

**METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS Y
LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO B
IMPLEMENTANDO EL MODELO WECC**

Sebastián Loaiza Estrada

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Medellín

2024

**METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS Y
LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO B
IMPLEMENTANDO EL MODELO WECC**

Sebastián Loaiza Estrada

Trabajo de grado para optar al título de:

Ingeniero Electricista

Asesores:

Sergio Andrés Estrada Mesa, MSc.

Juan Pablo Mesa Beleño, MSc.

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Medellín

2024

A mi tía Nelly, por su constante apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Tu sabiduría, cariño y aliento me han inspirado a superar obstáculos y a seguir adelante con determinación. Esta meta alcanzada es en gran parte gracias a ti. Gracias por creer en mí y por ser una fuente constante de fortaleza.

Agradecimientos

A mis asesores

Juan Pablo Mesa Beleño por su interés y dedicación a lo largo de mi formación académica. Su pasión por la enseñanza y su disposición para guiarme en mis investigaciones han sido fundamentales para mi crecimiento intelectual y personal.

Sergio Estrada Mesa por sus valiosas recomendaciones y orientación durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia ha sido fundamental para mejorar la calidad de mi investigación.

Resumen

El fenómeno de recuperación de tensión retardada inducida por fallos (FIDVR), se debe al bloqueo de los motores de inducción a bajas tensiones. Este fenómeno puede provocar daños en los equipos eléctricos y apagones tras perturbaciones a gran escala. Disponer de un modelo de carga dinámica es fundamental para comprender el comportamiento dinámico y las consecuencias de las FIDVR. Sin embargo, aún no se ha encontrado un proceso de validación para identificar los parámetros de un modelo de motor de inducción apoyado en pruebas de laboratorio y simulaciones. Por esta razón en este trabajo, se identificaron los parámetros de un motor trifásico de inducción de jaula de ardilla de ranura profunda mediante pruebas de laboratorio y cálculos. Se implementó el modelo matemático del motor de inducción trifásico y se analizaron sus respuestas transitoria y subtransitoria utilizando Simulink/MATLAB. Finalmente, se desarrolló una metodología experimental que validaron el modelo implementado para analizar las respuestas dinámicas de las variables electromecánicas ante una caída de tensión.

Palabras claves: Motor trifásico de inducción, estabilidad de tensión, modelo de carga compuesta, WECC, pruebas experimentales, identificación de parámetros, modelo matemático, análisis transitorio.

Abstract

The phenomenon of Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR) is due to the blocking of induction motors at low voltages. This phenomenon can cause damage to electrical equipment and blackouts following large-scale disturbances. Having a dynamic load model is essential to understand the dynamic behavior and consequences of FIDVR. However, a validation process for identifying the parameters of an induction motor model supported by laboratory tests and simulations has not yet been found. In this work, the parameters of a three-phase deep-slot squirrel-cage induction motor were identified by laboratory tests and calculations. The mathematical model of the three-phase induction motor was implemented and its transient and subtransient responses were analyzed using Simulink/MATLAB. Finally, an experimental methodology was developed to validate the implemented model to analyze the dynamic responses of the electromechanical variables to a voltage drop.

Keywords: Three-phase induction motor, voltage stability, composite load model, WECC, experimental tests, parameter identification, mathematical model, transient analysis.

Contenido

Agradecimientos	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Lista de Figuras.....	11
Lista de Tablas.....	13
Glosario.....	14
Introducción.....	1
1. Identificación y Descripción del Problema.....	3
1.1. Descripción	3
1.2. Formulación	5
2. Justificación.....	6
3. Objetivos.....	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos Específicos	8
4. Metodología.....	9
4.1. Actividades	9
4.1.1. Objetivo Específico 1.....	9
4.1.2. Objetivo específico 2.....	10

4.1.3. Objetivo específico 3.....	10
4.2. Metodología para la identificación de parámetros mediante pruebas experimentales.....	11
4.2.1. Prueba de desconexión por disparo	12
4.2.2. Prueba de reconexión	13
5. Referentes Teóricos	14
5.1. Modelos de Motores de Inducción.....	14
5.1.1. Modelo Estático de Motor de Inducción.....	14
5.2. Modelo Dinámicos de Motor de Inducción del WECC	19
5.2.1. Western Electricity Coordinating Council (WECC).....	19
5.2.2. Parámetros Para el Modelo del Motor de Inducción.....	22
5.2.3. Modelado matemático del motor de inducción.....	24
6. Resultados.....	28
6.1. Descripción de la prueba	28
6.2. Determinación del circuito equivalente en p.u.....	29
6.3. Identificación de Parámetros del Modelo de Carga WECC para Motores de Inducción	31
6.3.1. Resultados en las pruebas de desconexión por disparo.....	32
6.3.2. Resultados en las pruebas de reconexión.....	35
6.4. Implementación del modelo del motor de inducción trifásico	37

6.4.1. Simulación de energización del motor	39
6.5. Validación del modelo implementado.	43
7. Conclusiones	48
8. Recomendaciones	50
9. Referencias Bibliográficas	51
10. Anexos	56

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo para la prueba de desconexión por disparo	12
Figura 2. Diagrama de flujo para la prueba de reconexión.....	13
Figura 3. Circuito equivalente por fase de motor de inducción.....	15
Figura 4. Circuito de prueba en vacío de un motor de inducción	15
Figura 5. Circuito de prueba de corriente continua de un motor de inducción.....	17
Figura 6. Circuito de prueba de rotor bloqueado	18
Figura 7. Reglas prácticas para dividir la reactancia del circuito del estator y del rotor.	19
Figura 9. El Modelo de Carga Compuesto WECC.....	20
Figura 10. Laminados de rotores de jaula de motor de inducción típicos	21
Figura 11. Diagrama de bloques para el modelado del motor de inducción	25
Figura 12. Configuración de la prueba de laboratorio	28
Figura 13. Montaje de la prueba de laboratorio.....	29
Figura 14. Comportamiento de la velocidad mediante prueba de desconexión por disparo	33
Figura 15. Comportamiento de la potencia activa (a) y reactiva (b) mediante prueba de desconexión por disparo	33
Figura 16. Comportamiento de la corriente durante la prueba de desconexión por disparo	34
Figura 17. Comportamiento de la corriente mediante la prueba de reconexión	36
Figura 18. Diagrama de bloques para determinar I_d e I_q	38
Figura 19. Diagrama de bloques para determinar SLIP.....	39

Figura 20. Comportamiento de la corriente durante el arranque	40
Figura 21. Comportamiento de la velocidad durante el arranque.....	40
Figura 22. Curva torque – Deslizamiento durante el arranque del motor.....	41
Figura 23. Comportamiento de las potencias de entrada durante el arranque	42
Figura 24. Simulación de caída de voltaje.....	43
Figura 25. Respuesta de la velocidad durante la subtensión.....	44
Figura 26. Respuesta de la potencia activa durante la subtensión	45
Figura 27. Respuesta de la potencia reactiva durante la subtensión	46
Figura 28. Respuesta de la corriente durante la subtensión.....	47

Lista de Tablas

Tabla 1. Parametros del modelo del motor de inducción propuesto por el WECC	22
Tabla 2. Resultado de pruebas en vacío, de corriente directa y de rotor bloqueado	30
Tabla 3. Parametros del circuito equivalente en ohmios.	30
Tabla 4. Parametros del circuito equivalente en p.u.	31
Tabla 5. Parametros dinámicos del motor de inducción.	31
Tabla 6. Parametros de desconexión por disparo del motor de inducción.....	35
Tabla 7. Parametros de reconexión después de un disparo.....	37

Glosario

Modelo de carga: Una representación de cómo se comportan las cargas eléctricas en un sistema de potencia, a menudo utilizado en simulaciones para predecir cómo responderán los diferentes tipos de cargas a los cambios en el sistema.

Recuperación retardada de la tensión inducida por fallos (FIDVR): Fenómeno en el que la recuperación de la tensión en un sistema eléctrico se retrasa tras una fallos, normalmente debido al bloqueo de los motores de inducción a bajas tensiones.

Sistema eléctrico de potencia: Red que genera, transmite y distribuye electricidad a los consumidores, formada por diversos componentes interconectados, como centrales eléctricas, líneas de transmisión, subestaciones y redes de distribución.

Western Electricity Coordinating Council (WECC): Organización responsable de coordinar y garantizar la fiabilidad de la red eléctrica en el oeste de Estados Unidos, partes de Canadá y el norte de México.

Análisis transitorio: El estudio de cómo responde un sistema eléctrico a cambios o perturbaciones repentinos, centrándose en los efectos a corto plazo y los comportamientos dinámicos.

Estabilidad de la tensión: La capacidad de un sistema eléctrico para mantener niveles de tensión estables en condiciones normales de funcionamiento y durante las perturbaciones.

Carga dinámica: Carga eléctrica que presenta características variables en el tiempo, como los motores de inducción, cuyo comportamiento cambia en respuesta a las condiciones del sistema y puede afectar a la estabilidad general de la red.

Identificación de Parámetros: El proceso de determinar los valores específicos de las variables que definen el comportamiento de un modelo.

Modelo Matemático: Una representación abstracta de un sistema real mediante ecuaciones y fórmulas que describen su comportamiento y permiten su análisis y simulación.

Validación: El proceso de comparar los resultados de un modelo con datos reales o experimentales para verificar su precisión y confiabilidad.

Perturbaciones: Alteraciones o cambios inesperados en un sistema eléctrico, como caídas de tensión o picos de corriente, que pueden afectar su funcionamiento y estabilidad.

Introducción

La predicción del comportamiento dinámico de las cargas, especialmente en eventos de Recuperación Retardada de la Tensión Inducida por Fallos (FIDVR), causado por el bloqueo de los motores de inducción (Wang et al., 2020), representa desafíos significativos que los modelos estáticos y dinámicos convencionales no logran abordar de manera precisa, subrayando la necesidad urgente de modelos del motor de inducción para situaciones críticas (Khazeiynasab et al., 2022; Rahmani & Rezaei-Zare, 2019).

Ante estas condiciones, los autores Arif et al., (2018); Zhaoyu Wang, (2021) & Smart Buildings, (2022) han realizado notables avances en la modelación de los motores trifásicos como carga, desde modelos simples de carga estática hasta la incorporación de modelos dinámicos, incluyendo el Modelo de Carga Compuesto *Western Electricity Coordinating Council* (CLM WECC por sus siglas en inglés).

El modelo WECC, como indica la investigación McCormick, (2023); es el más utilizado en los estudios de carga y a menudo se considera el más preciso permitiendo representar las cargas (FIDVR) en el sistema eléctrico (Tan et al., 2023). Pero implica grandes dificultades en la identificación y calibración de parámetros específicos para cada carga (Ma et al., 2021).

Algunas investigaciones como Khazeiynasab et al., (2022); Zhang, Zhu, et al., (2017) & Kim et al., (2016) han abordado la dificultad en la identificación de parámetros para implementar el modelo WECC. Ahora bien, para el caso de Colombia no se cuenta, hasta la fecha, con procesos de validación de la identificación de parámetros respaldados por pruebas de laboratorio y simulaciones.

Por tanto, surge la necesidad de determinar los parámetros del modelo de carga WECC al sistema eléctrico colombiano, integrando una variedad de cargas como motores trifásicos, motores monofásicos, elementos electrónicos y cargas estáticas, permitiendo una modelación precisa y completa del comportamiento de la demanda eléctrica en Colombia.

En este trabajo se identificarán los parámetros de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla ranuras profundas mediante pruebas de laboratorio y cálculos, para implementar el modelo matemático del motor de inducción trifásico, y analizar la respuestas transitoria y subtransitoria por medio de Simulink MATLAB del motor que según Stephen J. Chapman, (2012) es el más utilizado en la industria. Finalmente, se desarrollará una metodología experimental, para validar el modelo implementado, mediante la comparación de los resultados de las simulaciones y las pruebas de laboratorio.

1. Identificación y Descripción del Problema

1.1. Descripción

En los últimos años, se ha observado un interés en la actualización y calibración del CLM WECC (Huang et al., 2019). Si bien investigadores mediante los avances tecnológicos han contribuido significativamente a mejorar la precisión de este modelo (Ma et al., 2021), se evidencia la necesidad de continuar trabajando para perfeccionar el CLM WECC, buscando representar con mayor exactitud el comportamiento de las cargas de uso final para el análisis de la estabilidad transitoria del sistema eléctrico (Huang et al., 2019).

A medida que los sistemas eléctricos evolucionan, incorporando una mayor diversidad de cargas e integrando recursos energéticos adicionales, se presenta un desafío sustancial en el CLM WECC, que según McCormick, (2023) “utiliza más de 131 parámetros para describir comportamientos estáticos y dinámicos bajo perturbaciones” (p 11). Esta complejidad implica grandes dificultades en la identificación y calibración de parámetros específicos para cada carga (Ma et al., 2021). La ausencia de un modelo de carga perfecto destaca la necesidad urgente de investigaciones en la identificación y desagregación de parámetros (McCormick, 2023, p. 10).

Diversas investigaciones han abordado la identificación de parámetros, siendo notable el trabajo de Khazeiynasab et al., (2022), que propone un mecanismo de exploración inteligente basado en análisis de sensibilidad con Lasso kernelizado. Asimismo, Bu et al., (2020) ha desarrollado un método basado en redes neuronales, específicamente una autocodificación variacional condicional. Estos esfuerzos han contribuido al conocimiento de la identificación de parámetros basada en simulaciones, aunque la validación con respuestas reales del sistema eléctrico sigue siendo un paso crítico (Ma et al., 2021).

Muchos métodos de identificación de parámetros del CLM WECC se basan en mediciones de tensión y potencia durante eventos de FIDVR (Bu et al., 2020). La metodología basada en mediciones puede ser implementada mediante pruebas reales o simuladas (Chen et al., 2022). El trabajo de Kim et al., (2016) sugiere la pregunta: ¿Cómo se pueden identificar los parámetros del modelo WECC utilizando un enfoque basado en mediciones? Esto subraya la necesidad de establecer una metodología experimental para la identificación de los parámetros de diversas cargas

En el caso específico de los parámetros del motor trifásico, su representación eléctrica y mecánica precisa puede lograrse mediante pruebas experimentales con la variabilidad de los estudios de campo (Khazeiynasab et al., 2022). El análisis del comportamiento del motor de inducción trifásico, incluyendo sus protecciones, durante perturbaciones de caída de tensión es crucial, ya que estas pueden desencadenar la activación de protecciones o bloquear el rotor debido a cambios en velocidad y corriente (Rahmani & Rezaei-Zare, 2019). El estudio de Liu et al., (2018) enfatiza la relevancia de las características de protección y bloqueo del motor en el análisis FIDVR.

A pesar de las investigaciones existentes sobre la identificación de parámetros del motor trifásico propuesto por el CLM WECC, en el sistema eléctrico colombiano no se cuenta, hasta la fecha, con procesos de validación de la identificación de parámetros respaldados por pruebas de laboratorio y simulaciones. Esto es esencial, especialmente teniendo en cuenta el impacto significativo que los motores de inducción tienen en la estabilidad de tensión y frecuencia (Liu et al., 2018; Rahmani & Rezaei-Zare, 2019) de un sistema eléctrico. Se destaca la importancia de realizar pruebas específicas para identificar los parámetros del modelo del motor trifásico

propuesto por el WECC, y desarrollar simulaciones precisas que elimine la incertidumbre inherente en la operación del sector eléctrico al enfrentar eventos de FIDVR.

1.2. Formulación

¿Como establecer una metodología experimental que permita identificar los parámetros de un motor de inducción Tipo B para su posterior validación en ambientes simulados ante caídas de tensión considerando el modelo propuesto por el WECC?

2. Justificación

La mitigación del fenómeno FIDVR, ha sido logrado mediante la implementación de dispositivos de electrónica de potencia Sistemas de Transmisión Flexibles de Corriente Alterna por sus siglas en inglés (FACTS) (Paredes et al., 2023). Incluso con estos dispositivos el fenómeno FIDVR aún tiene riesgos de ocasionar fallas en equipos eléctricos y apagones tras perturbaciones a gran escala (Apostolov, 2020).

En este contexto, contar con un modelo de carga dinámica y precisa es esencial para comprender el comportamiento dinámico de las cargas en los sistemas eléctricos y realizar análisis de prevención en la estabilidad de los impactos del FIDVR garantizando la estabilidad de voltaje en el sistema eléctrico (Rahmani & Rezaei-Zare, 2019).

El modelo de carga WECC abarca una variedad de motores trifásicos, monofásicos y componentes electrónicos, lo que confiere una flexibilidad para capturar las características específicas del FIDVR en las diversas cargas presentes en el país (McCormick, 2023). La consideración de este modelo en futuras metodologías de validación podría ser significativo para mejorar la representación de las dinámicas de carga; ya que, en la actualidad, la validación de modelos de cargas en el Sistema Eléctrico Colombiano es un aspecto que aún no se ha establecido.

La literatura existente en cuanto al modelo WECC, hasta la fecha, no ofrece una metodología experimental para la identificación de los parámetros, según lo señalado por Huang et al., (2019). Esta ausencia de conocimiento justifica la necesidad de llevar a cabo esta investigación para superar las limitaciones de aplicabilidad del modelo de carga WECC en el contexto colombiano.

La contribución de esta investigación se extiende tanto a la comunidad académica como a la industria eléctrica en general. Al hacer uso de la documentación de referencias técnicas apropiadas para el modelado dinámico de las cargas, así como el informe del NERC, (2016), se propone una metodología experimental que permita identificar los parámetros de los motores trifásicos propuesto por el CLM WECC. Este enfoque experimental busca facilitar una aproximación al modelo de los motores de inducción como carga, proporcionando así una perspectiva realista del Sistema Eléctrico Colombiano.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Establecer una metodología experimental que permita obtener los parámetros de un motor de inducción tipo B para su posterior validación en ambientes simulados ante caídas de tensión considerando el modelo propuesto por el Western Electricity Coordinating Council (WECC).

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros del modelo de carga compuesto WECC, para motores de inducción a través de la realización de pruebas de laboratorio.
- Implementar el modelo del motor de inducción trifásico tipo B propuesto por el WECC, para obtener la respuesta transitoria y subtransitorias por medio de un software de simulación.
- Desarrollar una metodología experimental, para la validación del modelo de carga compuesto WECC en motores de inducción tipo B, mediante la comparación de los resultados de las simulaciones y las pruebas de laboratorio.

4. Metodología

Nuestro objetivo general es establecer una metodología experimental que permita obtener los parámetros de un motor de inducción tipo B para su posterior validación en ambientes simulados ante caídas de tensión considerando el modelo propuesto por el WECC. La metodología propuesta describe las actividades de cada uno de los objetivos específicos en orden de alcanzar el objetivo general.

4.1. Actividades

4.1.1. *Objetivo Específico 1.*

Identificar los parámetros del modelo de carga compuesto WECC, para motores de inducción a través de la realización de pruebas de laboratorio.

Actividad 1.1 Realizar una revisión de literatura sobre la identificación de parámetros en modelos de motores de inducción trifásicos como carga del WECC a partir de libros, revistas y artículos de investigación en bases de datos de fuentes científicas como IEEE, Scielo, Scopus.

Actividad 1.2 Desarrollar pruebas experimentales de caída de tensión en la alimentación de un motor de inducción trifásico tipo B para la identificación de los parámetros de caracterización de estabilidad del modelo de carga compuesta WECC.

Actividad 1.3 Realizar la identificación de los parámetros del modelo del motor de inducción mediante el análisis de los resultados de las pruebas experimentales de caída de tensión y la determinación de las variables dinámicas a partir del circuito equivalente.

4.1.2. *Objetivo específico 2.*

Implementar el modelo del motor de inducción trifásico tipo B propuesto por el WECC, para obtener la respuesta transitoria y subtransitorias por medio de un software de simulación.

Actividad 2.1 Codificar el diagrama de bloque del motor de inducción propuesto por el WECC en un software de simulación como Simulink/Matlab, para realizar el análisis de las variables electromecánicas del motor de inducción (Velocidad, deslizamiento, potencia activa, potencia reactiva, corriente, torque).

Actividad 2.2 Calibrar el modelo del motor de inducción implementado en Simulink/Matlab a través de la comparación de las simulaciones de perturbación de subtensión con los resultados presentados por (Ma et al., 2020)

Actividad 2.3 Se utilizará un bloque de señal escalón en Simulink de 1 p.u para simular el arranque del motor en el modelo implementado para analizar el comportamiento de energización durante el estado transitorio y estado de establecimiento de las variables electromecánicas.

4.1.3. *Objetivo específico 3.*

Desarrollar una metodología experimental, para la validación del modelo de carga compuesto WECC en motores de inducción tipo B, mediante la comparación de los resultados de las simulaciones y las pruebas de laboratorio.

Actividad 3.1 Simular perturbaciones de caídas de tensión realizadas en las pruebas experimentales en el modelo implementado utilizando bloques de escalón para obtener la respuesta transitoria y subtransitorias del motor bajo prueba.

Actividad 3.3 Realizar la validación de los resultados de la simulación de caída de tensión del modelo implementado, con respecto a las respuestas obtenidas de las prueba experimentales del motor de inducción trifásico.

Actividad 3.2 Identificar las limitaciones del modelo mediante el análisis de las variables electromecánicas en diversas simulaciones de caída de tensión y energización para fortalecer en futuras investigaciones.

4.2. Metodología para la identificación de parámetros mediante pruebas experimentales

Este trabajo propone el diseño de una metodología experimental destinada a la identificación de los parámetros de los motores de inducción trifásica especificada en la Tabla 1, empleando pruebas experimentales para la caracterización de estas cargas. La aplicación de esta metodología busca complementar los resultados obtenidos en las pruebas de los motores, según lo detallado en el informe de la North American Electric Reliability Corporation, (2016).

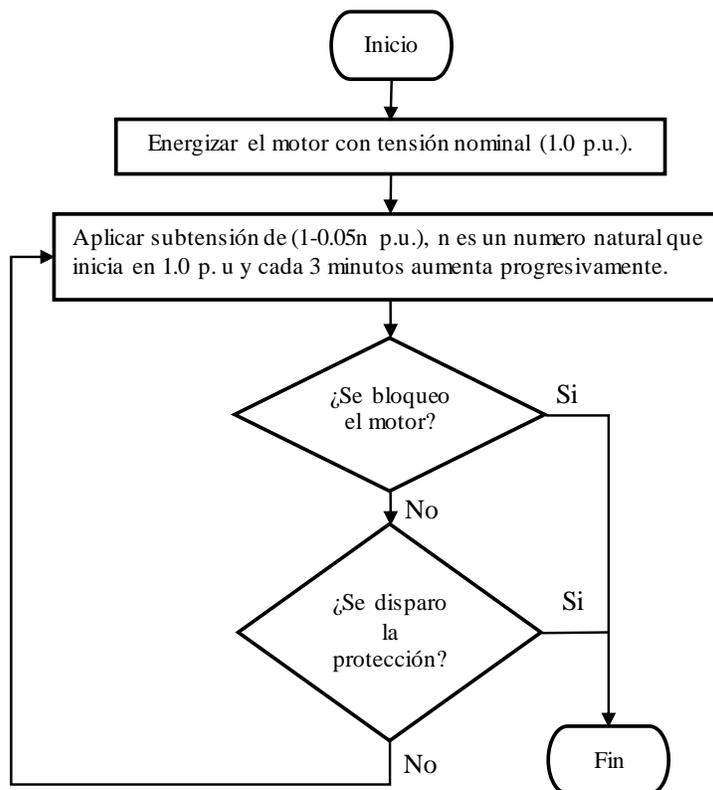
La etapa inicial de preparación de la prueba es mediante el acceso a la información técnica del motor en cuestión, lo siguiente es determinar el circuito equivalente del motor. Además, se establecen las protecciones necesarias tanto del equipo como el entorno de prueba. Posteriormente, se ajusta la carga del motor con el fin de crear condiciones representativas del funcionamiento real. Una vez completada esta fase de preparación, se procede con la prueba de desconexión por disparo, seguida de la prueba de reconexión, ambas diseñadas para evaluar el comportamiento del motor en situaciones específicas.

4.2.1. Prueba de desconexión por disparo

Para llevar a cabo la prueba de desconexión por disparo, se debe seguir el diagrama de flujo de la Figura 1, la cual es la experimentación de subtensión aplicada a un motor de inducción trifásico. A lo largo de todo el proceso de prueba, se realizan mediciones continuas de las variables electromecánicas, además de identificar las tensiones de disparo 1 (V_{tr1}) y disparo 2 (V_{tr2}), junto con los tiempos de disparo (T_{tr1} y T_{tr2}). La fracción del motor (F_{tr1} y F_{tr2}) se define como el porcentaje de cargas que se desconecta al ocurrir las pruebas de desconexión por disparo.

Figura 1

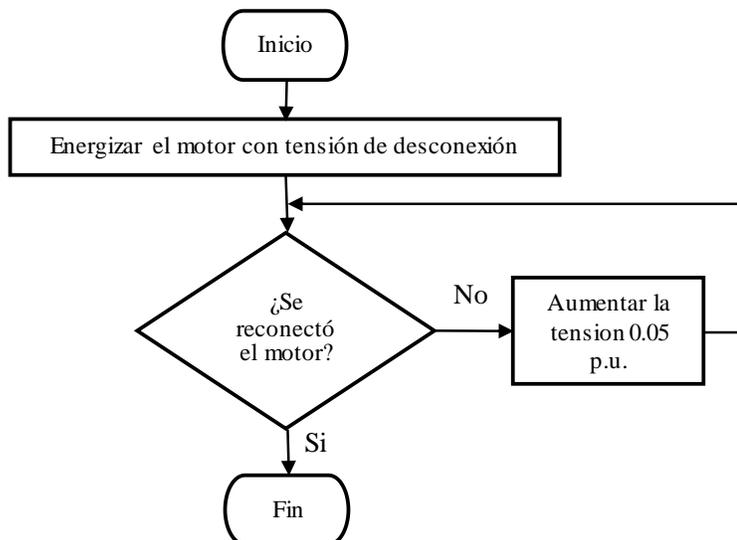
Diagrama de flujo para la prueba de desconexión por disparo



4.2.2. Prueba de reconexión

Tras la desconexión del motor, se da inicio a la fase de reconexión que según la Figura 2 utiliza la misma tensión de alimentación a la que se produjo el disparo para la primera energización. En caso de que, al energizar el motor, no arranque, se procede a aumentar la tensión en 0.05 p. u hasta lograr que el motor comience a girar. La prueba de reconexión tiene como objetivo principal identificar las tensiones de reconexión previas al disparo 1 ($Vrc1$) y al disparo 2 ($Vrc2$), al tiempo que se determinan los tiempos de reconexión 1 ($Trc1$) y reconexión 2 ($Trc2$).

Figura 2
Diagrama de flujo para la prueba de reconexión.



5. Referentes Teóricos

5.1. Modelos de Motores de Inducción

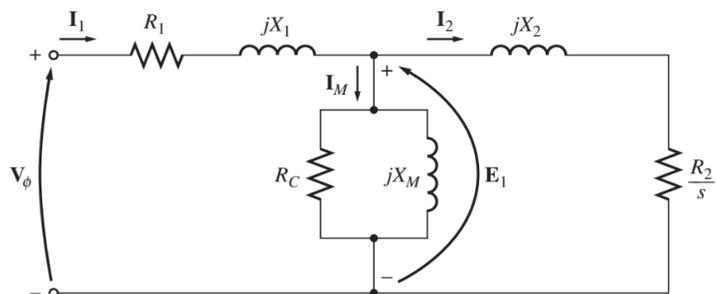
Los modelos de los motores de inducción pueden ser modelos estáticos y modelos dinámicos. Como define Smart Buildings, (2022), el modelo estático resulta útil en situaciones estables, su simplicidad lo hace apropiado para estudios a largo plazo de estabilidad de voltaje, aunque no captura completamente la relación entre la potencia real y reactiva absorbida. A pesar de sus limitaciones, este enfoque se destaca por su eficiencia en la predicción de la estabilidad a lo largo de períodos extendidos en sistemas eléctricos.

Por otro lado, los modelos dinámicos se emplean en aquellos casos en los que es fundamental considerar los estudios relacionados con fenómenos transitorios y la estabilidad del sistema a cortos periodos (González Vélez, 2019). En esta sección, se abordarán los modelos tanto estático como dinámico del motor de inducción trifásico.

5.1.1. Modelo Estático de Motor de Inducción.

El modelado estático de un motor se logra mediante la creación de su circuito equivalente por fase. Para construir con precisión el circuito equivalente de la Figura 3, se requiere determinar diversos parámetros, como lo señala Stephen J. Chapman, (2012). Estos parámetros son: la resistencia del estator ($R1$), la resistencia del rotor referida al lado del estator ($R2$), la resistencia de pérdidas en el núcleo (RC), la reactancia de fuga del estator ($jX1$), la reactancia de fuga del rotor referida al estator ($jX2$), y la reactancia de magnetización (jXM).

Figura 3
Circuito equivalente por fase de motor de inducción

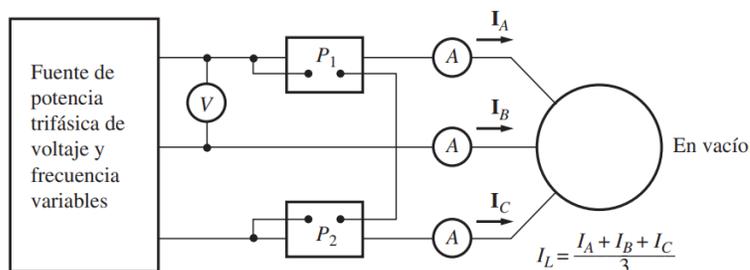


Nota. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 250), por Stephen J. Chapman, 2012, McGrawHillEducation.

La IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, (2017), proporciona recomendaciones y métodos para la estimación y cálculo de los parámetros del circuito equivalente en un motor de inducción trifásico. Entre los métodos recomendados se encuentran la prueba en vacío, la prueba en rotor bloqueado y la prueba en corriente continua descritas a continuación.

Prueba en Vacío. Esta prueba se realiza aplicando voltaje al motor mientras se deja el rotor girando libremente. El circuito de prueba se muestra en la Figura 4. Se conectan los vatímetros, el voltímetro y tres amperímetros al motor, al que se le permite girar libremente.

Figura 4
Circuito de prueba en vacío de un motor de inducción



Nota. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 283), por Stephen J. Chapman, 2012, McGrawHillEducation.

A partir de esta prueba, según Stephen J. Chapman, (2012), la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas que sufre. Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables porque la corriente es extremadamente pequeña, por lo que se pueden despreciar. Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por la Ecuación 1:

$$P_{pce} = 3I_1^2 R_1 \quad (1)$$

Para determinar la potencia de entrada del motor, se debe implementar la Ecuación 2:

$$P_{ent} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta \quad (2)$$

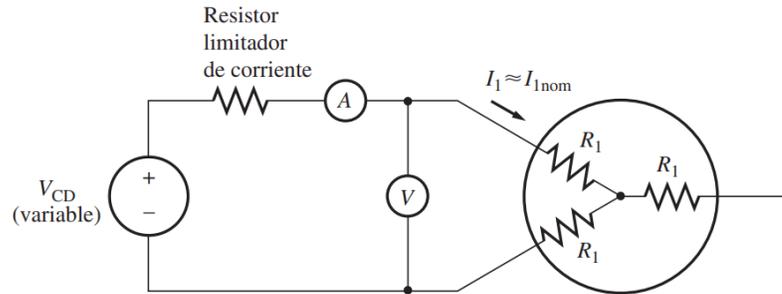
Mediante la prueba en vacío se puede determinar la impedancia de entrada equivalente (Z_{eq}), la cual representa los componentes inductivos del estator (Stephen J. Chapman, 2012). En la Ecuación 3, V y I son los datos obtenidos en la prueba.

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\emptyset}{I_1} \cong X_1 + X_m \quad (3)$$

Prueba en Corriente Continua (CC). En esta prueba según Stephen J. Chapman, (2012), se aplica corriente continua al motor y se miden las caídas de voltaje en el estator. En la Figura 5 se observa el circuito básico para la prueba de cd.

Figura 5

Circuito de prueba de corriente continua de un motor de inducción



Nota. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 284), por Stephen J. Chapman, 2012, McGrawHillEducation.

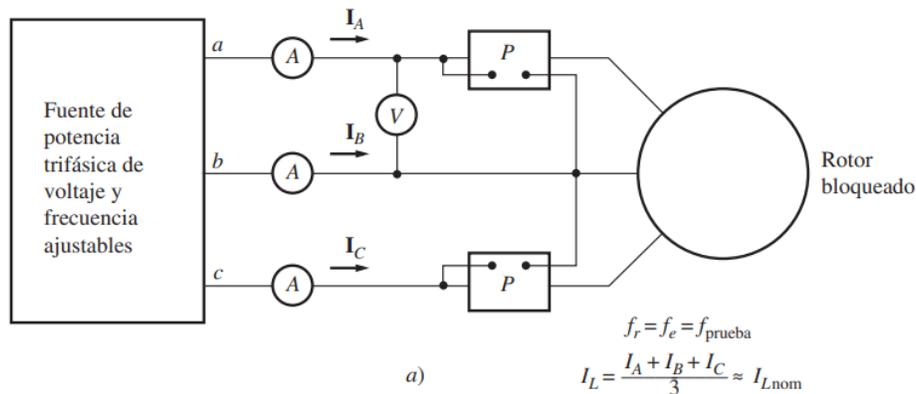
La corriente de la Figura 5 fluye a través de dos de los devanados, por lo que la resistencia total en el camino de la corriente es $2R_1$. Por lo tanto, R_1 se determina en la Ecuación 4, donde V_{cd} y I_{cd} es el voltaje y corriente obtenida en la prueba de corriente continua.

$$R_1 = \frac{V_{cd}}{2I_{cd}} \quad (4)$$

Prueba en rotor bloqueado. En esta prueba según Stephen J. Chapman, (2012) se bloquea o enclava el rotor para que no se pueda mover, se aplica un voltaje al motor y se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultantes. Figura 6 muestra las conexiones para la prueba del rotor bloqueado. Para llevarla a cabo, se aplica un voltaje de ca al estator y se ajusta el flujo de corriente para que sea aproximadamente su valor a plena carga.

Figura 6

Circuito de prueba de rotor bloqueado



Nota. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 284), por Stephen J. Chapman, 2012, McGrawHillEducation.

La resistencia y la reactancia del rotor bloqueado se determina según Ecuación 5-6 (Stephen J. Chapman, 2012).

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad (5)$$

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \quad (6)$$

Ahora se puede calcular la resistencia del rotor R_2 como según Ecuación 7:

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \quad (7)$$

Para determinar X'_1 y X'_2 se debe seguir la Figura 7, el cual identifica la reactancia según su diseño.

Figura 7

Reglas prácticas para dividir la reactancia del circuito del estator y del rotor.

Diseño del rotor	X_1 y X_2 en función de X_{RB}	
	X_1	X_2
Rotor devanado	$0.5 X_{RB}$	$0.5 X_{RB}$
Diseño A	$0.5 X_{RB}$	$0.5 X_{RB}$
Diseño B	$0.4 X_{RB}$	$0.6 X_{RB}$
Diseño C	$0.3 X_{RB}$	$0.7 X_{RB}$
Diseño D	$0.5 X_{RB}$	$0.5 X_{RB}$

Nota. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 287), por Stephen J. Chapman, 2012,

McGrawHillEducation.

5.2. Modelo Dinámicos de Motor de Inducción del WECC.

5.2.1. Western Electricity Coordinating Council (WECC).

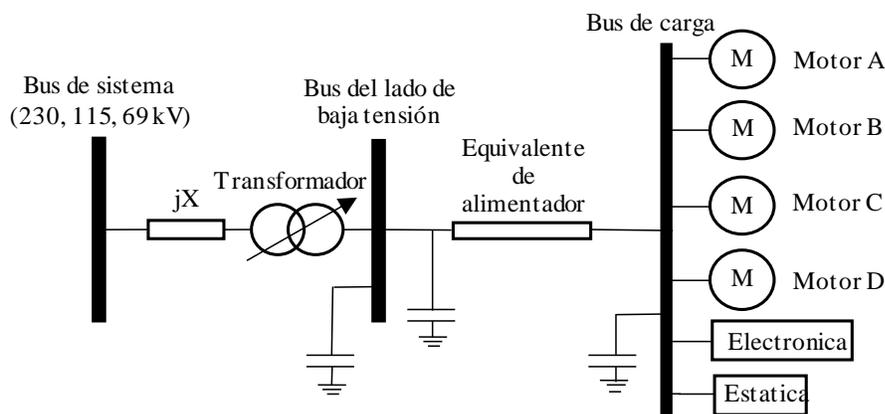
El 10 de agosto de 1996, el sistema WECC sufrió un grave apagón que lo dividió en cuatro islas y no sólo provocó la pérdida de 30.390 MW, sino que afectó al consumo eléctrico de 7,49 millones de clientes del oeste de Norteamérica. (Smart Buildings, 2022), debido a esto se desarrolló el modelo clásico de carga compuesta ZIP + IM para modelar condiciones de carga muy estresadas en las horas punta de verano (Zhaoyu Wang, 2021).

La predicción del comportamiento dinámico de las cargas, especialmente en eventos de Recuperación Retardada de la Tensión Inducida por Fallos (FIDVR), presenta desafíos significativos que los modelos estáticos y dinámicos tradicionales no logran abordar de manera precisa (Khazeiynasab et al., 2022). La complejidad inherente de la FIDVR requiere enfoques más avanzados, según destaca la investigación de Wang et al., (2020).

El Modelo de Carga Compuesta CLM WECC se destaca en comparación con enfoques como el modelo de recuperación exponencial y complejo de carga (CLOD), tal como se discute en Smart Buildings, (2022). Su superioridad radica en la capacidad de realizar un análisis de las cargas ante el evento crítico de FIDVR. Este fenómeno plantea la posibilidad de pérdidas de control de voltaje y fallos en cascada en el sistema eléctrico, debido al retraso inesperado en la recuperación de la tensión a su valor nominal luego de la eliminación normal de una falla (Wang et al., 2020).

En el CLM WECC (Figura 8) hay cuatro motores conectados al bus de uso final. Tres de ellos son motores trifásicos, que se definen como Motor A, Motor B y Motor C (Wang et al., 2020). Cada uno de los motores de inducción trifásicos representa un tipo específico de carga dinámica. Según Ma et al., (2020) & Tan et al., (2023), El motor A representa motores con baja inercia que accionan cargas de par constante, el motor B representa motores con alta inercia que accionan cargas de par variable, como ventiladores comerciales y sistemas de tratamiento de aire. El motor C representa los motores con baja inercia que accionan cargas de par variable.

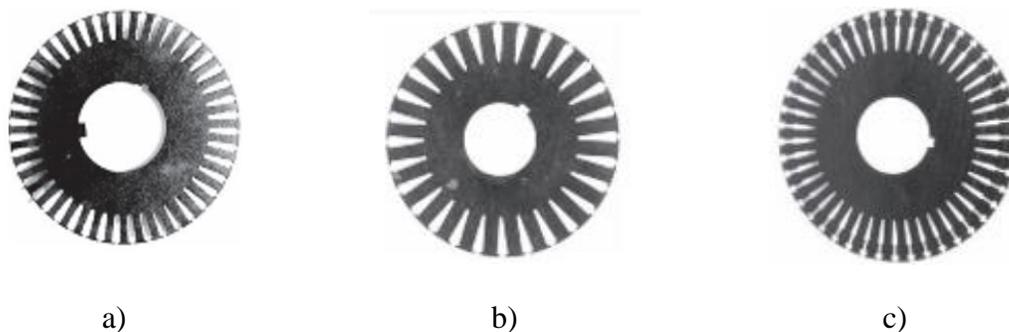
Figura 8
El Modelo de Carga Compuesto WECC



Cada uno de estos motores son tipo jaula, pero se caracterizan por tener un diseño NEMA o IEC como se muestra en la Figura 9. En el libro de Stephen J. Chapman, (2012), describe las características distintivas de cada diseño. Los motores de diseño clase A tienen un diseño de rotor con barras largas cerca de la superficie, el par máximo es 200 o 300% del par a plena carga y se presenta a corriente de arranque de 500 a 800% de la corriente nominal. En los motores de diseño clase B el deslizamiento del rotor es aun relativamente bajo (menor a 5%) a plena carga debido a la construcción del rotor ranuras profundas. Los motores de diseño clase C El par máximo es un poco mayor al de los motores clase A, mientras que el par de arranque es hasta 250% del par a plena carga. Estos motores se construyen con rotores de doble jaula, por lo que son más caros que los motores de las clases anteriores.

Figura 9

Laminados de rotores de jaula de motor de inducción típicos



Nota. Se muestra en a) diseño NEMA clase A, b) diseño NEMA clase B, c) diseño NEMA clase C. Tomado de *Maquinas Eléctricas* (p. 260), por *Stephen J. Chapman, 2012,*

McGrawHillEducation

5.2.2. *Parámetros Para el Modelo del Motor de Inducción.*

En el CLM WECC especifica un total de 131 parámetros (McCormick, 2023), de los cuales 20 descritos en Tabla 1, según Zhang, Guo, et al., (2017), están designados para los tres tipos de motores: Motor A, Motor B y Motor C, donde algunos parámetros podrían variar significativamente en función de la estación del año, la zona de estudio o el tipo de falla.

Tabla 1

Parámetros del modelo del motor de inducción propuesto por el WECC

Parámetros	
Mtyp	Tipo de motor.
Lfm	Factor de carga [p.u].
Ra	Resistencia de armadura [p.u].
Ls	Reactancia síncrona [p.u].
Lp	Reactancia transitoria [p.u].
Lpp	Reactancia subtransitorio [p.u].
Tp0	Constante de tiempo transitorio de circuito abierto [s].
Tpp0	Constante de tiempo subtransitorio de circuito abierto [s].
H	Constante de inercia [s].
Etrq	Torque mecánico de velocidad exponencial.
Vtrl	Voltaje de disparo 1 ante una subtensión [p.u].
Ttrl	Tiempo de retardo del disparo 1 antes una subtensión [s].
Ftr1	Fracción del motor que se desconecta en el disparo 1 [p.u].
Vrc1	Voltaje de reconexión ante el disparo 1 [p.u].
Trc1	Tiempo de retardo en la reconexión 1 [s].
Vtr2	Voltaje de disparo 2 ante una subtensión [p.u].
Ttr2	Tiempo de retardo del disparo 2 antes una subtensión [s].

Ftr2 Fracción del motor que se desconecta en el disparo 2 [p.u].

Vrc2 Voltaje de reconexión ante el disparo 2 [p.u].

Trc2 Tiempo de retardo en la reconexión 2 [s].

Fuente: Elaboración propia. Determinada de Bu et al., (2020)

En el contexto del modelo dinámico, variables como: Ra , Ls , Lp , Lpp , $Tp0$ y $Tpp0$, definidas en la Tabla 1, requieren una determinación precisa a través de un modelado estático en por unidad. Como se sugiere en el capítulo 7 del libro Paul C. Krause, (2013), y como se llevó a cabo en Liao et al., (2020). Los parámetros se especifican en las Ecuaciones 8-12:

$$L_s = X_1 + X_m \quad (8)$$

$$L_p = X_1 + \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_2}} \quad (9)$$

$$T_{p0} = \frac{X_2 + X_m}{\omega_0 R_2} \quad (10)$$

$$L_{pp} = L_p \quad (11)$$

$$T_{pp0} \cong 0 \quad (12)$$

En el caso específico de los parámetros $Vtr1$, $Vtr2$, $Ttr1$ y $Ttr2$, $Ftr1$ y $Ftr2$ mencionados en la Tabla 1; según Zhang et al., (2017) representan niveles de disparo por tensión, mientras que $Vrc1$, $Vrc2$, $Trc1$ y $Trc2$ indican niveles de reconexión por tensión. De acuerdo a Khazeynasab et al., (2022) la determinación de estos parámetros puede llevarse a cabo a través de pruebas experimentales con la variabilidad de los estudios de campo para la representación de

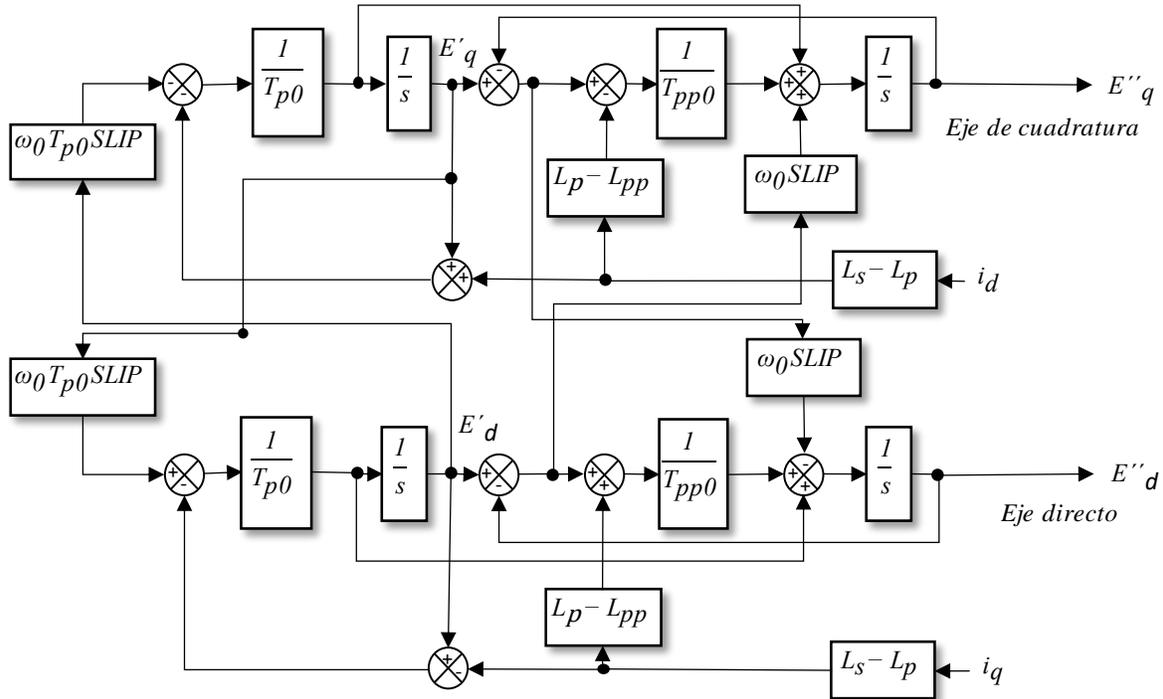
los motores trifásico ante perturbaciones. Según lo anterior se destacando la importancia de caracterizar el motor de inducción para el análisis en la parametrización (Liu et al., 2018).

A pesar de las investigaciones existentes sobre la identificación de parámetros de los motores de inducción trifásicos propuesto por el CLM WECC (Bu et al., 2020; Khazeiynasab et al., 2022; Tan et al., 2023), no se cuenta, hasta la fecha, con procesos de validación de la identificación de parámetros respaldados por pruebas de laboratorio. Esto es esencial, especialmente teniendo en cuenta el impacto significativo que los motores tienen en la estabilidad de tensión y frecuencia de un sistema eléctrico (Liu et al., 2018; Rahmani & Rezaei-Zare, 2019).

5.2.3. *Modelado matemático del motor de inducción.*

El modelo de carga WECC ha desarrollado un modelo dinámico (Figura 10), para llevar a cabo el análisis de transitorios electromecánicos de un motor de doble jaula ardilla (Motor tipo C) (Huang et al., 2019). El modelo es general para ser aplicable a los 3 tipos de motores de inducción trifásicos propuestos, cada motor se diferencia por los parámetros del modelo y las características mecánicas, como las características de par-velocidad, la constante de inercia, el deslizamiento, etc.(Ma et al., 2020).

Figura 10
Diagrama de bloques para el modelado del motor de inducción



Para el modelo dinámico planteado en la Figura 10 son necesarios 7 parámetros: L_s , L_p y L_{pp} , T_{p0} y T_{pp0} , H , E_{trq} , descritas en la Tabla 1. Otras variables necesarias para el modelado son: velocidad del motor en p.u (ω), velocidad síncrona (ω_0), torque de carga (T_L), torque mecánico inicial (T_{m0}), coeficientes de velocidad del par mecánico. Descritas en Ma et al., (2020) las Ecuaciones 11-13:

$$T_L = T_{m0}(A\omega^2 + B\omega + C + D\omega^{E_{trq}}) \quad (11)$$

$$T_{m0} = pE''_{d0}i_{d0} + qE''_{q0}i_{q0} \quad (12)$$

$$\omega = 1 - S_{slip} \quad (13)$$

Donde p y q son coeficientes constantes predefinidos como 1; A , B , C , D son los coeficientes de velocidad del par mecánico; el término E_{trq} representa el exponente de velocidad

aplicado al torque mecánico, y V_d y V_q son las tensiones terminales de los ejes dq. A partir de la Figura 10 se puede obtener un modelo matemático de un motor de inducción basado en las coordenadas polares. A partir de Aree, (2023); Ma et al., (2020), se expresa un conjunto de Ecuaciones 14-20. La fem de cuadratura transitoria ($E'q$), la fem directa transitoria ($E'd$), la fem de cuadratura subtransitoria ($E''q$), la fem directa subtransitoria ($E''d$) y el deslizamiento (S_{slip}) retroalimentada del estado dinámico. del motor La corriente directa (I_d) y la corriente de cuadratura (I_q) se alimentan como entradas del sistema.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{p0}} [-E'_q - i_d(L_s - L_p) - E'_d \omega_0 S_{slip} T_{p0}] \quad (14)$$

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{T_{p0}} [-E'_d + i_q(L_s - L_p) + E'_q \omega_0 S_{slip} T_{p0}] \quad (15)$$

$$\dot{E}''_q = \frac{T_{p0} - T_{pp0}}{T_{p0} T_{pp0}} E'_q - \frac{T_{pp0}(L_s - L_p) + T_{p0}(L_p - L_{pp})}{T_{p0} T_{pp0}} i_d - \frac{1}{T_{pp0}} E''_q - \omega_0 S_{slip} E''_d \quad (16)$$

$$\dot{E}''_d = \frac{T_{p0} - T_{pp0}}{T_{p0} T_{pp0}} E'_d - \frac{T_{pp0}(L_s - L_p) + T_{p0}(L_p - L_{pp})}{T_{p0} T_{pp0}} i_q - \frac{1}{T_{pp0}} E''_d - \omega_0 S_{slip} E''_q \quad (17)$$

$$S_{slip} = \frac{pE''_d i_d + qE''_q i_q - T_L}{2H} \quad (18)$$

$$i_d = \frac{R_a}{R_a^2 + L_{pp}^2} (V_d - E''_d) - \frac{L_{pp}}{R_a^2 + L_{pp}^2} (V_q - E''_q) \quad (19)$$

$$i_q = \frac{R_a}{R_a^2 + L_{pp}^2} (V_q - E''_q) - \frac{L_{pp}}{R_a^2 + L_{pp}^2} (V_d - E''_d) \quad (20)$$

Otras ecuaciones para determinar las el comportamiento dinámico de la potencia Activa y Reactiva se determina a partir de las Ecuación 21 - 22 según Ma et al., (2020):

$$P = i_d V_d + i_q V_q \quad (21)$$

$$Q = i_d V_q - i_q V_d \quad (22)$$

El torque eléctrico según Aree, (2023) se determina con la Ecuación 23:

$$T_e = E''_d i_d + E''_q i_q \quad (23)$$

6. Resultados

6.1. Descripción de la prueba

Las pruebas de laboratorio se realizaron a un motor de jaula de ardilla de ranura profunda (Motor B) de 4 polos con una potencia mecánica nominal de 250 W y un factor de potencia de 0,66. El motor funciona a 230 V y 1 A en conexión delta, con una velocidad nominal de 1.710 rpm, un deslizamiento de 0,05 y una constante de inercia de 0,33 s.

La Figura 11 muestra el montaje de prueba utilizado para determinar los parámetros del motor de inducción trifásico. Las variables electromecánicas se monitorearon en tiempo real con un analizador de redes. La protección del motor se ajustó a 1,2 A en función de la corriente nominal. La Figura 11 muestra el montaje de laboratorio realizados con el motor bajo prueba.

Figura 11
Configuración de la prueba de laboratorio

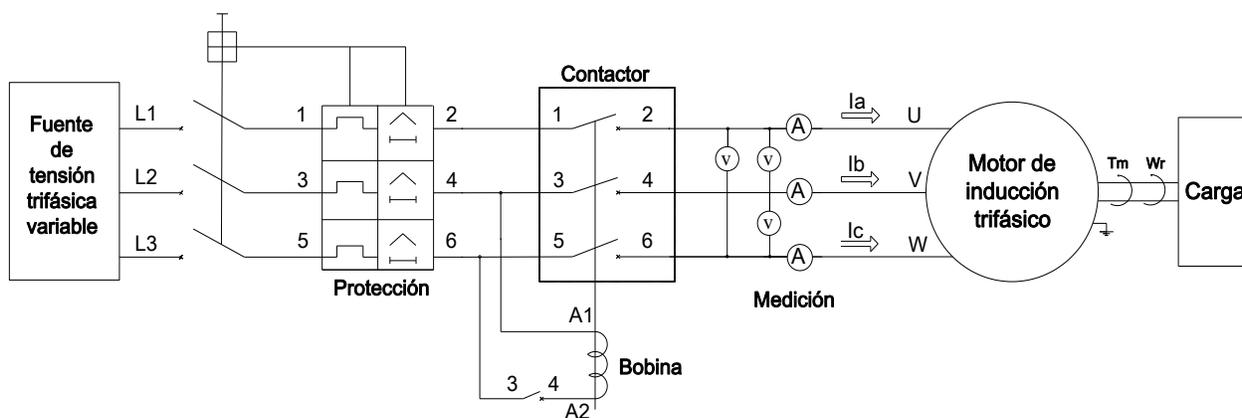
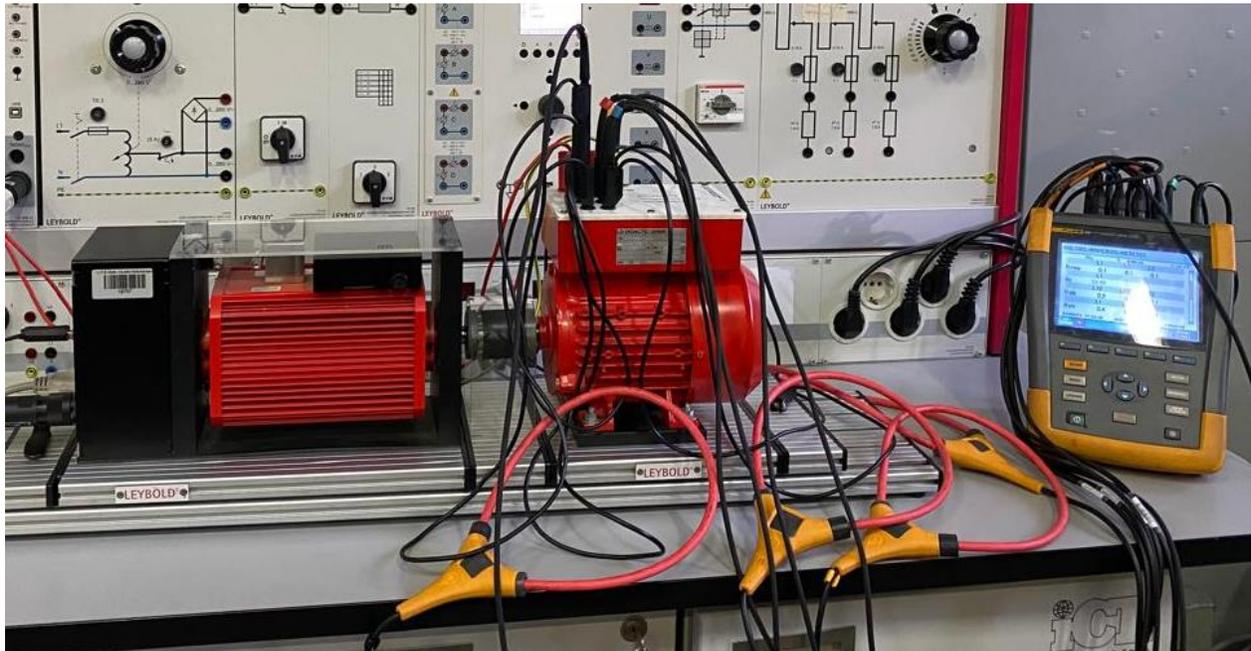


Figura 12
Montaje de la prueba de laboratorio



6.2. Determinación del circuito equivalente en p.u

Para determinar los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción trifásico, es necesario realizar las pruebas en vacío, en corriente continua y con rotor bloqueado según lo establecido en la norma IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, (2017). Estas pruebas se explican en detalle en el trabajo de Stephen J. Chapman, (2012).

Las pruebas en vacío, corriente continua y rotor bloqueado se realizaron en conexión en estrella con una tensión nominal de 400 V, y una corriente es de 0,72 A. Los resultados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2*Resultado de pruebas en vacío, de corriente directa y de rotor bloqueado*

Prueba en vacío	Prueba DC	Prueba rotor bloqueado
395.7 V		54.52 V
0.615 A	43.2 V	0.715 A
60.0 Hz		60.0 Hz
157 W	0.72 A	65 W

De acuerdo con las indicaciones de Stephen J. Chapman, (2012) para calcular el circuito equivalente del motor, se determinaron los valores presentados en la Tabla 3. El procedimiento se describe en el Anexo A.

Tabla 3*Parámetros del circuito equivalente en ohmios.*

R_s	X_s	X_m	X_r	R_r
30.0 Ω	25.355 Ω	346.121 Ω	38.032 Ω	12.382 Ω

Los parámetros necesarios para el modelo del motor de inducción se determinan a partir del circuito equivalen en por unidad. Para llevar las resistencia y reactancias del motor bajo prueba a valores en por unidad, según P Kundur, (1994) se debe llevar la magnitud de la resistencia o reactancia en ohmios sobre la impedancia base utilizando la Ecuación 24.

$$R_{pu} = \frac{R}{(V_{base}^2/S_{base})} \quad (24)$$

Donde R es la resistencia o impedancia en ohmios. El voltaje base (V_{base}) se obtiene a partir del voltaje en voltios registrado durante la prueba en vacío, según la Tabla 2, se registró en 395.7 V. Por otro lado, la potencia base (S_{base}) representa la potencia aparente nominal del motor, establecida en 378.78 VA. Cada resistencia y reactancia, detalladas en la Tabla 3, se expresan en por unidad. La determinación del circuito equivalente se describe en el Anexo A, los resultados se ilustran en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros del circuito equivalente en p.u.

R_s	X_s	X_m	X_r	R_r
0.0726	0.0115	0.8871	0.0173	0.0300

6.3. Identificación de Parámetros del Modelo de Carga WECC para Motores de Inducción

En esta sección se determinarán los parámetros de la Tabla 1 a partir del circuito equivalente en por unidad (Tabla 4) utilizando las Ecuaciones 8-12. Los resultados se muestran en la Tabla 5. En el Anexo A se presenta los cálculos realizados.

Tabla 5

Parámetros dinámicos del motor de inducción.

Parámetros	Valor
Tipo de motor.	M_{typ} 3
Factor de carga [p.u].	L_{fm} 1
Resistencia del inducido [p.u].	R_s 0.073
Reactancia síncrona [p.u].	L_s 0.899
Reactancia transitoria [p.u].	L_p 0.029

Reactancia subtransitoria [p.u].	L_{pp}	0.029
Constante de tiempo transitoria en circuito abierto [s].	T_{p0}	0.159
Constante de tiempo subtransitoria en circuito abierto [s].	T_{pp0}	0.002
Constante de inercia [s].	H	0.33
Torque mecánico de velocidad exponencial.	E_{trq}	2

6.3.1. Resultados en las pruebas de desconexión por disparo

Para la prueba de desconexión se determina el torque carga (T_C) del 100% a partir de la Ecuación 25. Donde P_m y ω_r es la potencia y la velocidad mecánica respectivamente (Stephen J. Chapman, 2012).

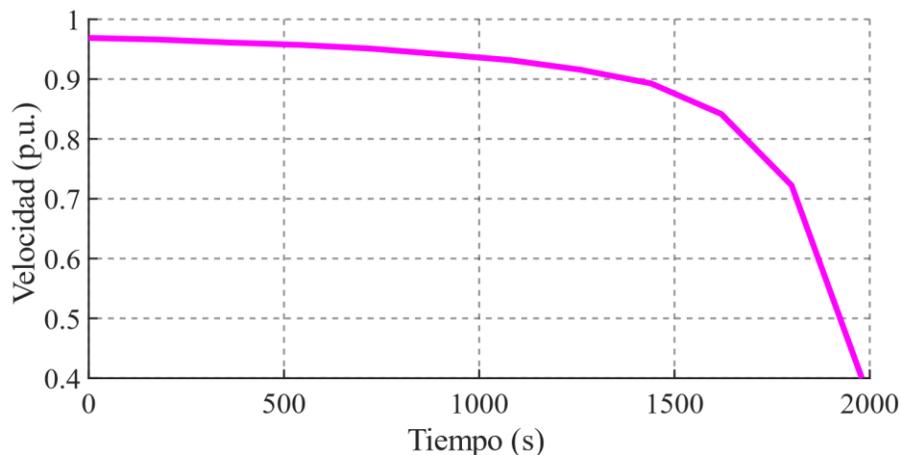
$$T_C = \frac{P_m [W]}{\omega_r \left[\frac{rad}{seg} \right]} [Nm] \quad (25)$$

Siguiendo lo establecido en el diagrama de flujo para la prueba de desconexión por disparo (ver Figura 1) se aplicó una caída de tensión al motor progresiva hasta alcanzar el disparo de la protección.

Durante la prueba, la Figura 13 muestra una disminución de la velocidad del motor debida a una caída de tensión aplicada a la prueba. La velocidad se mantiene lineal hasta 720 segundos aproximadamente cuando se tiene una tensión de 0.8 p.u. Cuando la tensión de alimentación está al 50% o ha pasado 1800 segundos, la velocidad disminuye hasta que el rotor se bloquea.

Figura 13

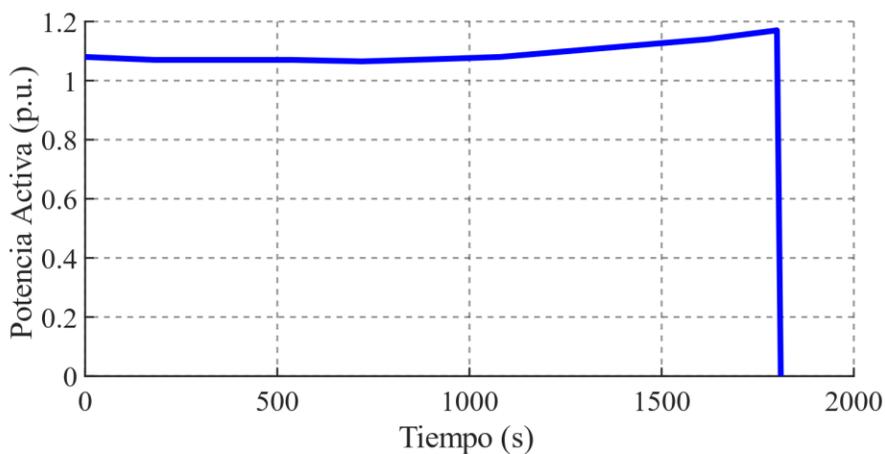
Comportamiento de la velocidad mediante prueba de desconexión por disparo



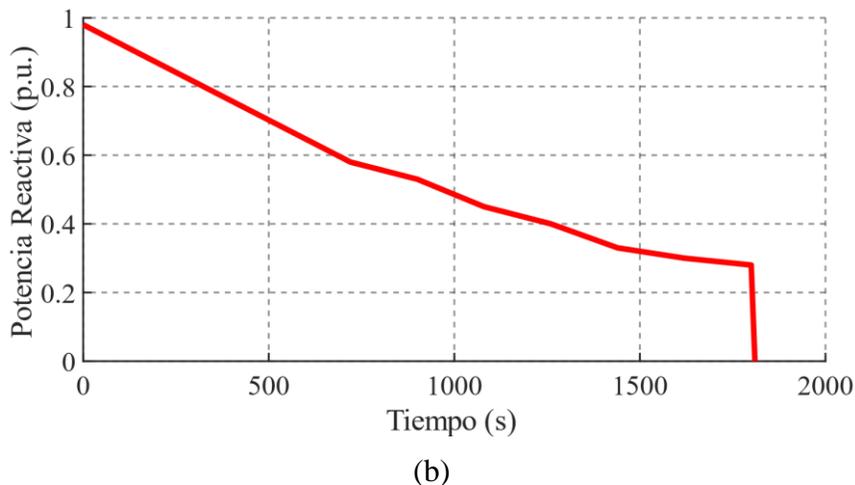
La Figura 14 muestra que las potencias activa y reactiva tienen una relación inversa en condiciones de subtensión. La potencia activa permanece estable, pero cuando la tensión cae hasta 0,8 p.u (720 segundos de la prueba), aumenta cuadráticamente hasta alcanzar la tensión de disparo. Por el contrario, la potencia reactiva disminuye desde el inicio de la prueba hasta que se alcanza el punto de disparo y se abre el circuito.

Figura 14

Comportamiento de la potencia activa (a) y reactiva (b) mediante prueba de desconexión por disparo



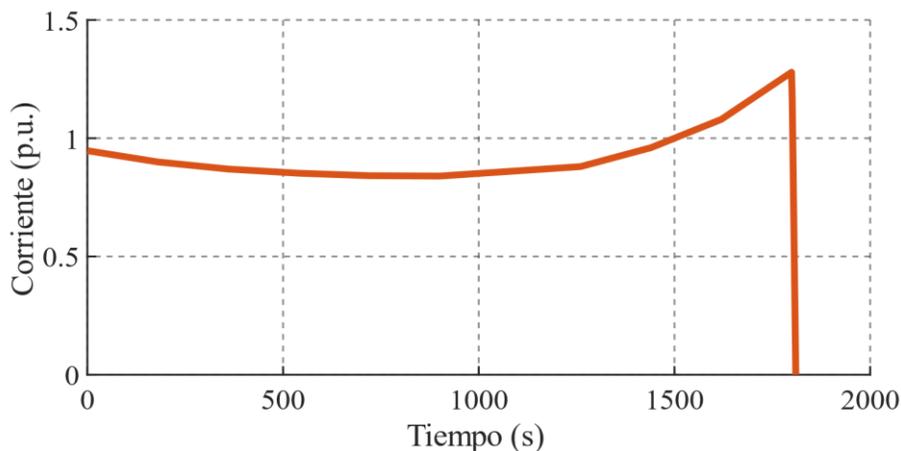
(a)



La Figura 15 presenta el comportamiento de la corriente durante la prueba. Al inicio la corriente disminuye hasta alcanzar la tensión mínima de funcionamiento en estado estable. A medida que la tensión disminuye desde 720 segundos, la corriente aumenta hasta alcanzar el punto de disparo por sobre corriente de la protección del motor, que se produce cuando la tensión es de 0,5 p.u. (1800 segundos de la prueba) La protección se disparó con una corriente de 1,28 p.u (1,6 A) al cabo de 4 segundos.

Figura 15

Comportamiento de la corriente durante la prueba de desconexión por disparo



Se realizaron dos pruebas de desconexión de la protección contra sobre corriente en el motor de inducción para evaluar cualquier discontinuidad en los resultados. La segunda prueba mostró una variación mínima, definiendo los resultados de los parámetros de desconexión del motor para su caracterización en el modelo WECC en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros de desconexión por disparo del motor de inducción.

Parámetros		Valor
Voltaje de disparo 1 ante una subtensión [p.u]	<i>Vtrl</i>	0.5
Tiempo de retardo del disparo 1 antes una subtensión [s]	<i>Ttrl</i>	4
Fracción del motor que se desconecta en el disparo 1 [p.u]	<i>Ftr1</i>	1
Voltaje de disparo 2 ante una subtensión [p.u]	<i>Vtr2</i>	0.47
Tiempo de retardo del disparo 2 antes una subtensión [s]	<i>Ttr2</i>	4
Fracción del motor que se desconecta en el disparo 2 [p.u]	<i>Ftr2</i>	1

6.3.2. Resultados en las pruebas de reconexión

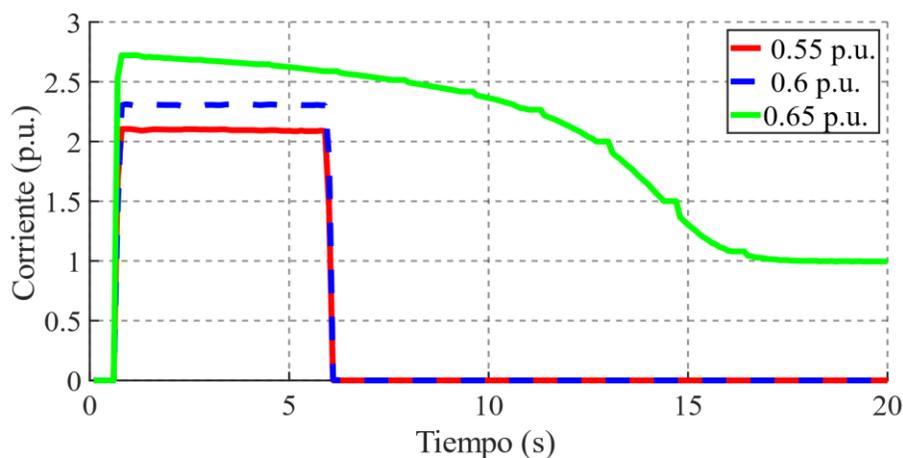
La prueba de reconexión comenzó con una tensión de alimentación de 126,5 V (0,55 p.u) bajo la misma condición de carga de 1,4 Nm que la prueba anterior, siguiendo las pautas indicadas en la Figura 2. Tras la energización, el motor permaneció bloqueado y la corriente de arranque se mantuvo en el doble de la corriente nominal. Este escenario aclara que los motores jaula de ardilla bajo carga no se reconectan al 0,55% de la tensión nominal, como se muestra en la Figura 16.

Cuando el motor se energiza con una tensión de 138 V (0,6 p.u), permanece bloqueado hasta que la reconexión del motor se produce a una tensión (*Vrc1*) de 149 V (0,65 p.u). La Figura 16 ilustra que la corriente de arranque alcanza los 2,7 A y, una vez que el motor alcanza

su velocidad nominal, la corriente se estabiliza en 1,07 A. El tiempo de reconexión (T_{rc1}), definido como el tiempo que tarda el motor en estabilizarse a la tensión de reconexión, fue de 17 segundos.

Figura 16

Comportamiento de la corriente mediante la prueba de reconexión



A través del análisis de la Figura 16, se logra la identificación de los parámetros asociados a la reconexión del motor de inducción. En este proceso, se observa que el motor se reconecta con una tensión equivalente al 0.65 de la tensión nominal. Al repetir la prueba, el tiempo de reconexión, se establece en 17 segundos. Los valores correspondientes a estos resultados se encuentran detallados en la Tabla 7.

Analizando la Figura 16, es posible identificar los parámetros asociados a la reconexión del motor de inducción. Se observa que el motor se reconecta a una tensión igual a 0,65 de la tensión nominal. Cuando se repite la prueba, se observa que el tiempo de reconexión es de 17 segundos. Los valores correspondientes a estos resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7
Parámetros de reconexión después de un disparo

Parámetros	Valor
Voltaje de reconexión ante el disparo 1 [p.u]	<i>Vrc1</i> 0.65
Tiempo de retardo en la reconexión 1 [s]	<i>Trc1</i> 17
Voltaje de reconexión ante el disparo 2 [p.u]	<i>Vrc2</i> 0.65
Tiempo de retardo en la reconexión 2 [s]	<i>Trc2</i> 15

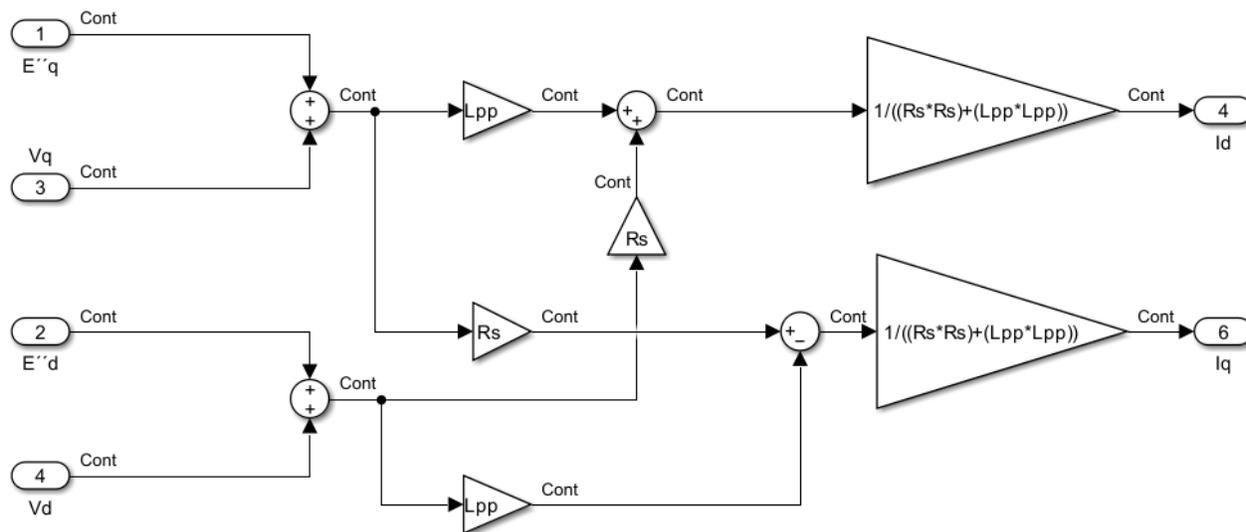
6.4. Implementación del modelo del motor de inducción trifásico

Se implemento el diagrama de bloques de la Figura 10 en Simulink MATLAB (Ver Anexo C) utilizando la representación matemática del motor de inducción trifásico como carga del modelo WECC para determinar (E'_d , E''_d , E'_q y E''_q) descritas en las Ecuaciones 14 -17. Sin embargo también se debe determinar la tensión de entrada del motor que se descompone en los ejes d y q representados por las tensiones de los ejes directo y cuadratura (V_d, V_q).

La magnitud del voltaje ($|V|$) se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de V_d y V_q (Sharawy et al., 2024). Se recomienda por Rasheduzzaman et al., (2014) que V_q debe fijarse en 0 y V_d debe ser igual al valor unitario de la magnitud de la tensión, asegurando que se tenga el valor exacto de $|V|$. Según esto se establece para una la energización del motor en el modelo un $V_d = 1$ p.u y $V_q = 0$.

Las corrientes de ejes directo y de cuadratura del motor de inducción (i_d, i_q), se determina con las Ecuaciones 19 – 20 mediante el diagrama de bloque mostrado en Figura 17, los parámetros R_s y L_{pp} , son determinados en la Tabla 5.

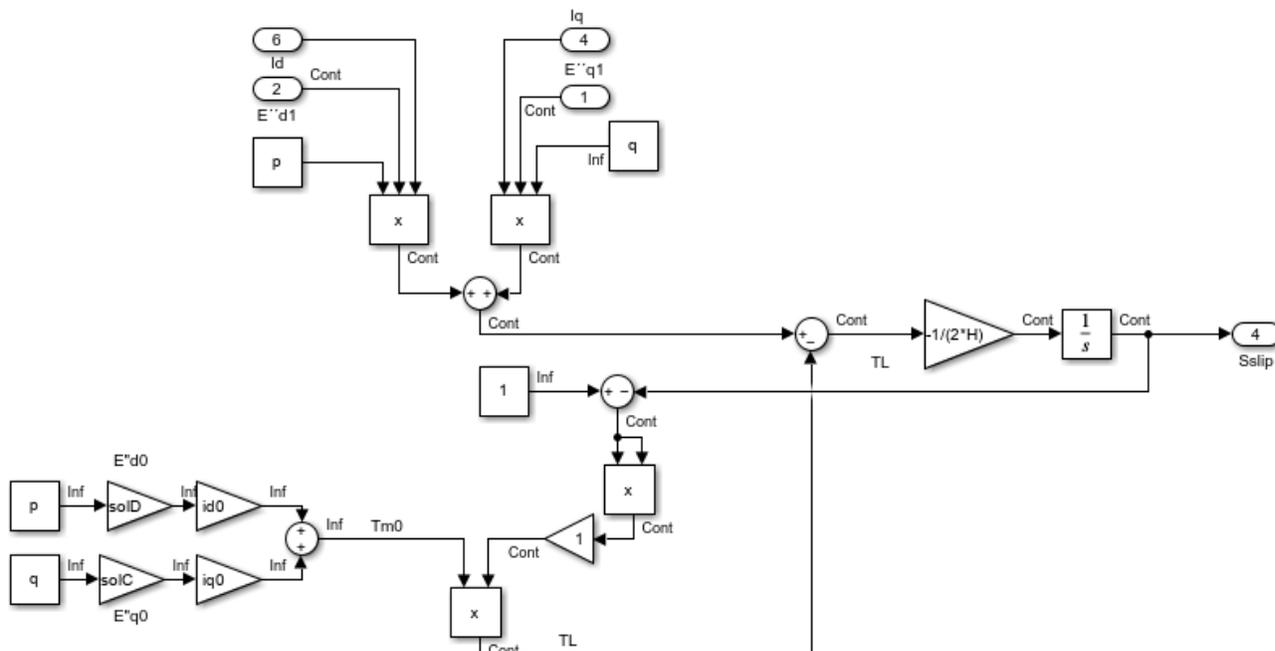
Figura 17
Diagrama de bloques para determinar I_d e I_q



El deslizamiento del rotor (SLIP), se determina mediante la Ecuación 18 como se muestra en la Figura 18 donde H representa la constante de inercia medida en segundos donde H es la constante de inercia en segundos, definida en (Galindo Hernández et al., 2010; NERC, 2016).

Las constantes p y q son igual a -1 , el torque de carga TL se determina mediante las Ecuaciones 11- 13. Donde la Ecuación 12 calcula el torque mecánico inicial (T_{m0}), la cual se basa en las tensiones subtransitorias y las corrientes iniciales en los ejes directo y de cuadratura (E''_{d0} , i_{d0} , E''_{q0} e i_{q0}); estos valores, como indica (Huang et al., 2019; Qiuhua Huang, 2017) se obtienen al resolver el sistema de ecuaciones 14 - 15, igualándolas a cero como se detalla en el Anexo B.

Figura 18
Diagrama de bloques para determinar SLIP



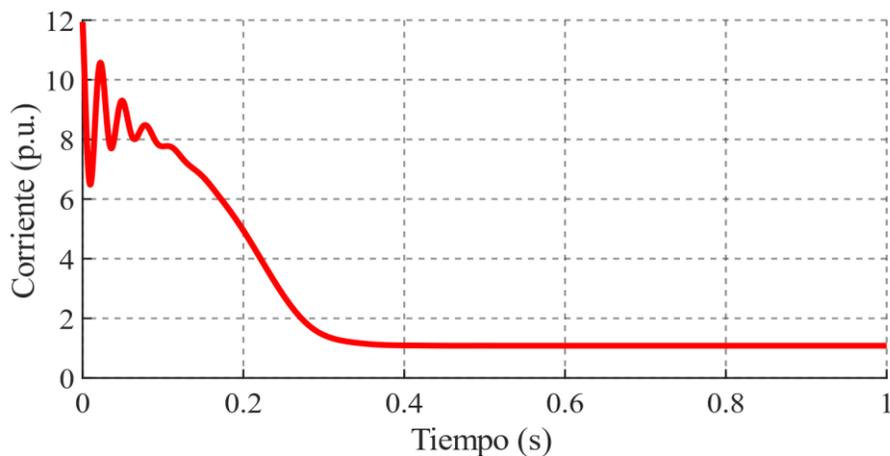
6.4.1. Simulación de energización del motor.

Se realizó la simulación de la energización del motor aplicando un escalón de 1,0 p.u. a la tensión (V_d), con el propósito de analizar el comportamiento de las variables electromecánicas durante el arranque del motor. La

Figura 19 muestra el comportamiento transitorio de la corriente durante el arranque que alcanza magnitudes de 12 A, el tiempo que tarda la corriente en estabilizarse es de 0.3 segundos. Se observa como en el primer milisegundo del arranque, se produce un transitorio de alta frecuencia, difícil de observar con dispositivos de medida.

Figura 19

Comportamiento de la corriente durante el arranque

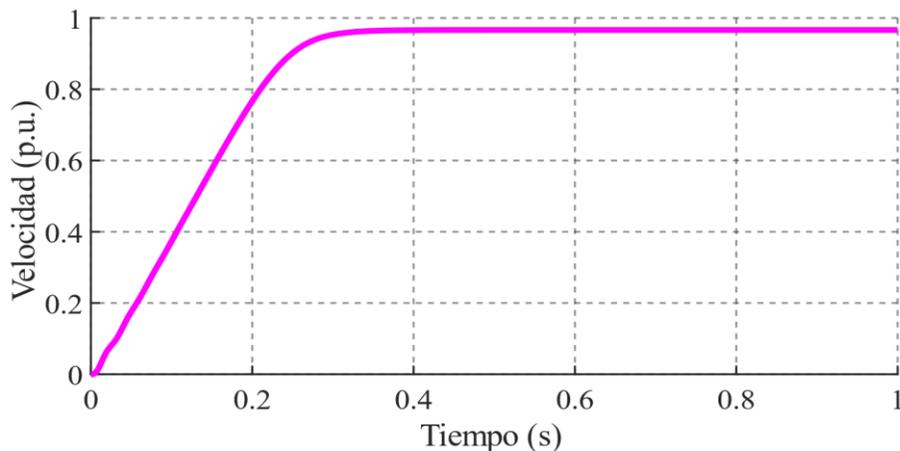


En la simulación de energización parte del motor en reposo y para arrancar necesita vencer la inercia del rotor para acelerar. Esto se refleja en el comportamiento de la corriente (ver

Figura 19), donde la corriente aumenta para acelerar el motor hasta que alcanza un estado estacionario. El comportamiento de la velocidad durante la simulación se ilustra en la Figura 21 con un tiempo de aceleración del motor de 0.3 segundos, tras el cual la velocidad alcanza un estado estacionario.

Figura 20

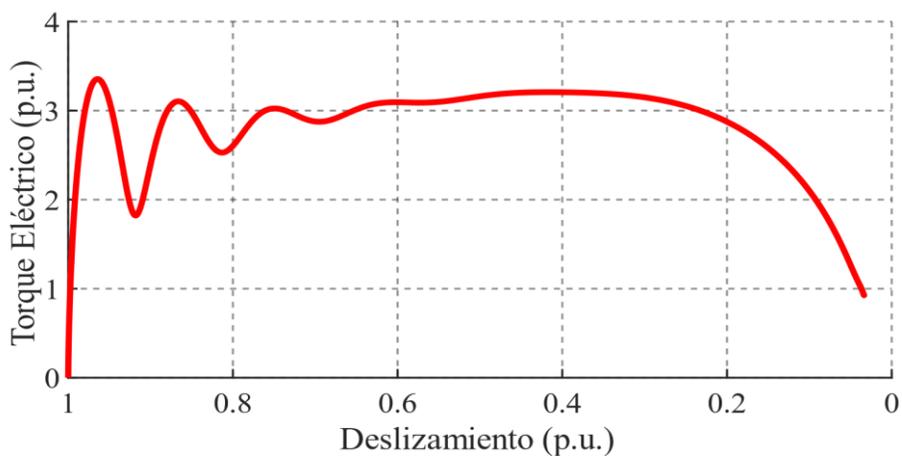
Comportamiento de la velocidad durante el arranque



La Figura 21 muestra la relación entre el torque eléctrico y el deslizamiento. Durante el arranque del motor, cuando la velocidad es cero y el deslizamiento igual a 1,0 p.u., la simulación revela efectos transitorios generados por el par eléctrico. Estos transitorios se producen cuando el rotor arranca desde el reposo y la máquina alcanza el estado estacionario. Este comportamiento es típico de los motores, donde el deslizamiento comienza en 1 y se aproxima a 0. En un motor de inducción, el deslizamiento nunca llega a 0.

Figura 21

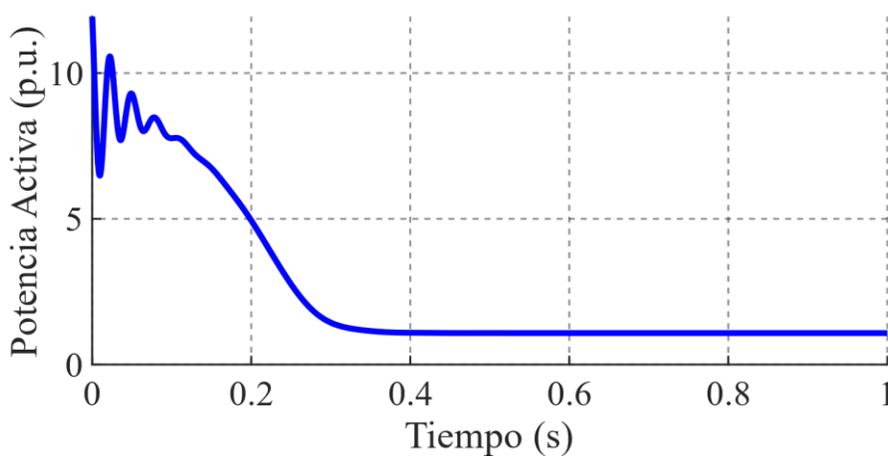
Curva torque – Deslizamiento durante el arranque del motor



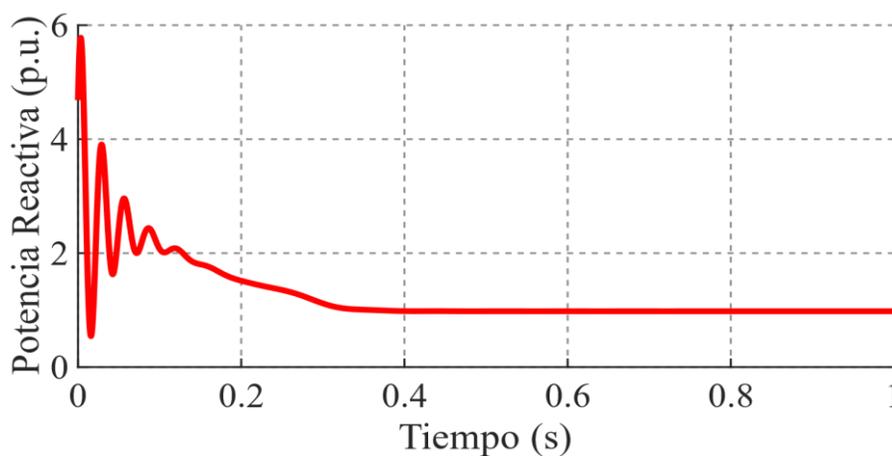
La Figura 22 muestra que el torque eléctrico se refleja en la dinámica de la potencia activa y reactiva. La potencia reactiva se comporta de forma similar a la corriente, indicando que se genera una respuesta transitoria subamortiguada durante la aceleración del rotor, que finalmente se estabiliza. La magnitud de la potencia reactiva durante el arranque es menor en comparación con la potencia activa, lo que se atribuye a que el motor arranca en condiciones de carga y requiere una mayor potencia útil de entrada.

Figura 22

Comportamiento de las potencias de entrada durante el arranque



(a)



(b)

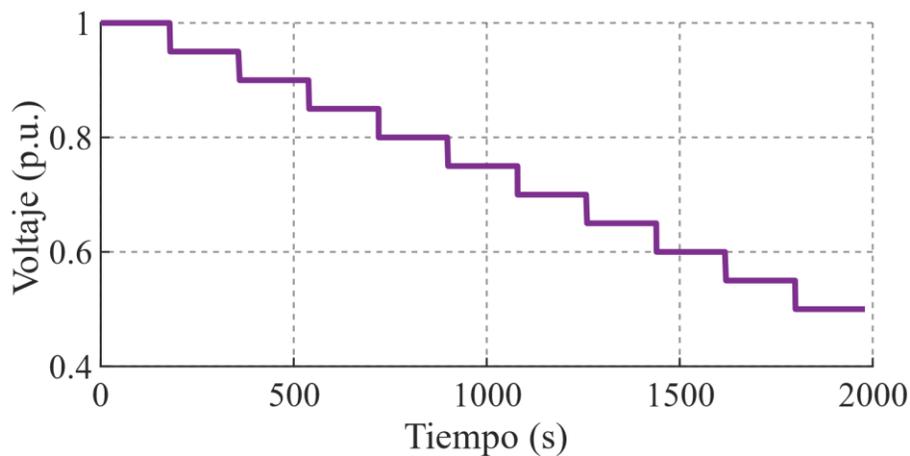
La respuesta transitoria de las variables eléctricas se ve influida por la inercia del rotor a medida que acelera desde el reposo. Esta respuesta transitoria disminuye gradualmente según el motor alcanza una velocidad estable. Las características del motor determinan la dinámica de cada variable a lo largo del proceso de subtensión.

6.5. Validación del modelo implementado.

Para validar el modelo implementado, se realizó una simulación de caída de tensión en el motor en condiciones de carga estacionaria. Además, se realizó una prueba de laboratorio para determinar la desconexión por disparo (ver Figura 1) aplicando una caída de tensión progresiva a la tensión directa del eje (V_d), como se muestra en la Figura 23. El objetivo era analizar el comportamiento de las variables electromecánicas en las simulaciones en comparación con las pruebas experimentales.

Figura 23

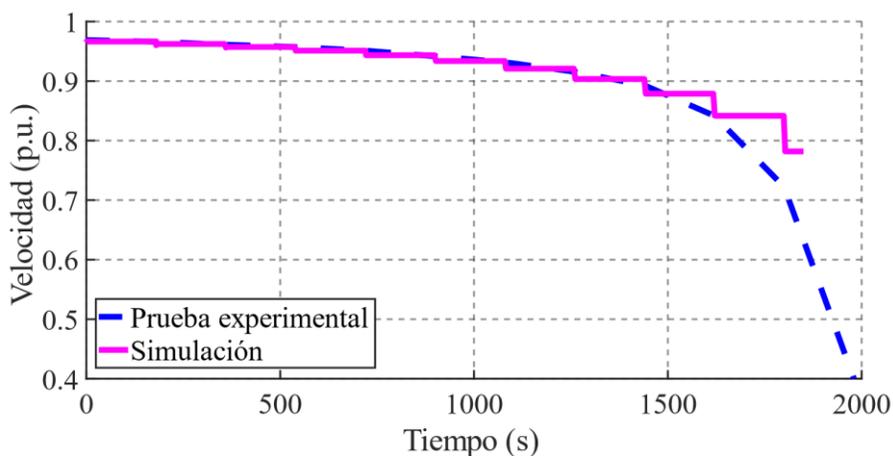
Simulación de caída de voltaje.



La Figura 24 muestra la comparación del comportamiento de la velocidad entre la prueba experimental y la simulación. Al tratarse de un motor de inducción, se fijó la velocidad síncrona (1800 rpm) como velocidad base. Al comienzo de la simulación, se registró una velocidad de 1755 rpm (0,975 p.u.). A medida que se aplica una caída de tensión, la velocidad disminuye. Cabe señalar que la simulación presenta dos aspectos: en primer lugar, la simulación de la caída de tensión se realizó utilizando funciones escalonadas; en segundo lugar, el modelo no dispone de protección contra sobre corriente, por lo que la prueba se realizó hasta 1800 segundos.

Figura 24

Respuesta de la velocidad durante la subtensión

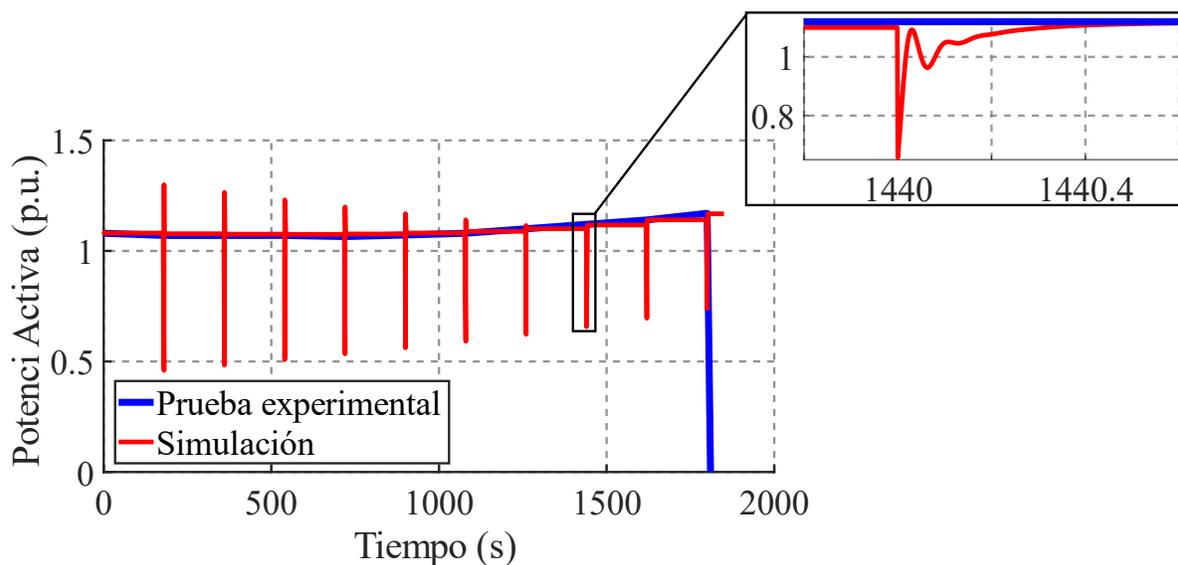


Las curvas de velocidad mostradas en la Figura 24 muestran un comportamiento similar, con una disminución cuando se aplica la subtensión. Esto pone de manifiesto la tendencia de los motores de inducción bajo carga a reducir la velocidad en respuesta a las caídas de tensión. En el caso del motor sometido a prueba, se produce una caída de tensión más pronunciada a partir de 0,7 p.u de tensión (1080 segundos) donde el cambio de la velocidad es más notable en el rotor.

El comportamiento de la potencia activa durante las condiciones de subtensión se ilustra en la Figura 25, que muestra una comparación entre las respuestas experimentales y de simulación. Aunque ambas muestran similitudes, los efectos transitorios inducidos por las caídas de tensión son evidentes en los resultados de la simulación, debido al cambio del voltaje se genera un comportamiento transitorio sub amortiguado en la potencia activa. La respuesta experimental de la potencia permanece estable hasta que la caída de tensión alcanza 0,8 p.u (720 segundos de la prueba), momento en el que ambos resultados aumentan de magnitud, dando lugar al disparo de la protección a 0,5 p.u. de tensión.

Figura 25

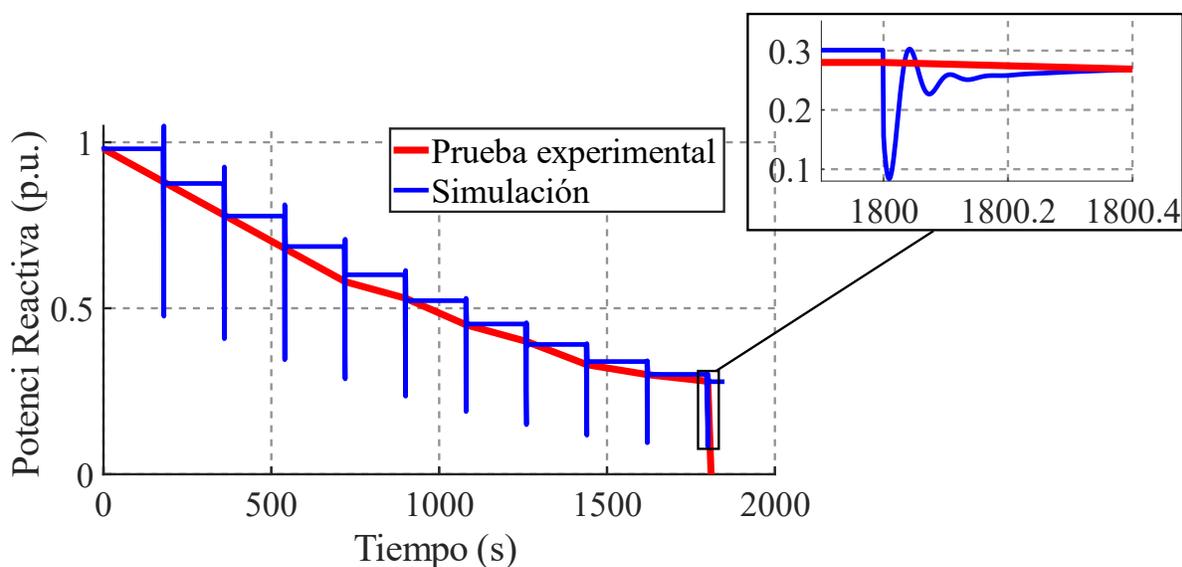
Respuesta de la potencia activa durante la subtensión



La Figura 26 muestra una disminución de la potencia reactiva tanto en los resultados experimentales como en los de simulación a medida que aumenta la caída de tensión. La simulación muestra transitorios subamortiguados con aumentos de potencia reactiva atribuidos a

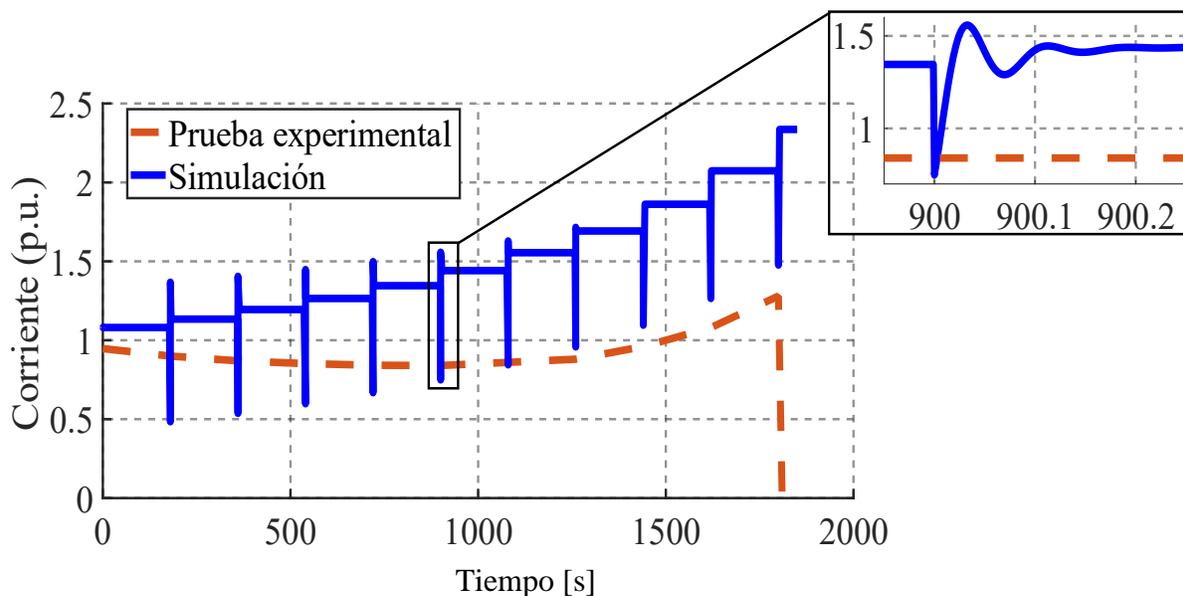
las variaciones de tensión para mantener la estabilidad del sistema. Estos transitorios están inducidos principalmente por las rápidas variaciones de tensión durante las condiciones de subtensión.

Figura 26
Respuesta de la potencia reactiva durante la subtensión



Además de la disminución de la potencia reactiva y el consiguiente aumento del consumo de potencia reactiva, el aumento de la corriente también se muestra en la Figura 27. Como los niveles de tensión disminuyen durante las condiciones de subtensión, la impedancia del sistema permanece relativamente constante. Como resultado, para mantener el mismo flujo de potencia, la corriente debe aumentar proporcionalmente para compensar la tensión reducida. Por lo tanto, la combinación de la disminución de la tensión y el aumento de la demanda de potencia reactiva da como resultado un aumento del consumo de corriente en el sistema.

Figura 27
Respuesta de la corriente durante la subtensión



La comparación de las respuestas de las simulaciones con las pruebas experimentales presenta una notable discrepancia en el cambio de la tensión aplicada durante la prueba. Mientras que la prueba experimental registro una corriente inicial de 0,97 p.u, la simulación registro 1,15 p.u. Esta diferencia puede atribuirse a que el ajuste del par de carga del motor durante la prueba de laboratorio no fue precisamente del 100%, mientras que en la simulación se calibró exactamente al 100% de la carga.

La simulación de la corriente según Figura 27, presenta unos transitorios amortiguado ocasionados por el cambio del voltaje. Por el contrario, los resultados de las pruebas

experimentales no registraron transitorios debido a los dispositivos de medición utilizados y a su rango de medición limitado, que impide captar este comportamiento del motor.

7. Conclusiones

Como se presenta en este documento, el fenómeno de recuperación lenta de la tensión inducido por las fallas no está adecuadamente representado por los modelos de carga tradicionales utilizados en el análisis de los sistemas eléctricos. Dado el impacto significativo de este fenómeno, particularmente debido al bloqueo de motores a nivel industrial, es crucial disponer de herramientas apropiadas para evaluar sus efectos en los estudios de estabilidad de tensión dentro del sistema eléctrico.

El trabajo comenzó con la identificación de parámetros mediante el análisis de resultados de pruebas de laboratorio y cálculos matemáticos para la modelización. Los resultados de la prueba de desconexión por disparo y reconexión revelaron que el motor de inducción de jaula de ardilla con ranuras profundas (Motor B) se desconecta a una caída de tensión de 0,5 p.u. y se reconecta a 0,65 p.u. Este estudio proporciona una base para el análisis de varios motores trifásicos que se encuentran comúnmente en la industria, facilitando la caracterización de estas cargas en condiciones de caída de tensión y diferentes tipos de entornos.

La implementación del diagrama de bloques de quinto orden empleado en por el WECC para la representación de la carga del motor de inducción realizada en la herramienta de simulación Simulink/MATLAB, permite analizar las respuestas transitorias y subtransitorias del motor, desde el arranque hasta el comportamiento ante perturbaciones como caídas de tensión. La validación del modelo mediante la simulación de pruebas experimentales en condiciones de

subtensión confirma la precisión del modelo, alineándose con el comportamiento de variables electromecánicas como la velocidad, la potencia activa, la potencia reactiva y la corriente durante la perturbación.

Un análisis cuantitativo de las variables electromecánicas obtenido a partir de simulaciones y pruebas experimentales reveló que cuando el motor funciona a plena carga y experimenta una caída de tensión en los terminales, la velocidad del rotor disminuye. Para mantener la misma potencia mecánica de salida, es necesario aumentar la corriente y la potencia activa. Además, los resultados indicaron una reducción de la potencia reactiva del motor.

Esta disminución de potencia puede dar lugar a un notable aumento del consumo de reactiva dentro del sistema eléctrico, lo que potencialmente puede provocar bloqueos del motor y agravar aún más los problemas asociados a la recuperación lenta de la tensión (FIDVR) y la estabilidad de voltaje. Por consiguiente, es importancia comprender esta dinámica para desarrollar estrategias que mitiguen los efectos de tensión y mejoren la estabilidad del sistema eléctrico.

8. Recomendaciones

En futuros trabajos se deberá centrarse en el desarrollo de una metodología detallada para la identificación de parámetros en toda una gama de motores utilizados en la industria. Esto permitirá caracterizar la carga dinámica de los motores para estudios de recuperación de tensión retardada. Además, los resultados deberían validarse mediante pruebas de laboratorio para facilitar la comparación con los resultados del mundo real y permitir el ajuste de los modelos implementados para representar con precisión los motores de inducción trifásicos en los sistemas de potencia.

La comparación de los resultados del modelo con los registros de campo reales también puede servir para validar el modelo implementado. Esto garantizaría la fiabilidad y precisión del modelo, permitiendo simulaciones precisas de caídas de tensión en sistemas eléctricos utilizando software de transmisión. Aumentar la precisión del modelo y ajustar los parámetros para adaptarlos a los diversos comportamientos de los motores contribuirá a mejorar las predicciones y el rendimiento en diversas aplicaciones de sistemas eléctricos.

9. Referencias Bibliográficas

- Apostolov, A. P. (2020). Challenges and solutions for fault induced delayed voltage recovery (FIDVR). *15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2020)*, 1–6. <https://doi.org/10.1049/cp.2020.0139>
- Aree, P. (2023). Third-Order Polar-Coordinate Model of Induction Motor Load. *2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, 140–143. <https://doi.org/10.1109/ICEAST58324.2023.10157467>
- Arif, A., Wang, Z., Wang, J., Mather, B., Bashualdo, H., & Zhao, D. (2018). Load Modeling—A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 5986–5999. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2700436>
- Bu, F., Ma, Z., Yuan, Y., & Wang, Z. (2020). WECC Composite Load Model Parameter Identification Using Evolutionary Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 5407–5417. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3008730>
- Chen, Y., Wu, H., Shen, Y., Meng, X., & Ju, P. (2022). A Fast Parameter Identification Method for Composite Load Model Based on Jumping and Steady-State Points of Measured Data. *IEEE Access*, 10, 97665–97676. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206380>
- Galindo Hernández, José Jonathan, M. U. P., & Oscar Villarreal Martínez. (2010). *Determinación de la constante de inercia de máquinas síncronas de laboratorio*. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/8554/1/90.pdf>
- González Vélez, J. C. (2019). *Modelo de carga electrónica en sistemas de distribución para el análisis de estabilidad en sistemas de energía eléctrica* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76931>

- Huang, Q., Huang, R., Palmer, B. J., Liu, Y., Jin, S., Diao, R., Chen, Y., & Zhang, Y. (2019). A generic modeling and development approach for WECC composite load model. *Electric Power Systems Research, 172*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.02.027>
- IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (2017). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8291810>
- Khazeiynasab, S. R., Zhao, J., & Duan, N. (2022). WECC Composite Load Model Parameter Identification Using Deep Learning Approach. *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM48719.2022.9916921>
- Kim, J.-K., An, K., Ma, J., Shin, J., Song, K.-B., Park, J.-D., Park, J.-W., & Hur, K. (2016). Fast and Reliable Estimation of Composite Load Model Parameters Using Analytical Similarity of Parameter Sensitivity. *IEEE Transactions on Power Systems, 31*(1), 663–671. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2409116>
- Liao, W., Zhang, Y., & Zhou, R. (2020). Analytical method to calculate transient responses of induction motor load. *IET Generation, Transmission & Distribution, 14*(16), 3221–3229. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6107>
- Liu, Y., Zhang, Y., Huang, Q., Kundu, S., Tang, Y., James, D., Etingov, P., Mitra, B., & Chassin, D. P. (2018). Impact of Building-Level Motor Protection on Power System Transient Behaviors. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586530>
- Ma, Z., Cui, B., Wang, Z., & Zhao, D. (2021). Parameter Reduction of Composite Load Model Using Active Subspace Method. *IEEE Transactions on Power Systems, 36*(6), 5441–5452. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3078671>

- Ma, Z., Wang, Z., Wang, Y., Diao, R., & Shi, D. (2020). Mathematical Representation of WECC Composite Load Model. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(5), 1015–1023. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000296>
- McCormick, K. (2023). *Distribution Level Composite Load Modeling* [University of Pittsburgh]. <http://d-scholarship.pitt.edu/44490/>
- NERC. (2016). *Technical Reference Document Dynamic Load Modeling*. <https://www.nerc.com/comm/PC/LoadModelingTaskForceDL/Dynamic%20Load%20Modeling%20Tech%20Ref%202016-11-14%20-%20FINAL.PDF>
- North American Electric Reliability Corporation (NERC). (2016). *Dynamic Load Modeling*. <https://www.nerc.com/comm/PC/LoadModelingTaskForceDL/Dynamic%20Load%20Modeling%20Tech%20Ref%202016-11-14%20-%20FINAL.PDF>
- P Kundur. (1994). *Power System Stability and Control* (McGraw, Ed.). <https://dl.poweren.ir/downloads/PowerEn/Book/2019/Jun/Power%20System%20Stability%20and%20Control%20-%20Prabha%20Kundur%20%28PowerEn.ir%29.pdf>
- Paredes, L. A., Molina, M. G., & Serrano, B. R. (2023). Enhancing Dynamic Voltage Stability in Resilient Microgrids Using FACTS Devices. *IEEE Access*, 11, 66150–66176. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291009>
- Paul C. Krause, O. W. S. D. S. S. D. P. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd Edition* (IEEE Press, Ed.). <https://www.worldcat.org/es/title/analysis-of-electric-machinery-and-drive-systems/oclc/829239960>

Qihua Huang, R. H. B. J. P. Y. L. S. J. R. D. Y. C. Y. Z. (2017). *A Reference Implementation of WECC Composite Load Model in Matlab and GridPACK*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.00939>

Rahmani, S., & Rezaei-Zare, A. (2019). Prediction of System Voltage Recovery due to Single Phase Induction Motor Stall Using Machine Learning Techniques. *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 1, 128–134.

<https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2019.8887819>

Rasheduzzaman, M., Mueller, J. A., & Kimball, J. W. (2014). An Accurate Small-Signal Model of Inverter- Dominated Islanded Microgrids Using dq Reference Frame. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(4), 1070–1080.

<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2338131>

Sharawy, M., A. Shaltout, A., Mohammed Youssef, O. E.-S., A. Al-Ahmar, M., Abdel-Rahim, N., & Sutikno, T. (2024). Maximum allowable hp rating of 3-phase induction motor fed through a stand-alone constant V/f controlled DFIG via RSC. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(2), 832–844. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6088>

Smart Buildings, L. and C. S. C. of the I. P. and E. S. (2022). *IEEE Guide for Load Modeling and Simulations for Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9905546>

Stephen J. Chapman. (2012). *Maquinas Electricas* (MCGRAW-HILL, Ed.; 5th ed.).

<https://ia803201.us.archive.org/8/items/266539159MaquinasElectricasChapman5taEdicionPdf/266539159-Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf>

- Tan, B., Zhao, J., & Duan, N. (2023). Amortized Bayesian Parameter Estimation Approach for WECC Composite Load Model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1–13.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3250579>
- Wang, X., Wang, Y., Shi, D., Wang, J., & Wang, Z. (2020). Two-Stage WECC Composite Load Modeling: A Double Deep Q-Learning Networks Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(5), 4331–4344. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2988171>
- Zhang, K., Guo, S., & Zhu, H. (2017). *Parameter Sensitivity and Dependency Analysis for the WECC Dynamic Composite Load Model*. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.383>
- Zhang, K., Zhu, H., & Guo, S. (2017). Dependency Analysis and Improved Parameter Estimation for Dynamic Composite Load Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 3287–3297. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2623629>
- Zhaoyu Wang, F. B. Z. M. Y. X. (2021). *Data-Driven and Machine Learning-Based Load Modeling*.
https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2021_reports/S_84G_Final_Report.pdf

10. Anexos

Anexo A. Script MATLAB. Determinación de circuito equivalente en p.u.

```

% Prueba en vacío (Estrella)
V_v = 395.7;           %[V]
I_v = 0.615;          %[A]
F_v = 60;             %[Hz]
P_v = 157;            %[W]
% Prueba DC
V_DC = 43.2;          %[V]
I_DC = 0.72;          %[A]
% Prueba de Rotor Bloqueado (Estrella)
V_RB = 54.5192;       %[V]
I_RB = 0.715;         %[A]
F_RB = 60;            %[Hz]
P_RB = 65;            %[W]

% De la prueba Cd se obtiene Rs
Rs_ohm1 = V_DC/(2*I_DC);           %Resistencia del estator (RS).
% De la prueba en vacío:
Vsc = V_v/sqrt(3);
Zcs = Vsc/I_v;                      % Xs + Xm.
% Cuando se conoce X1, se puede encontrar XM. Las pérdidas en el cobre del
%estator son:
Ppce = 3*(I_v^2)*Rs_ohm1;
% Por lo tanto, las pérdidas giratorias en vacío son:
Prot = P_v-Ppce;
% La impedancia del rotor bloqueado es:
Zrb = (V_RB/(sqrt(3)*I_RB));
% y el ángulo de impedancia es:
Tetta = acosd(P_RB/(sqrt(3)*V_RB*I_RB));
% Por lo tanto,
Rrb = Zrb*cosd(Tetta);               % Rs + Rr.
Rr_ohm1 = abs(Rs_ohm1-Rrb);          % Resistencia del rotor (Rr).
Xrb_1 = Zrb*sind(Tetta);

% por lo que: Xs = Xr
Xs_ohm1 = 0.4*Xrb_1;                 % Reactancia de fuga del estator
(Xs).
Xr_ohm1 = 0.6*Xrb_1;                 % Reactancia de fuga del rotor
(Xr).
Xm_ohm1 = abs(Zcs)-Xs_ohm1;         % Reactancia de fuga magnética
(Xm).

%Circuito equivalente (Ohm):
Rs_ohm = Rs_ohm1;                    % Resistencia del estator (RS).
Rr_ohm = Rr_ohm1;                    % Resistencia del rotor (Rr).

```

```

Xs_ohm = Xs_ohm1;           % Reactancia de fuga del estator
(Xs).
Xr_ohm = Xr_ohm1;           % Reactancia de fuga del rotor
(Xr).
Xm_ohm = Xm_ohm1;           % Reactancia de magnetización
(Xm).

%Circuito equivalente (P.U):
Vbase = V_v;                 % Según Prueba en vacío.
Sbase = 378.7878788;         % Según datos de placa donde S =
P/fp.
den = ((Vbase)^2)/Sbase;
Rs_Pu = Rs_ohm/den           % Resistencia del estator en
p.u.
Rr_Pu = Rr_ohm/den           % Resistencia del rotor en p.u.
Xs_Pu = Xs_ohm/den           % Reactancia de fuga del estator
en p.u.
Xr_Pu = Xr_ohm/den           % Reactancia de fuga del rotor
en p.u.
Xm_Pu = Xm_ohm/den           % Reactancia de magnetización en
p.u.

```

Anexo B. Script MATLAB. Determinación de E''_{d0} , i_{d0} , E''_{q0} e i_{q0}

%% Parametros para el modelo:

```
Rs = Rs_Pu % Resistencia de armadura [p.u]
Ls = Xs_Pu+Xm_Pu % Reactancia sincrónica [p.u]
Lp = Xs_Pu+((Xr_Pu*Xm_Pu) / (Xr_Pu+Xm_Pu)) % Reactancia transitoria [p.u]
Lpp = Lp % Reactancia subtransitoria
[p.u]
Tpo = (Xs_Pu+Xm_Pu)/(W0*Rr_Pu) % Constante de tiempo
transitoria [s]
Tppo = 0.002 % Constante de tiempo
subtransitoria [s]
H = 0.33 %Inercia [s]
```

%% Ecuacion lineal para determinar E''_{q0} , E''_{d0} , i_{d0} y i_{q0}

% $E'_{q0} = A$, $E'_{d0} = B$, $E''_{q0} = C$ y $E''_{d0} = D$.

syms A B C D

```
s=0.05; % Deslizamiento nominal
W0 = 188.4955; % Velocidad Sincrona [Rad/seg]
```

```
Eq1 = (1/Tpo)*((-A-(((1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*(1+D)))+(Lpp*C))))*(Ls-Lp))-
(B*W0*s*Tpo))=0;
```

```
Eq2 = (1/Tpo)*((-B+(((1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*C)+(Lpp*(1+D))))*(Ls-
Lp)))+(A*W0*s*Tpo))=0;
```

```
Eq3 = (((Tpo-Tppo)/(Tpo*Tppo))*A)-((((Tppo*(Ls-Lp)))+(Tpo*(Lp
Lpp)))/(Tpo*Tppo))*((1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*(1+D)))+(Lpp*C))))-((1/Tppo)*C)-
(W0*s*D)=0;
```

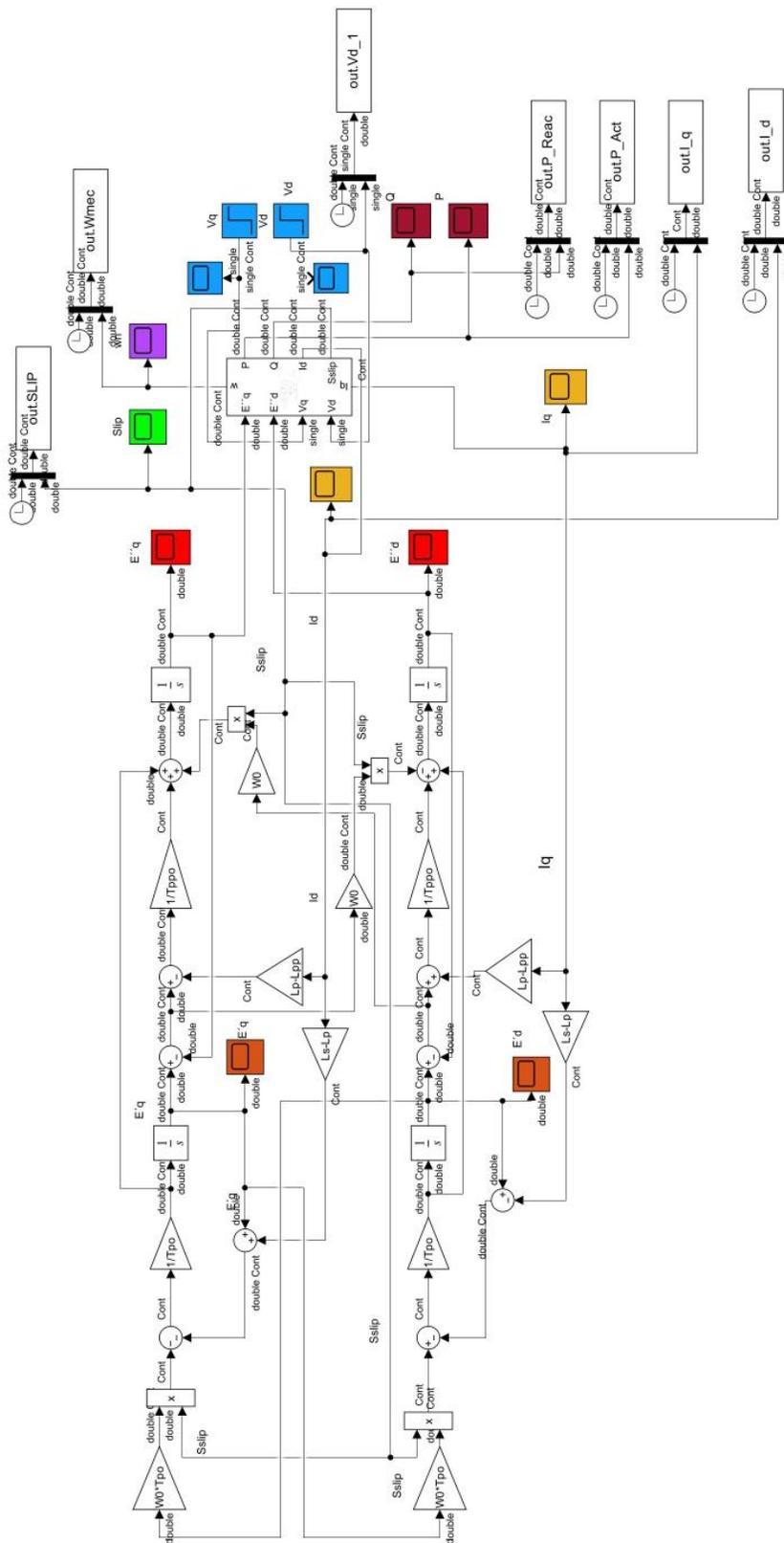
```
Eq4 = (((Tpo-Tppo)/(Tpo*Tppo))*B)+((((Tppo*(Ls-Lp)))+(Tpo*(Lp-
Lpp)))/(Tpo*Tppo))*((1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*C)+(Lpp*(1+D)))))-
((1/Tppo)*D)+(W0*s*C)=0;
```

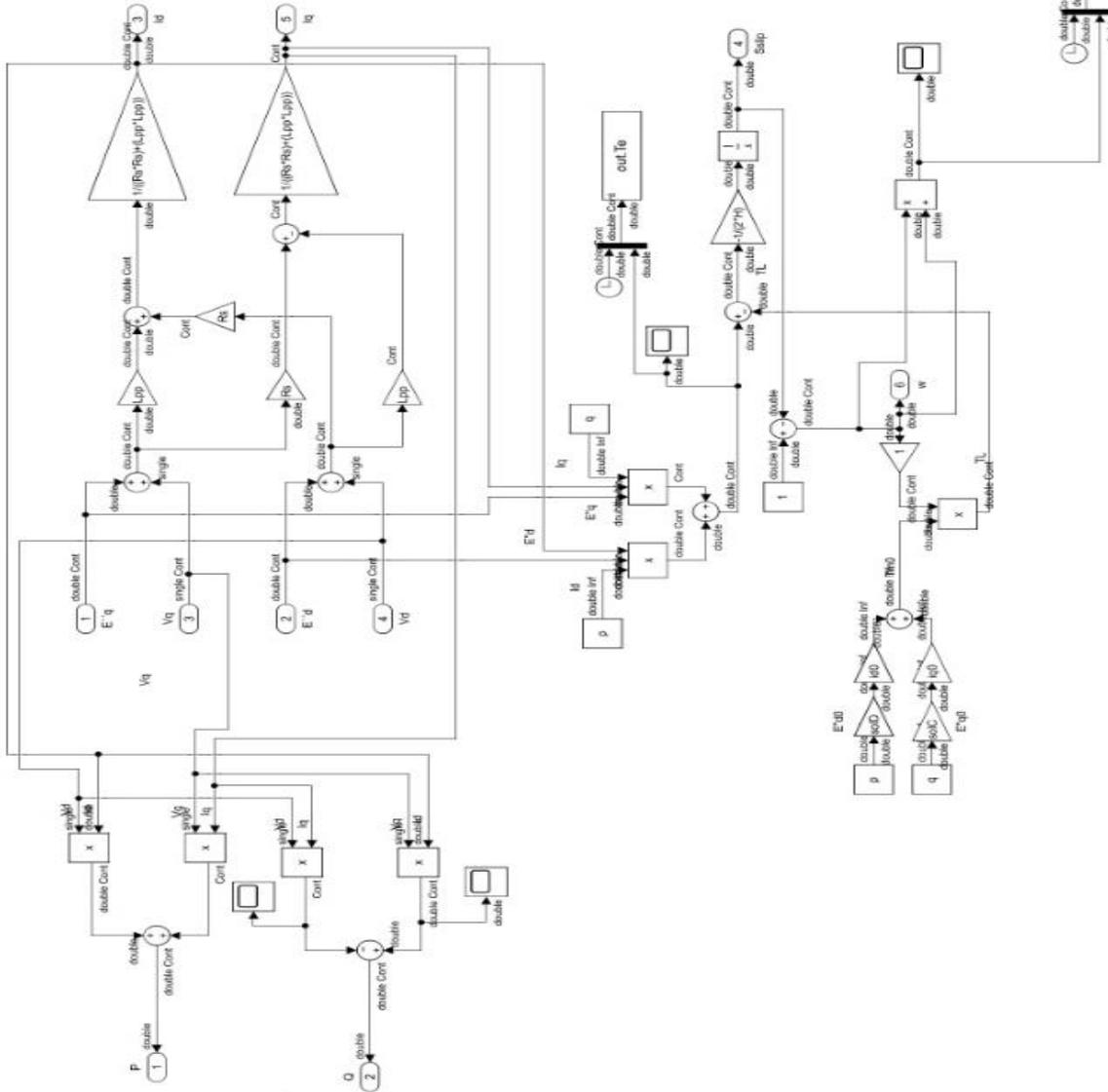
```
sol = solve([Eq1 Eq2 Eq3 Eq4],[A B C D]);
```

```
solA = double(sol.A); %  $E'_{q0}$ 
solB = double(sol.B); %  $E'_{d0}$ 
solC = double(sol.C); %  $E''_{q0}$ 
solD = double(sol.D); %  $E''_{d0}$ 
```

```
id0 = (1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*(1+solD)))+(Lpp*solC);
iq0 = (1/(Rs^2 + Lpp^2))*((Rs*solC)-(Lpp*(1+solD)));
```

Anexo C. Modelo en Simulink





$$P = V_d i_d + V_q i_q$$

$$Q = V_q i_q - V_d i_d$$

$$i_d = \frac{r_s}{r_s^2 + L_{pp}^2} (V_d + E'_d) + \frac{L_{pp}}{r_s^2 + L_{pp}^2} (V_q + E'_q)$$

$$i_q = \frac{r_s}{r_s^2 + L_{pp}^2} (V_q + E'_q) - \frac{L_{pp}}{r_s^2 + L_{pp}^2} (V_d + E'_d)$$

$$\dot{S}_{slip} = -\frac{pE'_d i_d + qE'_q i_q - TL}{2H}$$

$$TL = T_{m1} (AW^2 + BW + C + DW^{-1})$$

$$T_{m1} = pE'_{d0} i_{d0} + qE'_{q0} i_{q0}$$

$$W = 1 - S_{slip}$$

