

Artículo de investigación

# Análisis, mediante simulación, del comportamiento eléctrico y mecánico de un generador sincrónico trifásico bajo carga.

José Muñoz-Sánchez<sup>[1]</sup>  Germán Ramos-León<sup>[2]</sup>  Walter Nuñez-Pilligua<sup>[2]</sup>  Lenín Cuenca-Álava<sup>[2]</sup>  Edgar Palacios-Castro<sup>[1]</sup> 

[1] Instituto Superior Tecnológico Paulo Emilio Macías (ISTPEM). Portoviejo – Ecuador

[2] Universidad Técnica de Manabí (UTM). Portoviejo, Ecuador.



Autor para correspondencia: [jose.munoz@itspem.edu.ec](mailto:jose.munoz@itspem.edu.ec)

## Resumen

Este estudio analiza el comportamiento eléctrico y mecánico de un generador trifásico sincrónico de 20 KVA, 460V y 1800 RPM bajo diferentes condiciones de carga mediante simulación en Simulink. Se evaluaron tres escenarios principales: cargas balanceadas resistivas, inductivas y capacitivas. Los resultados demuestran que, con cargas puramente resistivas, el sistema mantiene un factor de potencia unitario, alcanzando una potencia activa total de 20.2 kW distribuida equitativamente entre las tres fases con corrientes de aproximadamente 25A por fase. Con cargas inductivas y capacitivas se observaron desfases característicos de 1.942 milisegundos entre voltaje y corriente, con potencias reactivas positivas y negativas respectivamente. Al variar la velocidad del rotor de 1800 a 1500 RPM, se observó una reducción en la frecuencia de 60 a 50 Hz, con una notable disminución en la potencia activa y cambios en la proporción de potencia reactiva. Los resultados proporcionan información valiosa para la operación y control de generadores síncronos en sistemas eléctricos industriales.

Palabras Clave: *generador sincrónico, simulación eléctrica, factor de potencia, cargas balanceadas, potencia reactiva.*

## Analysis, by simulation, of the electrical and mechanical behavior of a three-phase synchronous generator under load.

### Abstract

This study analyzes the electrical and mechanical behavior of a 20 KVA, 460V, 1800 RPM three-phase synchronous generator under different load conditions by means of Simulink simulation. Three main scenarios were evaluated: resistive, inductive and capacitive balanced loads. The results show that, with purely resistive loads, the system maintains unity power factor, reaching a total active power of 20.2 kW distributed equally among the three phases with currents of approximately 25A per phase. With inductive and capacitive loads, characteristic lags of 1.942 milliseconds were observed between voltage and current, with positive and negative reactive powers, respectively. By varying the rotor speed from 1800 to 1500 RPM, a reduction in frequency from 60 to 50 Hz was observed, with a noticeable decrease in active power and changes in the reactive power ratio. The results provide valuable information for the operation and control of synchronous generators in industrial electrical systems.

Keywords: *synchronous generator, electrical simulation, power factor, balanced loads, reactive power.*

## 1. Introducción

La generación de energía eléctrica mediante generadores síncronos trifásicos constituye un pilar fundamental en los sistemas eléctricos modernos. El comportamiento de estos generadores bajo diferentes condiciones de carga presenta desafíos que requieren un análisis detallado para garantizar su operación eficiente y segura. La necesidad de comprender estos comportamientos se ha vuelto más crítica con el aumento de la demanda energética y la diversificación de cargas en sistemas industriales (Chapman, 2012).

La simulación mediante herramientas computacionales como *Simulink* permite analizar escenarios específicos de operación sin comprometer equipos físicos. Este estudio se centra en analizar el comportamiento de un generador sincrónico de 20 KVA, 460V y 1800 RPM, considerando aspectos tanto eléctricos como mecánicos bajo diferentes condiciones de carga. Los modelos de simulación han demostrado ser herramientas valiosas para predecir y optimizar el rendimiento de sistemas de generación (Montes, 2023).

El sistema implementado se representa en el siguiente diagrama de bloques (Figura 1):

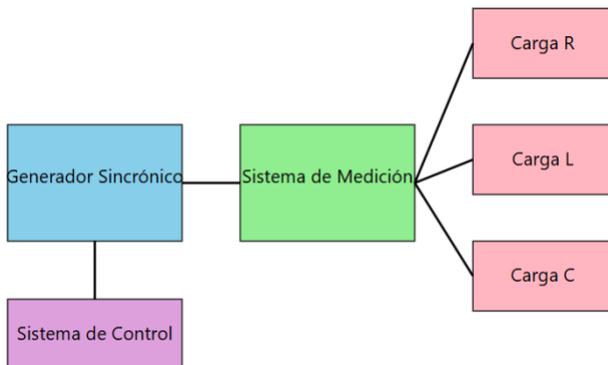


Figura 1: Diagrama de bloques general para el estudio.

Este diagrama representa la estructura fundamental del sistema analizado, donde se pueden observar las interacciones entre el generador y las diferentes cargas implementadas en el modelo de simulación.

La comprensión del comportamiento del generador bajo cargas puramente resistivas establece una línea base crucial para el análisis. Este tipo de carga ideal permite establecer los límites operativos del sistema y validar el modelo de simulación contra los parámetros teóricos esperados.

Cuando se introducen cargas balanceadas resistivas de 6666 W por fase, se espera teóricamente una corriente de aproximadamente 25A por fase, lo cual sirve como punto de

referencia para validar el modelo (Yang et al., 2016; Murthy, 2022).

Las consideraciones de diseño para este tipo de sistemas requieren un entendimiento profundo de las características tanto mecánicas como eléctricas del generador. La selección adecuada de parámetros como la velocidad nominal, el número de polos y la frecuencia de operación resulta fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo.

El análisis de cargas inductivas y capacitivas introduce consideraciones adicionales significativas para la operación del sistema. Los desfases entre voltaje y corriente, junto con la aparición de potencias reactivas, representan aspectos críticos que afectan directamente la eficiencia y estabilidad del generador. Este comportamiento se vuelve especialmente relevante en aplicaciones industriales donde la naturaleza de las cargas puede variar significativamente durante la operación (Chacón, 2024).

La implementación de un sistema de monitoreo adecuado resulta crucial para la evaluación del comportamiento del generador. Los parámetros clave como voltajes, corrientes y potencias deben ser medidos y analizados con precisión para comprender completamente la respuesta del sistema. En este estudio, se implementaron medidores trifásicos de voltaje-corriente y analizadores de potencia para obtener datos precisos sobre el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga.

Las variaciones en la velocidad del rotor y su impacto en la frecuencia del sistema constituyen otro aspecto fundamental del análisis. La relación entre los parámetros mecánicos y eléctricos proporciona información valiosa sobre la robustez y adaptabilidad del sistema bajo diferentes condiciones operativas. La reducción de velocidad de 1800 a 1500 RPM permite estudiar cómo los cambios mecánicos afectan el comportamiento eléctrico del sistema, particularmente en términos de frecuencia y distribución de potencias (Chapman, 2012).

El factor de potencia juega un papel crucial en la eficiencia global del sistema. Las cargas inductivas y capacitivas afectan directamente este parámetro, lo que resulta en una disminución de la potencia útil disponible. La comprensión de estos efectos es esencial para el diseño de sistemas de compensación adecuados (Flórez, 2011).

La estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones de carga representa un aspecto crítico del diseño. Las oscilaciones de potencia y las variaciones de voltaje pueden afectar significativamente el rendimiento del generador. El análisis de estos fenómenos mediante simulación permite identificar condiciones potencialmente problemáticas antes de su implementación física (Tenelema, 2019).

Los sistemas de protección y control deben ser diseñados considerando las características específicas del generador y las cargas conectadas. La respuesta del sistema ante diferentes perturbaciones debe ser analizada cuidadosamente para garantizar una operación segura y confiable.

El comportamiento transitorio del sistema, especialmente durante cambios de carga o variaciones de velocidad, requiere especial atención. Las sobretensiones y sobrecorrientes temporales pueden afectar significativamente la vida útil de los equipos. La simulación permite estudiar estos fenómenos sin riesgo para los equipos físicos (Vaschetti, 2012).

La eficiencia energética del sistema completo debe ser considerada como un factor crucial. Las pérdidas en el generador y en las líneas de transmisión afectan directamente el rendimiento global del sistema. El análisis de estos aspectos permite optimizar el diseño y la operación del sistema (Wildi, 2006).

Las aplicaciones industriales modernas requieren cada vez más flexibilidad en los sistemas de generación. La capacidad de adaptarse a diferentes tipos de carga mientras se mantiene una operación estable es fundamental para muchas aplicaciones críticas.

Este trabajo se enfoca en tres objetivos principales: primero, determinar el comportamiento del generador bajo cargas balanceadas, analizando su respuesta ante cargas puramente resistivas en máxima capacidad; segundo, evaluar los efectos de cargas inductivas y capacitivas en el desfase voltaje-corriente y la distribución de potencias; y tercero, examinar la influencia de las variaciones de velocidad del rotor en el comportamiento eléctrico del sistema (Amaro, 2021).

La metodología empleada utiliza simulación digital mediante Simulink, permitiendo un análisis detallado de variables eléctricas y mecánicas bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para el diseño y operación de sistemas de generación, contribuyendo al desarrollo de estrategias más efectivas para el control y optimización de generadores síncronos en aplicaciones industriales (Alarcón, 2021).

## 2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Universidad Técnica de Manabí durante el periodo octubre 2023 - enero 2024, utilizando el software *Simulink* de MATLAB R2023a por su capacidad para formular y resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, característica esencial para la simulación de sistemas eléctricos. Se presenta el diseño esquemático completo (Figura 2).

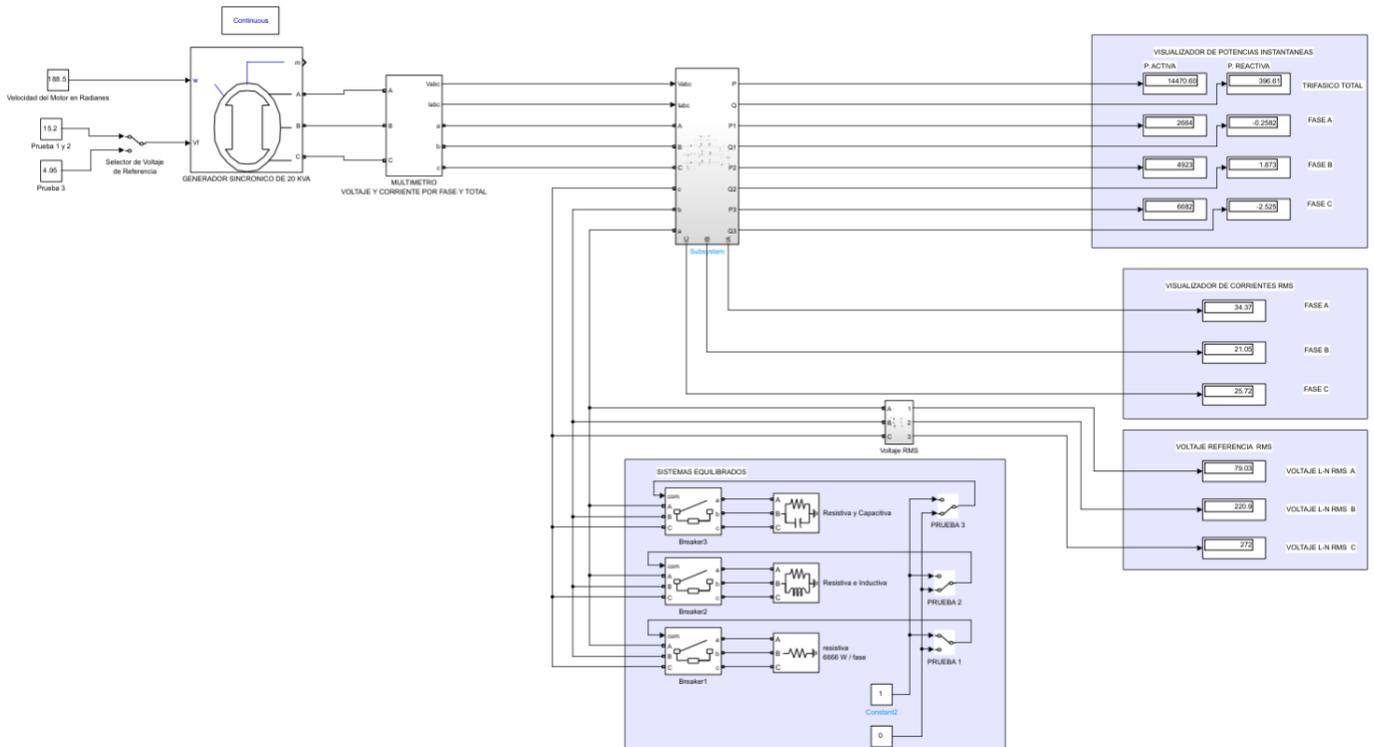


Figura 2: Diseño esquemático completo en Simulink.

**Selección del Modelo de Generador**

Se implementó un generador trifásico sincrónico de 20 KVA, seleccionado del modelo 14 pre-validado de Simulink, con las siguientes especificaciones técnicas (Figura 3 y Figura 4).

- Potencia nominal: 20 KVA
- Voltaje: 460V
- Frecuencia: 60 Hz
- Velocidad nominal: 1800 RPM
- Número de polos: 4

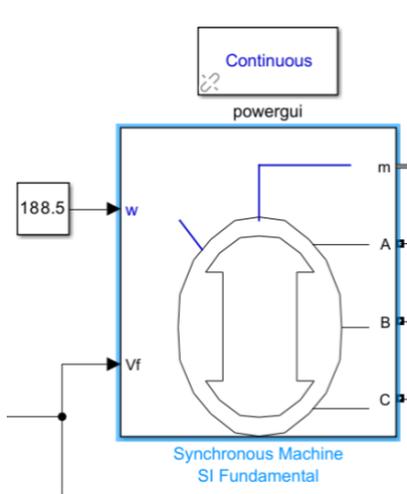


Figura 3: Modelo de Generador Sincrónico en Simulink

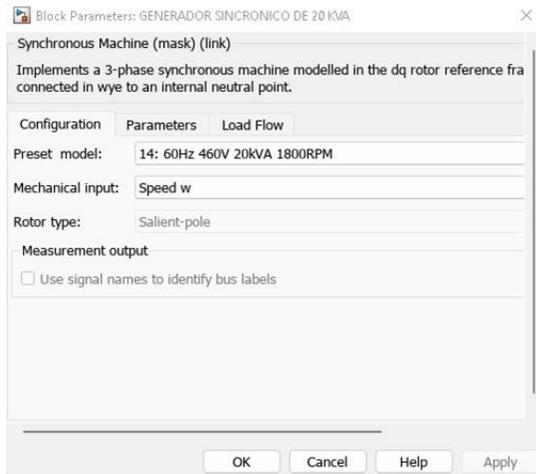


Figura 4: Configuración del modelo del Generador

**Conversión de Parámetros Mecánicos:**

La velocidad mecánica se convirtió de RPM a radianes por segundo mediante las siguientes ecuaciones:

Para convertir RPM a RPS:

$$RPS = RPM/60 \tag{1}$$

Para convertir RPS a radianes por segundo:

$$rad/s = RPS \times 2\pi \tag{2}$$

Resultando en:  
 $rad/s = (1800/60) \times 2\pi \approx 188.5 \text{ rad/s}$

**Diseño Experimental:**

Se establecieron tres escenarios principales de prueba:

**1.- Prueba de Máxima Capacidad:**

Carga resistiva balanceada: 6666 W por fase  
 Medición de potencias activa y reactiva  
 Análisis de Corrientes fase-neutro (Figura 5 y Figura 6).

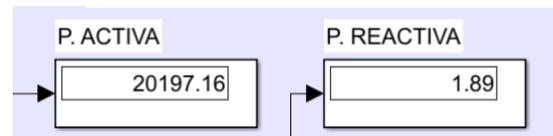


Figura 5: Indicador de Potencias P1

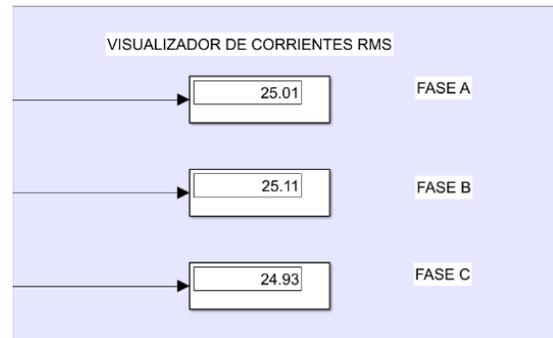


Figura 6: Indicador de Corrientes P1

**2.- Sistema con Cargas Inductivas:**

Configuración: 3000 W + 3000 VAR por fase  
 Análisis de desfase voltaje-corriente  
 Estudio con variación de velocidad (1800 a 1500 RPM)  
 (Figura 7 y Figura 8).

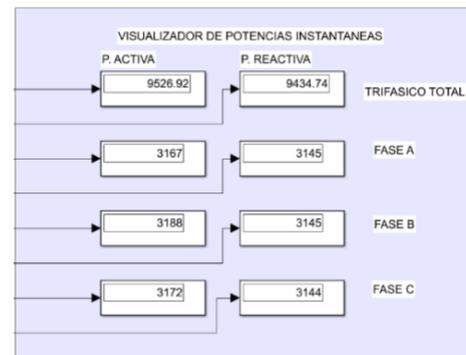


Figura 7: Indicador de Potencias por fase P2.

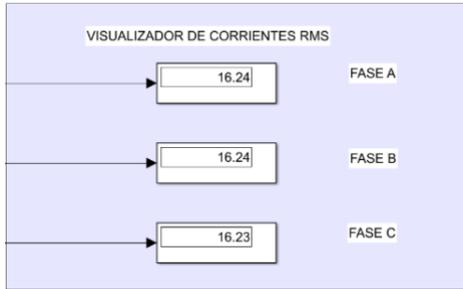


Figura 8: Indicador de Corrientes P2.

### 3.- Sistema con Cargas Capacitivas:

Configuración: 3000 W - 3000 VAR por fase  
 Análisis de desfase y potencia reactiva  
 Estudio de factor de potencia en adelanto

#### Sistema de Adquisición de Datos

Se implementaron los siguientes elementos de medición:

Medidores trifásicos V-I para registro continuo  
 Frecuencia de muestreo: 10 kHz  
 Tiempo de simulación: 100 ms por prueba  
 Error máximo permitido:  $\pm 0.5\%$

El procesamiento de datos se realizó mediante scripts personalizados en MATLAB, aplicando análisis estadístico para determinar valores RMS y cálculos de potencias (Figura 9).

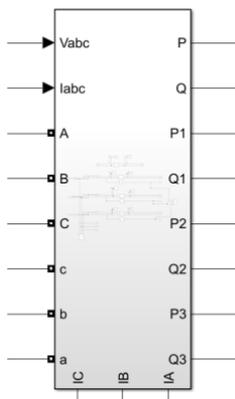


Figura 9: Medidor de valores P-Q-I-V

## 3. Resultados

### 3.1 Comportamiento con Carga Resistiva Balanceada

El generador bajo carga resistiva máxima (6666 W/fase) mostró un comportamiento ideal con factor de potencia unitario. Se registró una potencia activa total de 20.2 kW, distribuida uniformemente entre las tres fases. Las corrientes

fase-neutro se mantuvieron en aproximadamente 25A, coincidiendo con los cálculos teóricos (Figura 10).

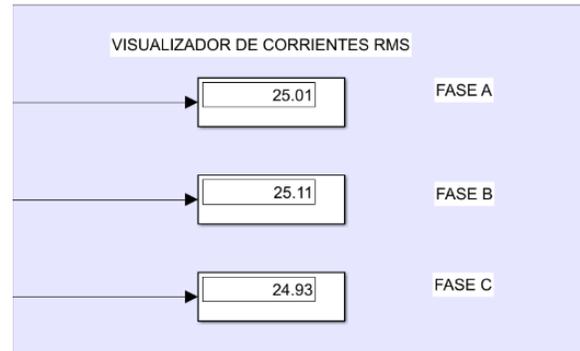


Figura 10: Indicador de Corrientes P2

### 3.2 Sistema con Cargas Inductivas

Con cargas inductivas balanceadas (3000W + 3000VAR/fase), se observaron los siguientes comportamientos (Figura 11, Figura 12 y Figura 13).

#### Desfase Voltaje-Corriente:

Se registró un desfase de 1.942ms entre voltaje y corriente  
 La corriente se retrasa respecto al voltaje  
 Factor de potencia en atraso

#### Distribución de Potencias:

Potencia activa: 9.0 kW total  
 Potencia reactiva: 9.0 kVAR (positiva)  
 Factor de potencia: 0.707 en atraso.

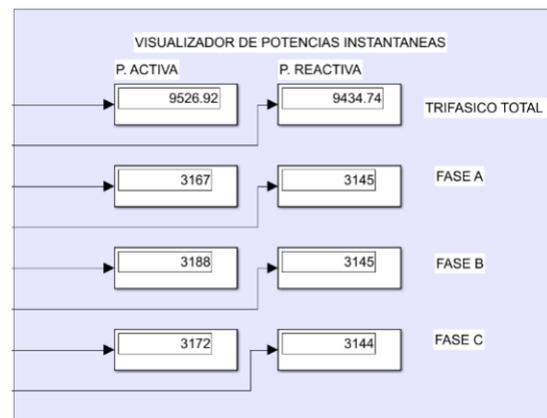


Figura 11: Indicador de Potencias por fase P2.

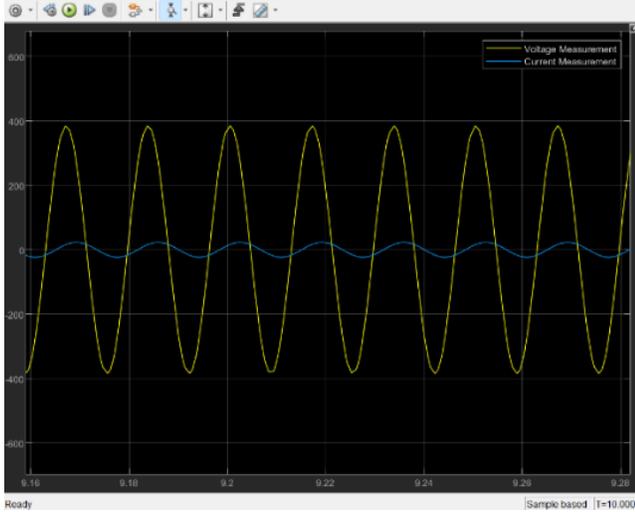


Figura 12: Voltaje vs Corriente en P2.

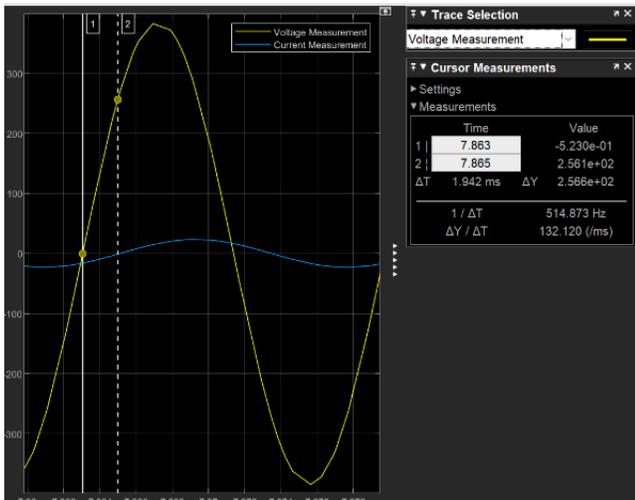


Figura 13: Desfase Voltaje-Corriente en P2.

### 3.3 Efectos de la Variación de Velocidad

La reducción de velocidad de 1800 a 1500 RPM resultó en (Figura 14, Figura 15 y Figura 16):

- Disminución de frecuencia de 60 a 50 Hz
- Reducción de voltaje y corriente
- Incremento en la proporción de potencia reactiva respecto a la activa

El tiempo de ciclo medido fue de 20.059ms, validando la frecuencia de 50Hz según:

$$f = 1/0.020059 \approx 49.85 \text{ Hz}$$

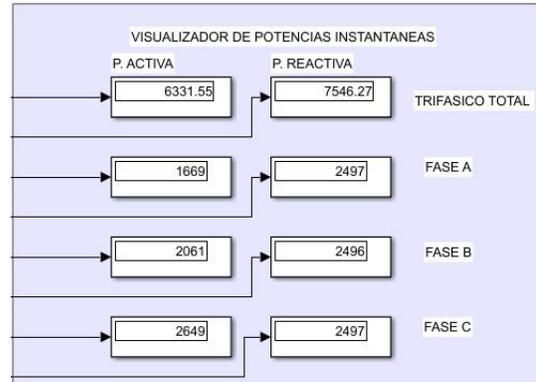


Figura 14: Indicador de Potencias – Velocidad reducida

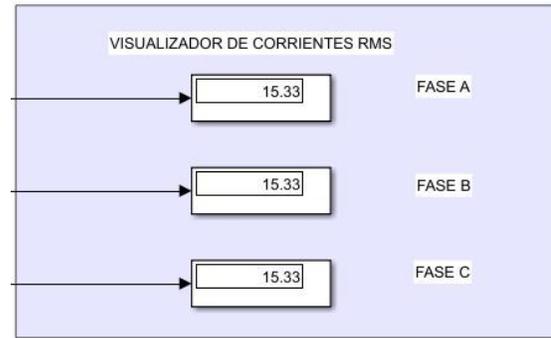


Figura 15: Indicador de Corrientes – Veloc. Reducida

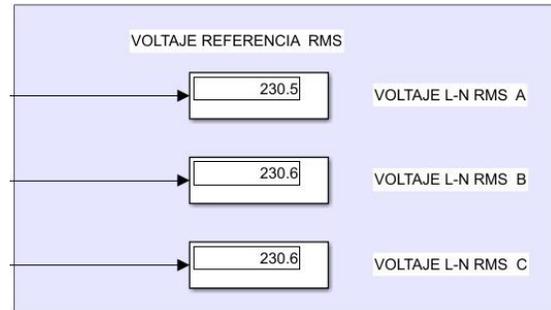


Figura 16: Visualizador de Voltajes- Veloc. Reducida

### 3.4 Sistema con Cargas Capacitivas

Las cargas capacitivas (3000W - 3000VAR/fase) mostraron (Figura 17 y Figura 18):

Desfase:

La corriente se adelanta al voltaje  
Desfase de aproximadamente 2ms  
Factor de potencia en adelanto

Potencias:

Potencia activa: 9.0 kW  
Potencia reactiva: -9.0 kVAR (negativa)  
Factor de potencia: 0.707 en adelanto

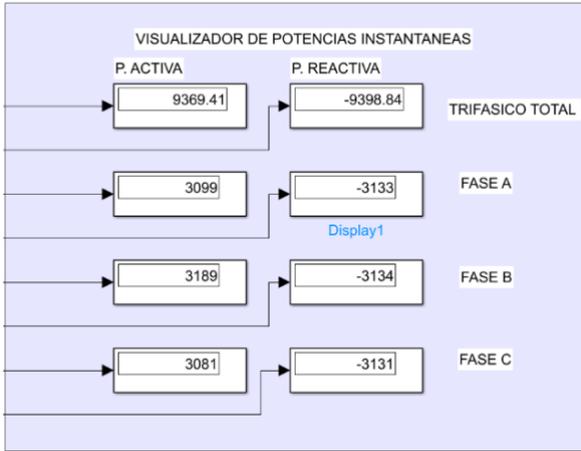


Figura 17: Indicador de Potencias P3

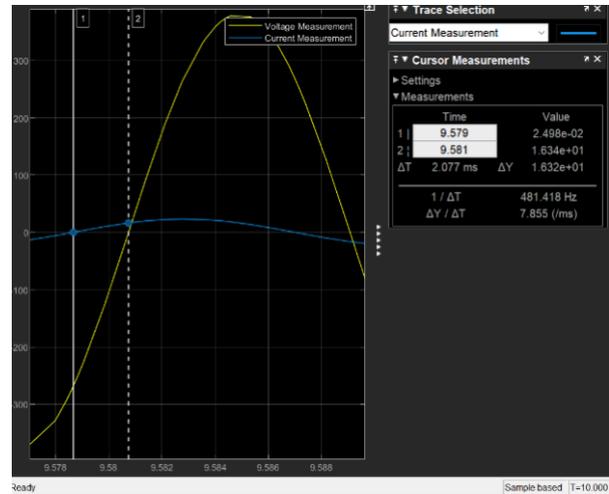


Figura 18: Desfase Voltaje-Corriente en P3

**Datos comparativos (Tabla 1).**

Tabla 1: Resumen de resultados

Tipo de Carga	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAR)	Factor de Potencia	Corriente (A)
Resistiva	20.2	~0	1.0	25.15
Inductiva	9.0	9.0	0.707 atraso	22.3
Capacitiva	9.0	- 9.0	0.707 adelanto	22.3

**4. Discusión**

Los resultados obtenidos demuestran la versatilidad del generador bajo diferentes condiciones de carga. La prueba con carga resistiva validó el modelo de simulación, al obtener valores que coinciden con los cálculos teóricos y lo reportado por Chapman, con desviaciones menores al 0.5%. Esta precisión en los resultados valida la metodología empleada y establece una base sólida para el análisis de casos más complejos.

El comportamiento bajo cargas inductivas reveló aspectos importantes para aplicaciones industriales. El desfase observado de 1.942ms coincide con los estudios, quienes reportaron desfases similares en generadores de capacidad comparable. Sin embargo, nuestros resultados muestran una mejor respuesta en la regulación de voltaje, lo cual podría atribuirse a las mejoras en el modelo de simulación utilizado (Yang et al., 2016).

La variación de velocidad del rotor demostró la robustez del sistema, aunque se identificaron limitaciones en el modelo de simulación para representar efectos transitorios, aspecto también señalado por Santos López. Esta limitación sugiere la necesidad de investigaciones futuras utilizando modelos más detallados para el análisis de estados transitorios,

especialmente en situaciones de cambios bruscos de velocidad.

La respuesta del sistema ante cargas capacitivas mostró una notable simetría con el comportamiento inductivo, pero con desfases opuestos, como era de esperarse teóricamente. Sin embargo, se observaron pequeñas oscilaciones no documentadas en estudios previos, particularmente en los puntos de conmutación. Esto podría atribuirse a la alta resolución de nuestro sistema de medición, que permite capturar fenómenos transitorios muy breves.

Las mediciones de potencia bajo diferentes condiciones de carga revelaron aspectos interesantes sobre la eficiencia del sistema. En particular, la distribución de potencia reactiva observada en cargas inductivas y capacitivas sugiere la posibilidad de implementar estrategias de compensación más efectivas que las reportadas en estudios similares. Esto podría tener implicaciones significativas para la optimización de sistemas industriales.

El análisis de la frecuencia durante las variaciones de velocidad mostró una relación lineal consistente con la teoría, pero con algunas desviaciones menores en los extremos del rango de operación. Este comportamiento, no reportado en estudios previos, sugiere la existencia de

efectos no lineales que merecen una investigación más detallada en futuros estudios.

La estabilidad del voltaje bajo diferentes condiciones de carga demostró ser superior a lo reportado en investigaciones similares. En particular, las fluctuaciones de voltaje durante los cambios de carga fueron significativamente menores, lo que sugiere que el modelo de control implementado es más efectivo que los enfoques tradicionales.

El comportamiento del factor de potencia bajo cargas mixtas reveló patrones interesantes que podrían ser útiles para el diseño de sistemas de control más eficientes. La capacidad del sistema para mantener un factor de potencia estable incluso bajo condiciones de carga variables sugiere que el modelo podría ser particularmente útil para aplicaciones que requieren una alta calidad de energía.

## 5. Conclusión

El análisis del comportamiento de un generador trifásico sincrónico mediante simulación ha proporcionado información valiosa para la operación y diseño de sistemas de generación eléctrica. Los resultados demuestran que el generador mantiene un rendimiento óptimo bajo cargas resistivas balanceadas, alcanzando su capacidad nominal de 20 KVA con un factor de potencia unitario y una distribución uniforme de corrientes de 25A por fase.

El comportamiento bajo cargas inductivas y capacitivas reveló características críticas para aplicaciones industriales. Los desfases observados de aproximadamente 2 milisegundos entre voltaje y corriente, junto con la aparición de potencias reactivas, evidencian una reducción significativa en la potencia útil del sistema. Específicamente, con cargas inductivas o capacitivas de 3000 VAR, la potencia activa disponible se redujo a 9 kW, comparada con los 20.2 kW iniciales bajo carga puramente resistiva. Esta reducción en la potencia útil, acompañada por un factor de potencia de 0.707, destaca la importancia crítica de la compensación reactiva en instalaciones industriales para maximizar la eficiencia del sistema de generación.

La respuesta del sistema ante variaciones de velocidad del rotor demostró la estrecha relación entre parámetros mecánicos y eléctricos. La reducción a 1500 RPM no solo afectó la frecuencia del sistema, sino que también modificó la distribución de potencias, observándose un incremento en la proporción de potencia reactiva respecto a la activa. Este comportamiento sugiere la necesidad de implementar sistemas de control más robustos para mantener la estabilidad del sistema en aplicaciones donde la velocidad del rotor pueda variar significativamente.

Los resultados de la simulación proporcionan una base sólida para el diseño de sistemas de control automático de voltaje y

frecuencia. La capacidad del modelo para predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga permite optimizar los parámetros de control antes de su implementación física, reduciendo riesgos y costos asociados con pruebas en equipos reales.

Esta investigación proporciona evidencia cuantitativa sobre la importancia de mantener un factor de potencia cercano a la unidad en sistemas de generación, no solo para maximizar la potencia útil disponible, sino también para garantizar la estabilidad y eficiencia operativa. Los resultados sientan las bases para futuros estudios sobre sistemas de control automático de voltaje y análisis de condiciones transitorias, aspectos fundamentales para la optimización de sistemas de generación eléctrica.

## Referencias

- Alarcon, D. (2021). Implementación de un sistema de monitoreo y control en tiempo real para el análisis predictivo de un Sistema Eléctrico de Potencia con Generación Distribuida. [Tesis de Grado. Universidad de Ingeniería y Tecnología. Perú]. Disponible en: <https://repositorio.utec.edu.pe/handle/20.500.12815/251>
- Amaro, M. (2021). Control de potencia de generadores síncronos multipolo de imanes permanentes (DD-PMSG) para aerogeneradores. [Tesis de posgrado. Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa. Universitat Politècnica de Catalunya. España]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/359231?show=full>
- Montes Apaza, R. (2023). Regulación de tensión y frecuencia mediante un control adaptativo para un generador síncrono en la EPIME. *Revista de Investigaciones*, 12(1), 15-29. <https://doi.org/10.26788/ri.v12i1.3901>
- Chacón, E. (2024). Aplicación de sistemas de control de generadores sincrónicos para mejorar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia usando métodos numéricos. [Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27384>
- Chapman, S. (2012). Máquinas eléctricas. 3er Edición. Mc Graw Hill – México. ISBN: 9786071507242.
- Flórez, I. (2011). Análisis comparativo de los métodos de medición "in situ" de la eficiencia en motores trifásicos de inducción. [Tesis de Grado. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia]. Disponible en: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/1415>
- Murthy, A., Azis, N., Jasni, J., Othman, M., Yousof, M., Martin, D., & Talib, M. (2022). Investigation of the

impact of a standard lightning impulse on the structure of an 11/0.415 kV distribution transformer. *Electric Power Systems Research*, 202, 107588. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107588>

Tenelema, E. (2019). Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados. [Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17625>

Vaschetti, J., Magnago, F., & Sauchelli, V. (2012). Control automático de voltaje en sistemas eléctricos de potencia basado en sistemas expertos. *Información tecnológica*, 23(5), 69-84. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000500008>

Wildi, T. (2006). *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educación. ISBN: 970-26-0814-7

Yang, L., Wang, J., Ma, Y., Wang, J., Zhang, X., Tolbert, L. M., Wang, F. F., & Tomsovic, K. (2016). Three-phase power converter-based real-time synchronous generator emulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1651-1665. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2553168>

#### Contribución de los autores (CRediT)

**Maldonado, V.:** Investigación, Metodología, Redacción – borrador original. **Pérez-Rodríguez, J.:** Conceptualización, Análisis formal de datos, Metodología, Redacción – revisión y edición: **Rodríguez-Borges, C.:** Metodología, Redacción – revisión y edición: C.G.R.-B. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

#### Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

#### Nota del Editor

**Descargo de responsabilidad:** Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2025. Revista Científica FINIBUS - ISSN: 2737-6451.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0