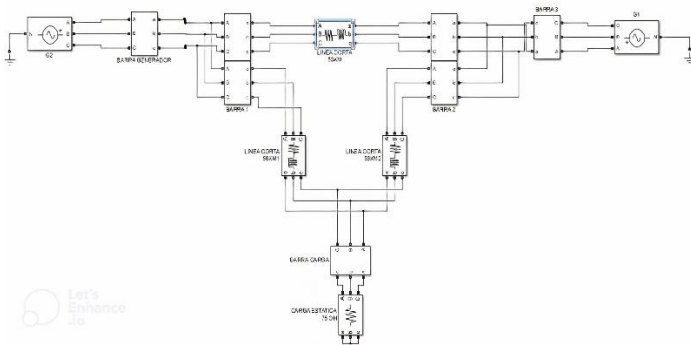


Figura 5.

Esquema de modelo de doble larga y doble líneas cortas



Construcción del módulo de pruebas

Antes de poder llevar a cabo la validación de las simulaciones obtenidas a partir de las programaciones previas, fue necesario realizar una etapa preliminar de captura de datos de voltaje y corriente. Para ello, se diseñó y construyó un módulo de pruebas específicamente diseñado para este propósito, el cual se describirá en detalle en esta sección.

En la figura 7, se presenta la vista frontal de este módulo de pruebas de circuitos eléctricos. Este dispositivo ha sido cuidadosamente diseñado para proporcionar una plataforma de pruebas confiable y precisa, que permita la medición precisa de las variables eléctricas relevantes para la validación de las simulaciones.

El módulo de pruebas cuenta con una variedad de elementos y componentes que garantizan una captura de datos precisa y confiable. Entre ellos, se destacan los puntos de conexión para los cables de medición de voltaje y corriente, así como los dispositivos de protección

adecuados, como fusibles y dispositivos de seguridad, para garantizar la integridad del sistema durante las pruebas.

Además, el módulo de pruebas ha sido diseñado de manera ergonómica y fácil de usar, con controles e indicadores claros que permiten al usuario monitorear y ajustar las condiciones de prueba según sea necesario. Esto garantiza una operación eficiente y una mayor precisión en la captura de datos. Anexo Fig. 7.

Las configuraciones de carga incorporadas en el módulo tienen la capacidad de simular, a una escala controlada, los efectos de las pérdidas de voltaje que se manifiestan en las líneas de transmisión. Esto se logra mediante la representación de estos fenómenos en forma de circuitos que incorporan elementos resistivos, capacitivos e inductivos, también conocidos como circuitos RLC. Estas configuraciones permiten la extracción de las variables esenciales que caracterizan un sistema eléctrico, tal como se detalla en la tabla 1.

La inclusión de componentes resistivos, capacitivos e inductivos en el módulo como se observa en la Figura 7. Permite una representación más precisa de los fenómenos de pérdida de voltaje en líneas de transmisión. Los elementos resistivos simulan las pérdidas de energía en forma de calor, los capacitivos simulan las reacciones ante cambios de carga y los inductivos simulan la propiedad de almacenamiento magnético de las líneas.

La simulación y escalada proporciona una comprensión práctica y cuantificable de cómo estos componentes afectan las pérdidas de voltaje. Los resultados obtenidos, que se muestran en la Tabla 2. Permiten evaluar cómo cada componente influye en la calidad y eficiencia de la transmisión eléctrica, así como cómo se manifiestan las propiedades eléctricas fundamentales, como la resistencia, la reactancia y la impedancia.

Tabla 1.

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	$F * P = P \cos \phi$	Adimensional
Tiempo	T	Segundos

Medidores

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. Para esta acción fue empleada la tarjeta electrónica Mega Arduino en conjunto con el sensor ACS712 capaz de soportar valores de 5 a 30A. Anexo Fig. 8.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba a la cual fue sometido el módulo fue el análisis del flujo de corriente en un circuito en serie de una resistencia y un inductor con cara resistiva.

La prueba consiste en conectar una resistencia de 750 ohmios y un inductor de 0.4 uf con una carga resistiva de 400V trifásicos. Posterior al conexionado se mide los parámetros eléctricos usando software Arduino y el multímetro.

Durante esta práctica, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los voltajes y corrientes en múltiples puntos del diagrama, cuya representación es presentada en la Figura 9.

Al conectarlo con componentes reales, como un motor trifásico y un banco de resistencias, este módulo se ha sometido a condiciones prácticas. El flujo de corriente en un sistema con doble alimentación es el objetivo principal de estas pruebas. La medición y el análisis de voltajes y corrientes en áreas específicas del sistema son particularmente importantes.

Tabla 2.
Valores teóricos y medidos en el tablero

	BARRA 1/2		BARRA 2/3		BARRA 1/3		CARGA		FUENTE	
	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO
RESISTENCIA (Ω)	300	292	750	747	750	749	750	121	---	---
INDUCTOR (mH)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	---	---
CORRIENTE DE FASE (mA)	0	0,04	140.09	118,6	140.09	115,5	-	231,5	---	---
VOLTAJE DE FASE (V)	0	0	107.1	105.04	107,1	105.04	28.29	28.503	231	231

4. CONCLUSIONES

La implementación del módulo de pruebas de circuitos eléctricos (Figura 1.), brinda a los estudiantes una oportunidad valiosa para aplicar de manera práctica la teoría que han aprendido en las aulas. Lo que fomenta una comprensión más profunda y una conexión clara entre la teoría y su aplicación práctica.

Esto proporciona datos cruciales que se muestran en la Tabla 2. Para la optimización del rendimiento del sistema y la detección de problemas potenciales. Anexo Fig. 9.

Mediante los cálculos teóricos se obtienen los resultados de potencias activas y reactivas entregadas por los generadores y el equivalente de la carga una vez que atraviesa una distancia que es colocada como el banco de inductancias obtenemos lo mostrado en la figura 10: Anexo Fig. 10.

En la figura 11, 12 ,13, 14, se proporciona una representación gráfica que muestra la recopilación de datos variando el tiempo de muestreo, los cuales son luego contrastados con los valores teóricos calculados mediante métodos matemáticos. Anexo Fig. 11, 12, 13, 14.

La Tabla 2 contiene todos los valores que se obtuvieron a lo largo de este proceso, para una visión general. El margen de error entre cada medición es de aproximadamente el 2% en términos de precisión.

La precisión de estos resultados, donde se ha evaluado el error de cada medición, es un aspecto importante. Los resultados de la figura 15, muestran El margen de error en color rojo, lo que demuestra un nivel razonable de concordancia entre las mediciones prácticas y los valores teóricos. Varios factores de calibración y fuentes de ruido pueden ser responsables de esta pequeña diferencia, que es común en mediciones reales. Anexo Fig.15.

La prueba usada se basa en conectar una resistencia de 750 ohmios y un inductor de 0.4 uf con una carga resistiva de 400V trifásicos. Los resultados se visualizan desde la figura 11 a la 18.

El micromódulo de adquisición de datos permite la captura de datos a una escala de 1ms.

El error obtenido entre el valor teórico y el valor medido de la resistencia y la inductancia de las barras y carga no supera el 2%.

El cálculo de los valores teóricos se realizó utilizando ecuaciones propuestas por otros investigadores, lo que permitió el análisis con los valores prácticos obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] Cuevas Bravo David, "CALIDAD DE LA ENERGIA: Disturbios Eléctricos." 2011, Ciudad Universitaria, 2011. doi: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000679406>.
- [2] A. N. Khan *et al.*, "Ensuring reliable operation of electricity grid by placement of facts devices for developing countries," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 8, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/en14082283.
- [3] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1116–1124, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.05.276.
- [4] "Potential Evaluation of Distributed Energy Resources with Affine Arithmetic," *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019*, no. May 2019, pp. 4334–4339, 2019, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881198.
- [5] A. S. Nair, S. Abhyankar, S. Peles, and P. Ranganathan, "Computational and numerical analysis of AC optimal power flow formulations on large-scale power grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 202, no. June 2021, p. 107594, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107594.
- [6] Y. Tu *et al.*, "Optimal Configuration of Battery Energy Storage for AC/DC Hybrid System Based on Improved Power Flow Exceeding Risk Index," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 14, p. 3169, 2023, doi: 10.3390/electronics12143169.
- [7] A. G. Migisha, J. M. Ntayi, F. Buyinza, L. Senyonga, J. Abaliwano, and M. S. Adaramola, "Review of Concepts and Determinants of Grid Electricity Reliability," 2023, doi: 10.33.90.
- [8] Y. Lin, J. Hu, T. Wang, and Z. Wang, "Impact Mechanisms of Commutation Failure Caused by a Sending-End AC Fault and Its Recovery Speed on Transient Stability," *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, 2023, doi: 10.3390/electronics12163439.
- [9] F. Quinteros, D. Carrión, and M. Jaramillo, "Optimal Power Systems Restoration Based on Energy Quality and Stability Criteria," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062062.
- [10] M. Uzair, M. Eskandari, L. Li, and J. Zhu, "Machine Learning Based Protection Scheme for Low Voltage AC Microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3390/en15249397.
- [11] M. Bayat, M. M. Koushki, A. A. Ghadimi, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "Comprehensive enhanced Newton Raphson approach for power flow analysis in droop-controlled islanded AC microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 143, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108493.
- [12] L. F. Grisales-Noreña, J. C. Morales-Duran, S. Velez-Garcia, O. D. Montoya, and W. Gil-González, "Power flow methods used in AC distribution networks: An analysis of convergence and processing times in radial and meshed grid configurations," *Results in Engineering*, vol. 17, no. January, p. 100915, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100915.
- [13] 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," *Informacion Tecnologica*, vol. 28, no. 1, pp. 189–198, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100019.
- [14] CELEC EP, "Sistema de transmisión a 500 kV." [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/transelectric/sistema-de-transmision-a-500-kv/>

Anexos

Figura 6.
Esquema de práctica en Simulink

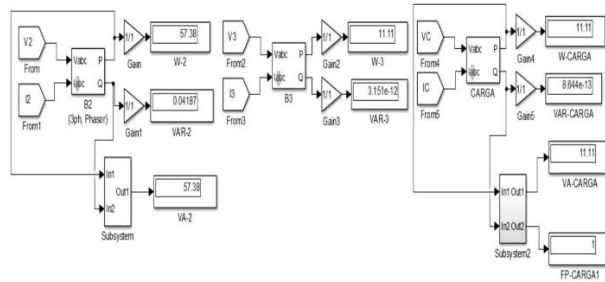


Figura 1.
Vista frontal del módulo de pruebas de circuitos eléctricos

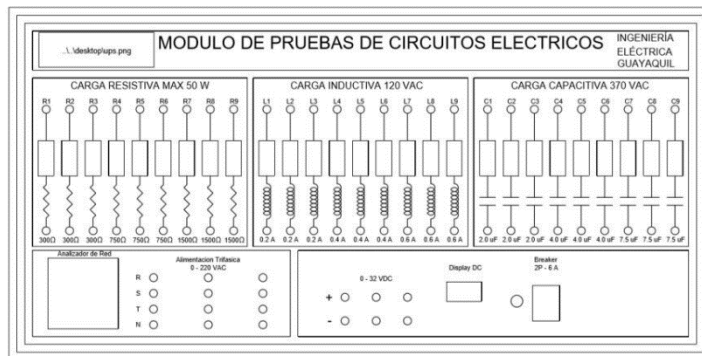


Figura 8.
Circuito para adquisición de datos de voltaje y corriente.

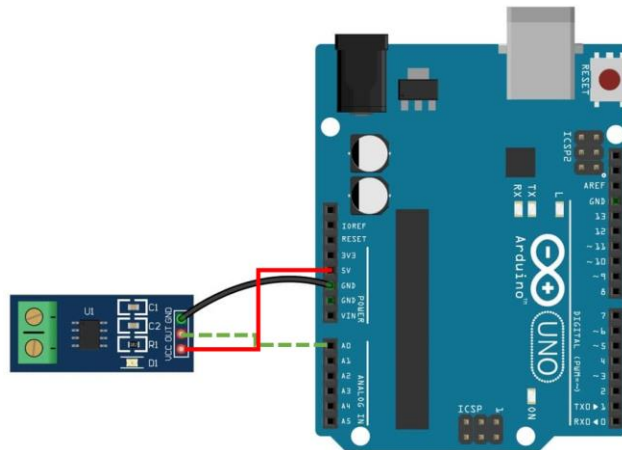


Figura 9.
Conexión de carga de flujo con 2 generadores.

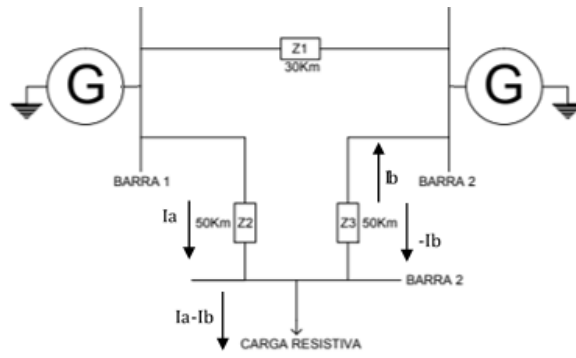


Figura 10.
Potencias activas y reactivas entregadas por los generadores.

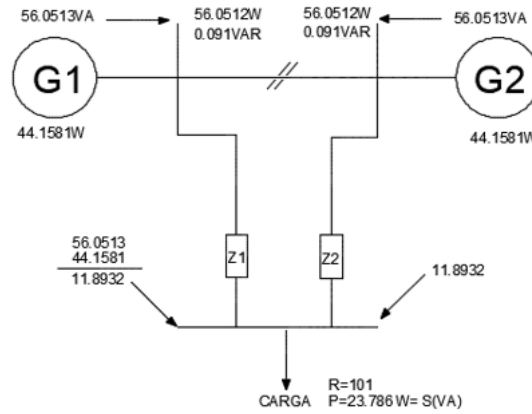


Figura 11.
Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 1 seg.

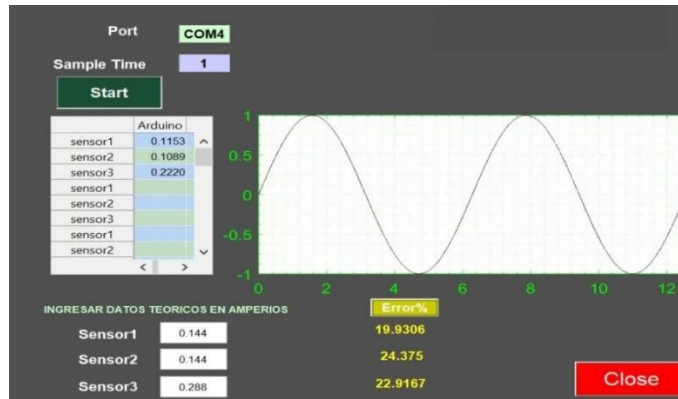


Figura 12.
Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 2 seg.

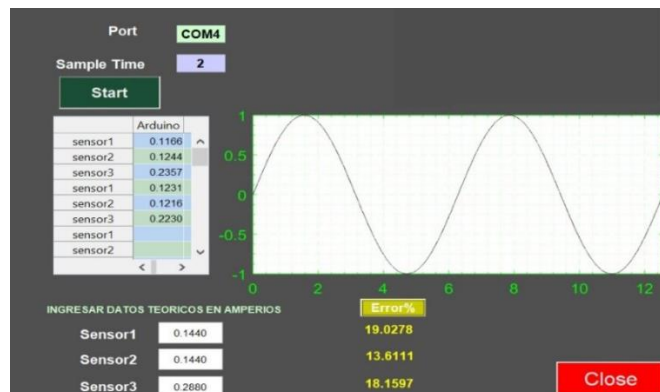


Figura 13.

Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 4 seg.

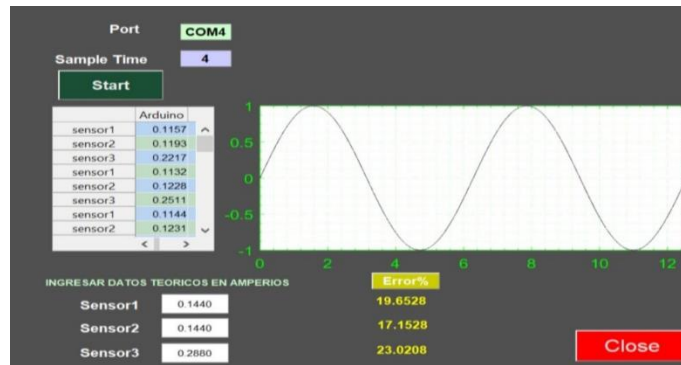


Figura 14. Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 1 seg.

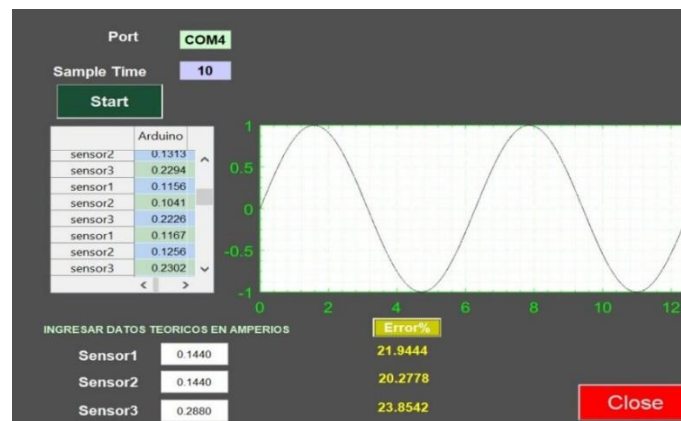


Figura 15.

Valor teórico, valor medido, error.

