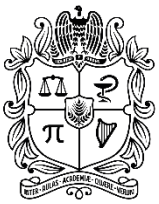

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

IMPACTO DEL MODELO DE CARGA EN EL DESEMPEÑO DINÁMICO DE LA TENSIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Juan Daniel Galindo Ramirez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2024

IMPACTO DEL MODELO DE CARGA EN EL DESEMPEÑO DINÁMICO DE LA TENSIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Juan Daniel Galindo Ramirez

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Directora:

Ph.D Neby Jennyfer Castrillón Gutiérrez

Línea de Investigación:

Sistemas Eléctricos de Potencia y Optimización

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2024

A Ana Ines Cala, mi madre. Todos mis logros son tuyos.

A mi hermana y sobrinos por la confianza y motivación.

A Andrea Valero, por su incondicional amor y apoyo.

A la profesora Neby Castrillón por su constante apoyo y paciencia.

Resumen

Esta tesis evalúa el impacto de diferentes modelos de carga en el desempeño dinámico de la tensión en sistemas eléctricos de potencia sometidos a perturbaciones, utilizando el sistema IEEE de 39 barras como caso de estudio y realizando simulaciones en el software DIgSILENT PowerFactory. Se exploran varios modelos, incluyendo el modelo WECC (Western Electricity Coordinating Council), Modelo ZIP (Impedancia constante, corriente y potencia constantes), Modelo Exponencial, Modelo Complejo y la combinación de Motor de Inducción con modelo ZIP. Los modelos de carga fueron parametrizados mediante la optimización de sus parámetros utilizando el método Nelder-Mead, comparando la respuesta dinámica de la tensión de cada modelo con la del modelo WECC.

El estudio se centra en evaluar cómo la elección del modelo de carga influye en la respuesta de la tensión en los nodos de los sistemas eléctricos de potencia en condiciones de fallas. Los resultados subrayan la importancia crítica de seleccionar y parametrizar adecuadamente los modelos de carga, demostrando que cada modelo tiene la capacidad de capturar dinámicas específicas del sistema que otros no logran representar.

Este análisis resalta la relevancia práctica del modelado de carga para la estabilidad de tensión, orientando hacia la implementación de modelos más precisos y efectivos en los análisis dinámicos de un sistema eléctrico de potencia. Así, se contribuye a un modelado más confiable de los SEP, asegurando una planificación más fiable de estos.

Palabras clave: Modelo de carga eléctrica, Modelo WECC, respuesta dinámica de la tensión.

Abstract

IMPACT OF LOAD MODEL ON THE DYNAMIC VOLTAGE PERFORMANCE OF AN ELECTRIC POWER SYSTEM

This thesis evaluates the impact of different load models on the dynamic voltage performance in power systems under disturbances, using the IEEE 39-bus system as a case study and performing simulations in DIgSILENT PowerFactory software. Various models are explored, including the WECC (Western Electricity Coordinating Council) model, ZIP Model (Constant Impedance, Constant Current, Constant Power), Exponential Model, Complex Model, and the combination of Induction Motor with ZIP Model. The load models were parameterized by optimizing their parameters using the Nelder-Mead method, comparing the dynamic voltage response of each model with the WECC model.

The study focuses on assessing how the choice of load model influences the voltage response of the power system during faults. The results highlight the critical importance of proper selection and parameterization of load models, demonstrating that each model has the capability to capture specific system dynamics that others may fail to represent.

This analysis underscores the practical relevance of load modeling for voltage stability and guides the implementation of more accurate and effective models in dynamic analyses of power systems. In doing so, it contributes to a more reliable modeling of power systems, ensuring more dependable system planning.

Keywords: Electric load model, WECC model, dynamic voltage response.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **VII**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XVI**

Introducción **19**

Objetivos **22**

1. Estado del arte **23**

2. Modelos de Carga Eléctrica **27**

2.1 Marco teórico 28

2.2 Selección de modelos de carga 49

2.3 Metodología implementada para la parametrización de los modelos de carga 51

3. Desempeño dinámico de la tensión **55**

3.1 Marco teórico 55

3.2 Indicadores de desempeño dinámico de tensión basado en la experiencia de operadores de SEP 63

3.3 Selección de indicador para evaluar el desempeño dinámico de la tensión 68

4. Caso de estudio **71**

4.1 Parametrización de los modelos 72

4.2 Desempeño dinámico de la tensión 76

4.3 Análisis comparativo 83

5. Conclusiones y recomendaciones **87**

5.1 Conclusiones 87

5.2 Recomendaciones 88

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 Modelos de carga utilizados en la industria para (a) análisis de estado estacionario y estudios dinámicos (b) potencia activa y (c) potencia reactiva [3]. 28

Figura 2. Impacto de carga constante en la estabilidad de tensión [4]. 32

Figura 3. Circuito equivalente del motor de inducción. 33

Figura 4. Modelo ZIP+Motor de inducción 35

Figura 5. Modelo complejo de carga (CLOD 36

Figura 6. Estructura del modelo compuesto de carga WECC 38

Figura 7. Diagrama de bloques del motor de inducción trifásico. 39

Figura 8. Esquema del modelado del motor D [16]. 42

Figura 9. Característica de potencia vs tensión del modelo del aire acondicionado monofásico [15]. 43

Figura 10. Característica de potencia activa/reactiva vs tensión del modelo de carga electrónica. 44

Figura 11. Modelado de Carga Basado en Componentes. [16] 46

Figura 12. Metodología para la estimación de parámetros de los modelos de carga. 53

Figura 13. Esquemático de la interfaz Python y Power Factory 54

Figura 14. Clasificación de la estabilidad en los SEP.[23] 56

Figura 15. Recuperación de Voltaje Retrasada Típica Después de una Falla de Transmisión de 230 kV en el Sur de California. [26] 58

Figura 16. Diagrama simplificado de una línea eléctrica. 61
Figura 17. Criterio de recuperación lenta de tensión de WECC [29]..... 65
Figura 18. Criterio de recuperación de tensión después de un evento de WECC [29].... 65
Figura 19. Sistema de prueba IEEE de 39 barras. 72
Figura 20. Distribución de los tipos de cargas en el modelo WECC. 73
Figura 21. Tensión en el punto de conexión de las cargas con el modelo WECC. 74
Figura 22. Parametrización modelo ZIP 75
Figura 23 Parametrización modelo exponencial..... 75
Figura 24. Parametrización modelo complejo 76
Figura 25. Parametrización modelo ZIP + Motor de inducción 76
Figura 26. Desempeño dinámico de la tensión - Escenario 1..... 78
Figura 27. Consumo de potencia reactiva - Escenario 1 79
Figura 28. Desempeño dinámico de la tensión - Escenario 2..... 80
Figura 29. Consumo de potencia reactiva - Escenario 2 81

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Indicadores de desempeño dinámico de tensión implementados 69

Tabla 2. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 1 78

Tabla 3. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 2 80

Tabla 4. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 3 82

Tabla 5. Desempeño dinámico de la tensión de los modelos de carga 85

Introducción

Mantener niveles de tensión estables y dentro de rangos seguros es esencial para garantizar la operación confiable del sistema eléctrico de potencia (SEP). En este contexto, analizar el desempeño dinámico de la tensión durante eventos como cortocircuitos, cambios en la carga, desconexión de generadores, entre otros, es crucial para evaluar la capacidad del SEP para recuperar y mantener la estabilidad de la tensión [1]. Durante la etapa de planeación de la operación, resulta crítico analizar los posibles escenarios que puedan comprometer el funcionamiento adecuado del SEP, empleando herramientas avanzadas de simulación. Un modelado preciso de los diversos componentes del sistema es fundamental para lograr una planeación efectiva a través de simulaciones; esto se debe a que permite una representación fiel del comportamiento del sistema, reduciendo el error en comparación con el comportamiento esperado en la operación real.

A diferencia del modelado de otros componentes del sistema, como generadores, transformadores, líneas de transmisión o dispositivos FACTS, que han alcanzado un alto desarrollo y respaldo académico, el modelado de la carga presenta un reto significativo debido a su naturaleza estocástica y la amplia variedad de componentes, como motores, dispositivos electrónicos, iluminación, calefacción, entre otros [2]. Cada uno de estos componentes puede tener características y comportamientos diferentes, lo que dificulta la creación de un modelo único y preciso. Existen varias categorías de modelos de carga, entre ellas, modelos estáticos que incluyen el modelo de impedancia constante (Z), potencia constante (P), corriente constante (I) y el modelo ZIP que combina los anteriores. También se encuentran modelos dinámicos que incorporan el modelo ZIP más motor de inducción, modelo compuesto, modelo complejo y en particular, el modelo propuesto por Western Electricity coordinating council (WECC), que se destaca por su versatilidad [3].

El modelo compuesto de carga WECC [4] merece una mención especial, ya que emplea múltiples submodelos para representar una variedad de tipos de carga, como motores de inducción, cargas electrónicas y cargas estáticas. Cada submodelo se caracteriza por parámetros y ecuaciones que describen de manera precisa la dinámica de la carga correspondiente. Además, este modelo WECC exhibe una notable capacidad de generalización, lo que significa que puede ser aplicado en sistemas eléctricos de potencia con diversas características y configuraciones, lo que lo convierte en una importante herramienta para la planificación y operación de sistemas eléctricos en todo el mundo.

Este trabajo se centra en abordar el impacto que la elección de distintos modelos de carga tiene en el desempeño dinámico de la tensión en el SEP. La selección del modelo de carga es un factor crítico que influye directamente en la respuesta dinámica del sistema ante eventos adversos. Analizar cómo estos modelos permiten representar la realidad del sistema de potencia y evaluar efectivamente su capacidad para mantener niveles de tensión estables y recuperarse eficientemente tras perturbaciones es esencial para mejorar la comprensión y la toma de decisiones en la planificación y operación del sistema eléctrico de potencia.

Este trabajo demuestra que la correcta selección y parametrización de los modelos de carga es fundamental para representar con adecuadamente el desempeño dinámico de la tensión en un SEP. Los resultados obtenidos en el caso de estudio, utilizando el sistema IEEE de 39 barras, demuestran cómo el modelo WECC permite representar más características en el comportamiento dinámico de la carga en comparación con la respuesta de otros modelos disponibles en la literatura.

Este documento está organizado de la siguiente manera: el Capítulo 1 presenta el estado del arte, proporcionando un contexto sobre los diferentes modelos de carga propuestos en la literatura, indicadores para evaluar el desempeño dinámico de la tensión y trabajos donde se evaluaba el desempeño dinámico de la tensión considerando diferentes modelos de carga. El Capítulo 2 aborda un marco teórico de los modelos de carga eléctrica disponibles en la literatura, selección de los modelos para el análisis y definición de la

metodología implementada para su parametrización. El Capítulo 3 describe conceptos asociados a la estabilidad de tensión e indicadores para evaluar el desempeño dinámico de la tensión y se presentan los indicadores seleccionados. El Capítulo 4 describe el sistema de prueba seleccionado y los casos de estudio considerados para evaluar el impacto de la selección de los modelos de carga en el desempeño dinámico de la tensión y los análisis comparativos derivados de los resultados obtenidos en las simulaciones dinámicas, considerando los diferentes modelos de carga seleccionados. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el impacto del modelado de la carga eléctrica en el desempeño dinámico de la tensión de un sistema eléctrico de potencia

Objetivos específicos

- Seleccionar modelos de carga propuestos en la literatura, para evaluar su impacto en el desempeño dinámico de la tensión.

- Seleccionar al menos un indicador que permita evaluar el desempeño dinámico de la tensión.

- Realizar un análisis comparativo del desempeño dinámico de la tensión, considerando los modelos de carga seleccionados, por medio de simulaciones dinámicas en un SEP de prueba.

1. Estado del arte

Estudiar el impacto de la carga en el desempeño dinámico de la tensión de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es una tarea fundamental para la adecuada planeación, programación y operación de estos. Por esto, es importante contar con modelos precisos que describan las dinámicas asociadas a la carga eléctrica y su efecto en las tensiones del SEP. Además, es importante contar con indicadores que permitan evaluar estabilidad en tensión respecto al comportamiento dinámico de la carga eléctrica. La importancia del tema se demuestra en los estudios que se han realizado y que se encuentran disponibles en la literatura.

En [3], se presenta una revisión exhaustiva de los enfoques y desarrollos en el modelo de cargas de los SEP. Su objetivo de proporcionar una comprensión integral de los diversos modelos de carga utilizados en planificación y análisis operativo de los SEP. Estos modelos se pueden clasificar en tres categorías principales: los modelos estáticos, que son aquellos que no consideran los cambios temporales en la carga; modelos dinámicos, que tienen en cuenta la variabilidad temporal de la carga; y modelos estocásticos, que incorporan la incertidumbre de la demanda y la generación eléctrica.

En documento técnico “Dynamic Load Modeling” de la North American Electric Reliability Corporation (NERC) [4], se aborda el modelado dinámico en los sistemas eléctricos de potencia, presentando especial atención al modelo compuesto WECC (Western Electricity Coordinating Council). Este modelo es ampliamente utilizado para representar el comportamiento dinámico de las cargas en estudios de estabilidad y rendimiento de los sistemas eléctricos. El documento proporciona una visión integral de los enfoques y metodologías relacionadas con el modelo compuesto WECC, incluidas las técnicas de

identificación y estimación de parámetros, así como las aplicaciones prácticas y las consideraciones de implementación en diversos escenarios.

En los sistemas eléctricos de potencia, la estabilidad en tensión es un tema crítico que se relaciona con la capacidad del sistema para mantener las tensiones en los límites aceptables [1]. En este sentido, los índices de estabilidad en tensión (VSIs por sus siglas en inglés) son herramientas fundamentales para la planificación, operación y análisis de SEP. Una revisión y comparación de algunos VSIs es realizada por los autores en [5], [6], [7], [8], donde se clasifican los VSIs en dos grupos principales: basados en variables del sistema y basados en la matriz Jacobiana. Se identifica la necesidad de usar VSIs en diferentes aplicaciones relacionadas con planificación, operación y análisis de SEP. En ambos estudios se identifican las ventajas y desventajas de cada VSI según la aplicación específica, lo que permite seleccionar el índice más adecuado para cada caso particular. Esto es especialmente importante debido a que cada índice se enfoca en diferentes aspectos del sistema y puede proporcionar información valiosa según su aplicación.

En [9] de presenta una metodología para el monitoreo de estabilidad de tensión de un SEP usando mediciones PMU. Se identifica la necesidad de implementar VSIs para determinar el estado del sistema e identificar escenarios críticos de operación. Se realiza una comparación de algunos índices utilizando un modelo de carga ZIP y se evalúan según los siguientes criterios: Rapidez, sencillez, facilidad de los parámetros, mediciones PMUs y sensibilidad. En el trabajo, el autor no evalúa la estabilidad del sistema considerando un modelo dinámico de carga, por lo que no se consideran las dinámicas que pueden influir en la estabilidad de un SEP.

Diferentes autores identifican la necesidad de contar con modelados dinámicos de la carga eléctrica para el desarrollo de estudios de estabilidad en tensión. En [3] se realizan análisis estáticos y dinámicos de la estabilidad considerando el impacto del modelado de la carga, pero no se consideran indicadores de estabilidad en tensión para el desarrollo del análisis dinámico. Los autores en [10] realizan un análisis comparativo del modelo estático del motor de inducción y el modelado dinámico del mismo, donde se presenta la importancia de utilizar modelos dinámicos precisos en estudios de estabilidad en tensión para identificar el efecto de los motores en la dinámica del sistema. Sin embargo, los autores no

consideran indicadores dinámicos para validar el efecto de la carga en los estudios realizados.

Los autores en [11], llevaron a cabo simulaciones dinámicas para evaluar la estabilidad de tensión del sistema de transmisión de ITC en Michigan frente a aproximadamente 140 contingencias críticas. Utilizando un nuevo modelo de carga WECC, se analizaron condiciones de carga máxima de verano en los años 2019 y 2022, tanto con una programación normal de generación como bajo condiciones de generación bajo estrés. Se identificaron problemas de recuperación de tensión en áreas específicas, y se propuso la adición de SVC en estas áreas, demostrando una mejora significativa en la estabilidad transitoria del sistema. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de niveles de carga de motores en el rendimiento dinámico de la tensión, concluyendo con recomendaciones para revisar los criterios de recuperación de tensión transitorio/dinámico de ITC. Este estudio proporciona información para sistemas de transmisión en cumplimiento con la norma NERC TPL-001-4 y destaca la utilidad del modelo WECC.

El estado del arte revela la creciente importancia de comprender y evaluar la influencia de la carga en la estabilidad en tensión de los SEP. La revisión de la literatura destaca la diversidad de modelos de carga utilizados en la planificación y operación de SEP, que abarcan diferentes modelos estáticos y dinámicos. Además, se resalta la necesidad de contar con indicadores de estabilidad en tensión (VSIs) que permitan evaluar el comportamiento dinámico de la carga y su impacto en la tensión del sistema. Sin embargo, se observa que la mayoría de los estudios se centran en modelos estáticos de carga y no abordan completamente las dinámicas asociadas a la carga eléctrica.

El problema planteado se origina en la complejidad en constante aumento de los SEP, con la introducción de nuevas tecnologías y una amplia variedad de cargas. Los colapsos parciales y totales reportados en la historia de la operación de SEP, en su mayoría relacionados con problemas de estabilidad en tensión, enfatizan la necesidad de abordar la influencia de la carga en el comportamiento dinámico de la tensión. La falta de precisión y representatividad en los modelos de carga disponibles subraya la importancia de esta investigación. En consecuencia, el planteamiento del problema busca comprender el

impacto de la selección de un modelo de carga en la tensión del sistema eléctrico de potencia, el cual según la revisión bibliográfica realizada no se ha desarrollado previamente.

Por ende, este estudio se propone como un paso significativo hacia la evaluación y comprensión más profunda de la influencia de los modelos de carga en la evolución de la tensión de los SEP. Con base en lo indicado previamente, el objetivo general de esta investigación es evaluar el impacto del modelado de la carga eléctrica en el desempeño dinámico de la tensión de un sistema eléctrico de potencia. Para lograr este objetivo, se considerarán una serie de objetivos específicos, que incluyen la selección de modelos de carga, la elección de indicadores adecuados de desempeño de tensión y la realización de análisis comparativos mediante simulaciones dinámicas. Esta investigación pretende abordar las lagunas identificadas en el estado del arte y contribuir a una mejor comprensión del desempeño dinámico de la tensión de los SEP en un entorno de carga eléctrica diversificada y en constante evolución.

2. Modelos de Carga Eléctrica

El proceso de modelado de la carga presenta desafíos significativos debido a la amplia diversidad de dispositivos conectados a una misma barra en un SEP, que incluye elementos como luminarias, motores, condensadores, cargas electrónicas, entre otros. Además, la composición de la carga es altamente influenciada por diversos factores, como la variación horaria, estacional, condiciones climáticas, así como factores culturales y socioeconómicos, lo que complica la tarea de definir un modelo genérico para un SEP[2].

En el estudio realizado en [3], se llevó a cabo una revisión de varios modelos de carga, así como de su aplicación en la industria para llevar a cabo análisis tanto en estado estacionario como dinámicos. Una observación relevante que destaca de la Figura 1 es que, a pesar de que esta información se basa en datos de 2012, más del 60% de los estudios dinámicos se realizan utilizando modelos estáticos de carga. Esto sugiere que, en ese momento, los modelos de carga dinámicos no se utilizaban con la frecuencia necesaria en estudios dinámicos del sistema eléctrico de potencia.

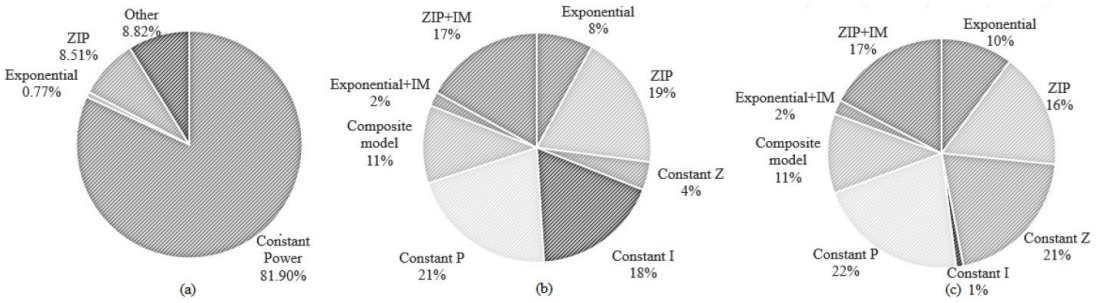

Figura 1 Modelos de carga utilizados en la industria para (a) análisis de estado estacionario y estudios dinámicos (b) potencia activa y (c) potencia reactiva [3].

Es importante resaltar que, en la actualidad, con la incorporación de nuevas fuentes de generación basadas en inversores, el sistema eléctrico ha experimentado un cambio significativo en su dinámica. La entrada de estas fuentes de generación, que a menudo no aportan inercia ni contribuyen significativamente al aporte de corriente de cortocircuito, plantea un desafío importante para la estabilidad del sistema. Por lo tanto, existe una necesidad de incorporar modelos de carga que represente la dinámica del SEP ante pequeñas y grandes perturbaciones. Estos modelos de carga se clasifican principalmente en dos categorías: modelos estáticos y modelos dinámicos.

2.1 Marco teórico

2.1.1 Tipos de modelos de carga

Los modelos de carga eléctrica representan la relación matemática de la potencia activa y reactiva consumida por una carga y las variables en el punto de conexión, tales como la tensión, el ángulo de fase y la frecuencia [3], [12]. Estas relaciones se pueden modelar por medio de modelos de carga estáticos o dinámicos.

2.1.1.1. Modelos estáticos: Los modelos estáticos de carga expresan la potencia activa y reactiva en cualquier instante de tiempo como funciones de la magnitud de la tensión y la

frecuencia en ese mismo instante [3]. Existen dos enfoques ampliamente utilizado para representar modelos estáticos de carga: Modelo exponencial y modelo polinomial.

- Modelo exponencial: En este tipo de modelos la dependencia de carga ante variaciones de tensión y frecuencia es representada con las ecuaciones (1) y (2):

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n}\right)^{av} \left(\frac{f}{f_n}\right)^{af} \quad (1)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{V}{V_n}\right)^{bv} \left(\frac{f}{f_n}\right)^{bf} \quad (2)$$

Donde:

P Potencia activa consumida.

Q: Potencia reactiva consumida.

V: Tensión en terminales de carga.

P_n: Potencia activa consumina a tensión nominal (V_n)

Q_n: Potencia reactiva consumina a tensión nominal (V_n)

af, bf: Exponente de frecuencia.

av, bv: Exponente de tensión que definen el tipo de carga:

$av, bv = 0$: Modelo de potencia constante

$av, bv = 1$: Modelo de corriente constante

$av, bv = 2$: Modelo de impedancia constante

En análisis donde los desbalances de carga - generación no son significativos y se cuenta con un sistema robusto, es posible realizar la simplificación indicada en las ecuaciones (3) y (4):

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n}\right)^{av} \tag{3}$$

$$Q = Q_n \left(\frac{V}{V_n}\right)^{bv} \tag{4}$$

- Modelo polinomial: El modelo polinomial ZIP es ampliamente utilizado en el análisis de sistemas eléctricos de potencia debido a su capacidad para relacionar la potencia activa y reactiva de la carga con una combinación de componentes de potencia constante, corriente constante e impedancia constate. Esta relación se expresa mediante una ecuación polinómica que incluye dichas componentes y se muestra en las ecuaciones (5) y (6):

$$P = P_n \left[a_1 \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_n}\right) + a_3\right] \tag{5}$$

$$Q = Q_n \left[b_1 \left(\frac{V}{V_n}\right)^2 + b_2 \left(\frac{V}{V_n}\right) + b_3\right] \tag{6}$$

Donde:

$a_1\ y\ b_1$: Representa el grado de participación de la componente de impedancia constante.

$a_2\ y\ b_2$: Representa el grado de participación de la componente de corriente constate,

$a_3\ y\ b_3$: Representa el grado de participación de la componente de potencia constante.

Cada componente puede tomar un valor entre 0 y 1 y se debe cumplir lo siguiente:

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1 \tag{7}$$

$$b_1 + b_2 + b_3 = 1 \tag{8}$$

Con el incremento en la penetración de cargas de potencia constante, es decir, cargas conectadas electrónicamente, se evidencia impactos en la oscilación postcontingencia y la estabilidad en tensión en algunas interconexiones o parte de ellas [4]. En la Figura 2 se ilustra el efecto del comportamiento dinámico de la carga en la tensión del SEP.

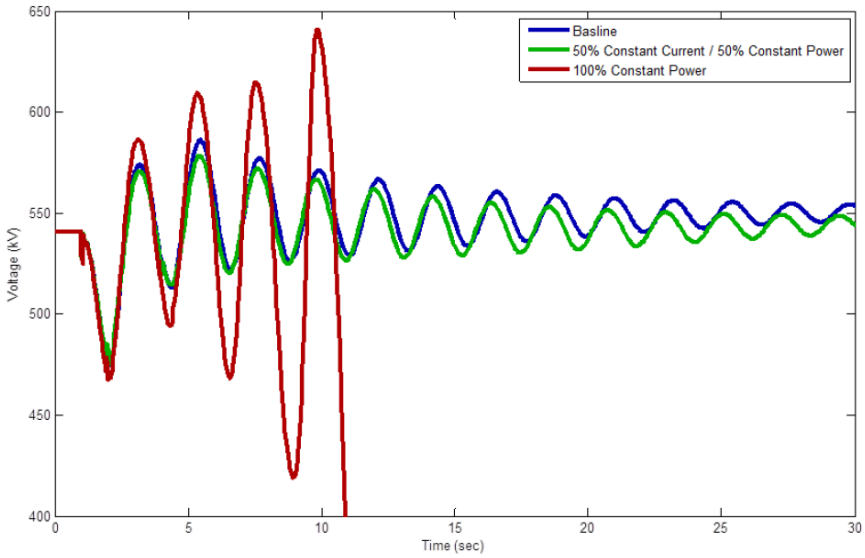

Figura 2. Impacto de carga constante en la estabilidad de tensión [4].

- Modelo de carga lineal: Este modelo es atractivo por su simplicidad, ya que define la potencia activa y reactiva consumida por una carga como funciones lineales de la tensión del nodo, descritas mediante las ecuaciones (9) Y (10):

$$P = P_n \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_n} \right) \right] \tag{9}$$

$$Q = Q_n \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_n} \right) \right] \tag{10}$$

Los parámetros a_0, a_1, b_0, b_1 ajustan la relación entre las potencias y la tensión en el punto de conexión de la carga.

- Modelo estático del motor de inducción: El modelo estático del motor de inducción se basa en el circuito equivalente en estado estacionario del mismo, como se muestra en la Figura 3. Donde R_s es la resistencia del estator, R_r es la resistencia del rotor, X_{ys} es la reactancia de fuga del estator, X_{yr} es la reactancia de fuga del rotor, $X_s = X_m + X_{ys}$ es la reactancia en derivación, X_m es la reactancia de magnetización, $s = (w_s - w)/w_s$ es el deslizamiento operativo, w_s es la velocidad angular sincrónica, y w es la velocidad angular del rotor.

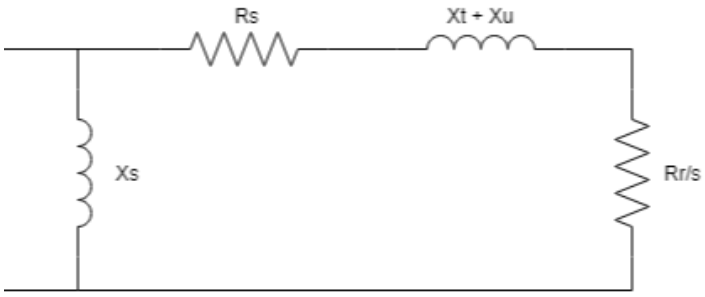

Figura 3. Circuito equivalente del motor de inducción.

La relación entre la potencia activa y reactiva, la tensión en el nodo de conexión y los parámetros del motor de inducción se presentan en las ecuaciones (11) y (12).

$$P = \left(R_s + \frac{R_r}{R}\right) \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{ys} + X_{yr})^2} \tag{11}$$

$$Q = \left(X_{ys} + X_{yr}\right) \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + \left(X_{ys} + X_{yr}\right)^2} + \frac{U^2}{X_s} \tag{12}$$

2.1.1.2. Modelos dinámicos: La composición predominante de las cargas conectadas al sistema eléctrico de potencia se encuentra en los motores, los cuales representan entre un 60% y un 70% del total [13]. Esta realidad plantea la necesidad de incluir las dinámicas de este tipo de cargas en los estudios dinámicos realizados en los sistemas de potencia. Los modelos dinámicos representan la potencia activa y reactiva como función de la tensión y el tiempo [3].

- Modelo dinámico del motor de inducción: El modelo dinámico del motor de inducción es presentado por las siguientes ecuaciones de estado:

$$\dot{E'}_q = \frac{1}{T_{p0}}\left[-E'_q - i_d\left(L_s - L_p\right) - E'_d w_0 S_{slip} T_{p0}\right] \tag{13}$$

$$\dot{E'}_d = \frac{1}{T_{p0}}\left[-E'_d - i_q\left(L_s - L_p\right) - E'_q w_0 S_{slip} T_{p0}\right] \tag{14}$$

$$\dot{E''}_q = \frac{T_{p0} - T_{pp0}}{T_{p0}T_{pp0}} E'_q - \frac{T_{pp0}\left(L_s - L_p\right) + T_{p0}\left(L_p - L_{pp}\right)}{T_{p0}T_{pp0}} i_d - \frac{1}{T_{pp0}} E''_q - w_0 S_{slip} E''_d \tag{15}$$

$$\dot{E''}_d = \frac{T_{p0} - T_{pp0}}{T_{p0}T_{pp0}} E'_d - \frac{T_{pp0}\left(L_s - L_p\right) + T_{p0}\left(L_p - L_{pp}\right)}{T_{p0}T_{pp0}} i_q - \frac{1}{T_{pp0}} E''_d - w_0 S_{slip} E''_q \tag{16}$$

$$\dot{S_{slip}} = -\frac{pE''_d i_d + qE''_q i_q - TL}{2H} \tag{17}$$

Donde las cinco variables de estado son E'_q, E'_d, E''_q, E''_d y S_{slip}, que corresponden a: Las tensiones transitorias de eje cuadratura y directo, las tensiones sub transitorias de eje

cuadratura y directo y el deslizamiento. Además, con los parámetros $L_s, r_s, L_p \; y \; L_{pp}$ que corresponden a la reactancia síncrona, la resistencia, las reactancias transitorias y subtransitorias, respectivamente; $T_{p0} \; y \; T_{pp0}$ son las constantes de tiempo del rotor transitorias y subtransitorias, respectivamente, w_0 la velocidad angular síncrona, H es la constante de inercia; i_d e i_q son las corrientes de los ejes dq; w es la velocidad del motor; p y q son constantes que están predefinidas como -1 [14].

- Modelos compuestos: Las investigaciones actuales sobre modelado de carga dinámica buscan consolidar diversas dinámicas en un solo modelo, considerando la amplia gama de componentes presentes en las cargas de los sistemas eléctricos y las diferentes respuestas transitorias de cada uno de estos elementos [3]. Debido a esta complejidad, los modelos compuestos de carga ofrecen una representación más precisa y ajustada a la realidad de las cargas eléctricas.

- Modelo ZIP más Motor de inducción: es el más ampliamente utilizado en la industria de los Estados Unidos para estudios dinámicos [3]. Este modelo combina elementos del modelo ZIP con un motor de inducción y ha demostrado ser efectivo para representar cargas en diversas condiciones, ubicaciones y composiciones. Su estructura se basa en un circuito equivalente, como se muestra en la Figura 4.

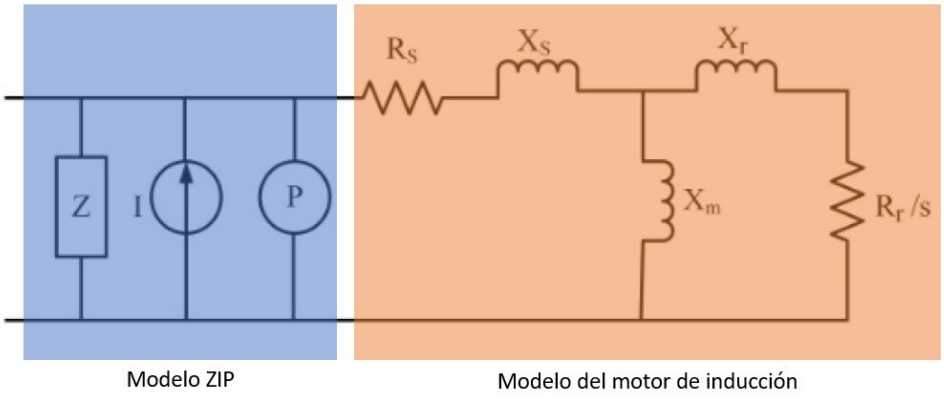

Figura 4. Modelo ZIP+Motor de inducción

- Modelo Complejo: El Modelo complejo de carga (CLOD, por sus siglas en inglés), es ampliamente empleado en el software Siemens PTI PSS/E [3]. El modelo incluye motores de diversos tamaños, modelos no lineales de iluminación de descarga, efectos de saturación en transformadores, potencia constante en MVA, capacitores en derivación y una impedancia en serie, junto con la relación de cambio que considera la influencia de los elementos de subtransmisión y distribución en el sistema. La Figura 5 detalla la estructura de este modelo.

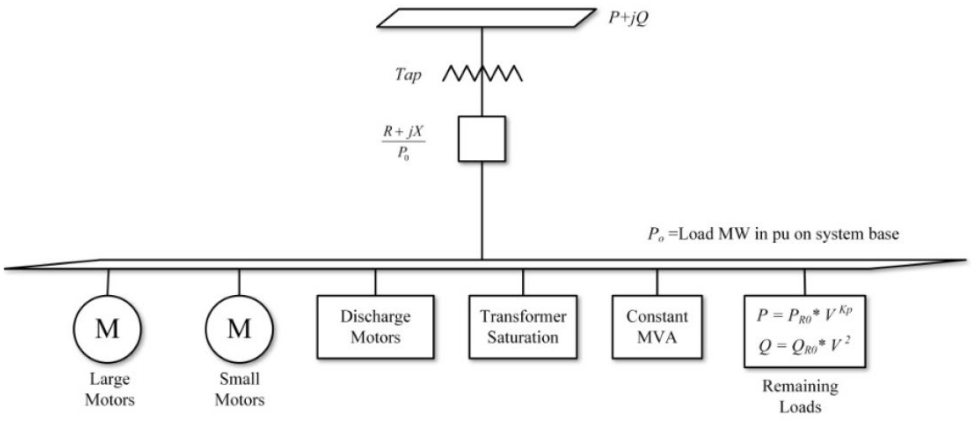

Figura 5. Modelo complejo de carga (CLOD

- Modelos basados en redes neuronales artificiales: El modelado de carga basado en redes neuronales artificiales (ANN) coincide con los comportamientos observados en un SEP sin utilizar una forma física para obtener el resultado, es decir, no tiene significado físico y depende puramente de los datos de medición. Una ANN está compuesta por un conjunto de unidades de procesamiento interconectadas por pesos. Las ANN se entrenan utilizando una sucesión de patrones de entrada y salida, resultando en los valores finales de los pesos de conexión que determinan el modelo de carga. Aunque la ANN es poderosa en representar sistemas no lineales complejos, obtener suficientes datos a lo largo de una amplia gama de condiciones operativas es un desafío [3]. Además, su poca capacidad de generalizar hace que sea poco práctica su implementación en sistemas complejos con alta cantidad de cargas debido a la diversidad de estas.

- Modelo WECC: El modelo de carga compuesta desarrollado por Western Electricity coordinating council (WECC) permite la representación de motores de inducción trifásicos y monofásicos, cargas electrónicas, cargas estáticas, generación distribuida y la red equivalente de distribución. Además, permite la modelización de los sistemas de protección alrededor de cada componente, lo que resulta útil para representar la desconexión de cargas finales debido a condiciones del sistema [4].

2.1.1.3. El modelo de carga compuesta se ha implementado en las plataformas de software más comúnmente utilizadas, como GE PSLF, PTI PSS®E, PowerWorld, Power Factory y PowerTech DSATools [4]. Aunque la implementación del modelo puede variar ligeramente entre estas plataformas, los principios y parámetros son generalmente los mismos.

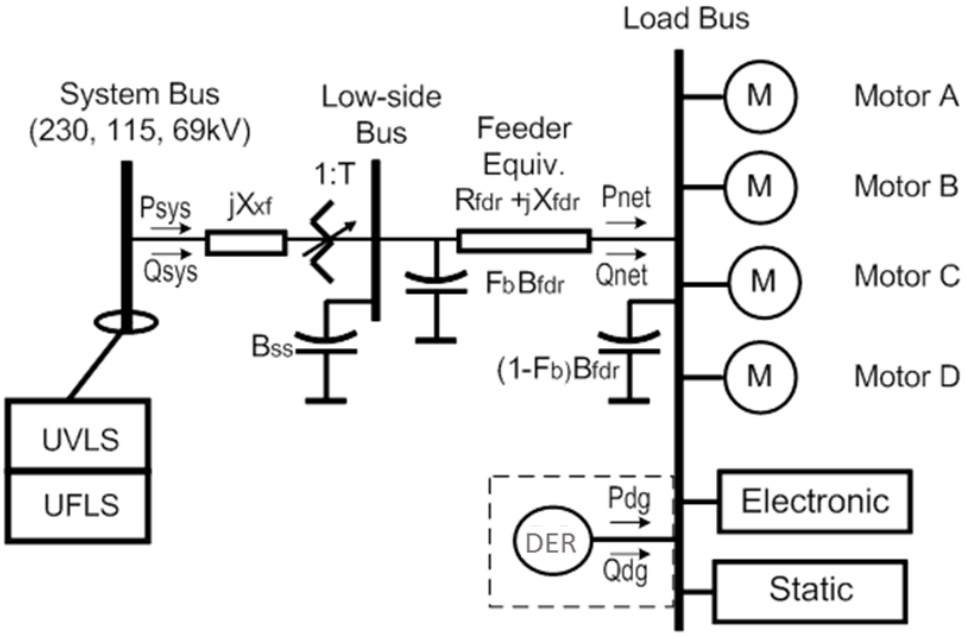

Figura 6. Estructura del modelo compuesto de carga WECC

La estructura general del modelo de carga compuesta se muestra en la Figura 6, esta incluye componentes importantes para la definición de la composición de la carga tales como: transformador de subestación (LTC) e impedancia equivalente del alimentador de distribución, compensación en derivación de subestación y alimentador distribuido, cargas de motores trifásicos y monofásicos con protección incorporada, cargas electrónicas, representación estática de cargas, desconexión de cargas (UFLS, UVLS) y recursos de generación distribuida [4]. A continuación, se detallan los principales componentes del modelo WECC:

- Motor de inducción trifásico: Existen múltiples tipos de motores de inducción trifásicos que pueden describir las cargas de uso final. En el modelo compuesto WECC, se utilizan tres diferentes motores trifásicos, A, B y C, para representar diferentes tipos de componentes dinámicos. Estos motores trifásicos comparten la misma estructura de modelo. Sin embargo, sus parámetros de modelo son diferentes. Por lo tanto, se adopta un modelo de motor de inducción de quinto orden para representar los motores trifásicos en el modelo WECC. Su diagrama de bloques se muestra en la Figura 7, donde 1/s denota el integrador [14].

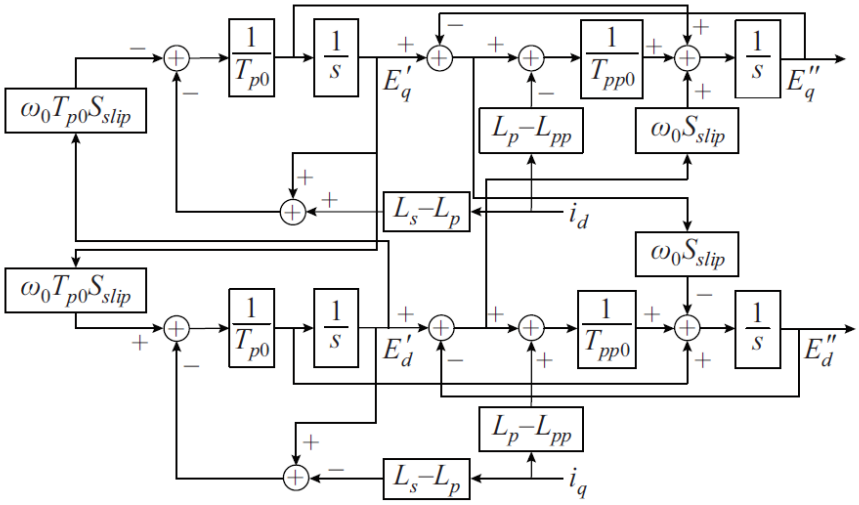

Figura 7. Diagrama de bloques del motor de inducción trifásico.

- Motor A: El Motor A representa motores de inducción trifásicos con baja inercia (H = 0.1 s) que impulsan cargas de torque constante. Este modelo representa motores comúnmente encontrados en compresores de aire acondicionado y sistemas de refrigeración comerciales/industriales. El modelo compuesto de carga distingue entre motores de compresores trifásicos grandes y pequeños para representar sus diferentes características de protección. Basado en pruebas de laboratorio y conocimientos de expertos en diseño de edificios y protección de motores, se proyecta que la mayoría de los motores de compresores trifásicos grandes se desconectarán alrededor del 65% del voltaje en 100 ms por acción de una protección de bajo voltaje, y permanecerán desconectados una vez que se disparen, requiriendo un reinicio manual .

  Para representar esto en el modelo compuesto de carga, el 20% del Motor A se desconectará al 65% del voltaje en 100 ms y no se reconectará. De manera similar, la mayoría de los compresores pequeños de 10-25 HP se desconectan debido a la caída básica del contactor alrededor del 50% del voltaje en aproximadamente 20 ms. Los contactores luego se reconectan una vez que el voltaje se recupera al 65% en aproximadamente 100 ms al cerrar nuevamente los contactores. Para representar esto en el modelo compuesto de carga, el 75% del Motor A se desconectará al 50% del voltaje en 20 ms y se reconectará en 100 ms una vez que el voltaje se recupere al 65%. Se espera que el 5% restante del Motor A, no modelado con protección, supere las perturbaciones sin desconectarse [15].

- Motor B: El Motor B representa motores de inducción trifásicos con alta inercia (H = 0.25-1.0 s) que impulsan cargas cuyo torque es proporcional al cuadrado de la velocidad. Este modelo representa motores comúnmente encontrados en ventiladores comerciales y sistemas de manejo de aire. El modelo es representativo de motores de ventiladores de 5-25 HP, que suelen ser motores de diseño NEMA B. Similar al Motor A, las capacidades de desconexión y reinicio por bajo voltaje están impulsadas por la idea de que un sistema EMS de edificio intentará automáticamente el reinicio al recuperar el voltaje, ya que no hay una razón aparente para mantener el equipo fuera de servicio. Para el Motor B, los ajustes de disparo representan disparos escalonados debido a la caída del contactor, de modo que las cargas que experimentan un voltaje instantáneo común no necesariamente tendrán ajustes de disparo idénticos. El disparo escalonado se logra desconectando el 30% del Motor B cuando el voltaje cae al 55% durante 20 ms y desconectando un 30% adicional del Motor B cuando el voltaje cae al 50% durante 20 ms. La reconexión escalonada también ocurre cuando los contactores vuelven a cerrar. El 30% del Motor B se reconectará cuando el voltaje se recupere al 60% durante 50 ms y otro 30% se reconectará cuando el voltaje se recupere al 65% durante 50 ms. El disparo escalonado también representa más fielmente el rendimiento de la carga agregada basada en el juicio de ingeniería de grandes agregados de carga. Es posible que las futuras instalaciones de este tipo de carga sean reemplazadas por motores conmutados electrónicamente (ECM); sin embargo, esta penetración aún es relativamente baja en este momento [15]

- Motor C: El Motor C representa motores de inducción trifásicos con baja inercia (H = 0.1-0.2 s) que impulsan cargas cuyo torque es proporcional al cuadrado de la velocidad. Este modelo representa motores comúnmente encontrados en bombas de circulación de agua comerciales en sistemas de enfriamiento central. Al igual que con el Motor B, el disparo escalonado se logra utilizando dos conjuntos de parámetros de protección. El modelo es representativo de motores de bombas de 5-25 HP, que suelen ser motores de diseño NEMA B. Para este tipo de carga, es posible que las tendencias futuras lleven a que esta carga sea reemplazada por variadores de frecuencia (VFD); sin embargo, esta penetración aún es relativamente baja en este momento [15].

- Motor de inducción monofásico (Motor tipo D): El modelo de aire acondicionado monofásico en el modelo de carga compuesto es un "modelo de rendimiento" derivado de pruebas de laboratorio sobre el comportamiento de estas cargas. La Figura 8 presenta un diagrama esquemático del modelo del motor D.

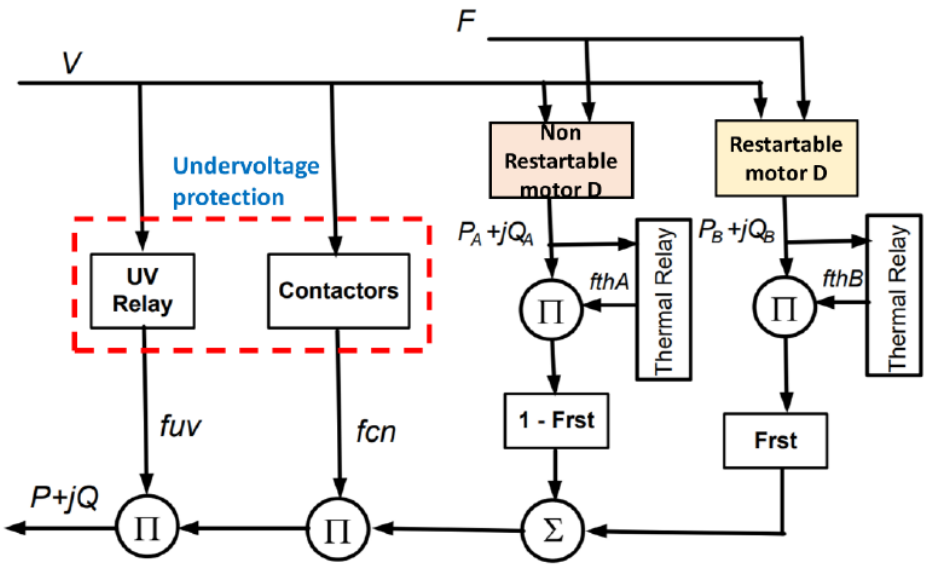

Figura 8. Esquema del modelado del motor D [16].

La Figura 8 muestra las características de rendimiento para la potencia activa y reactiva. El modelo utiliza ecuaciones algebraicas para representar el consumo de energía del motor en términos de voltaje terminal.

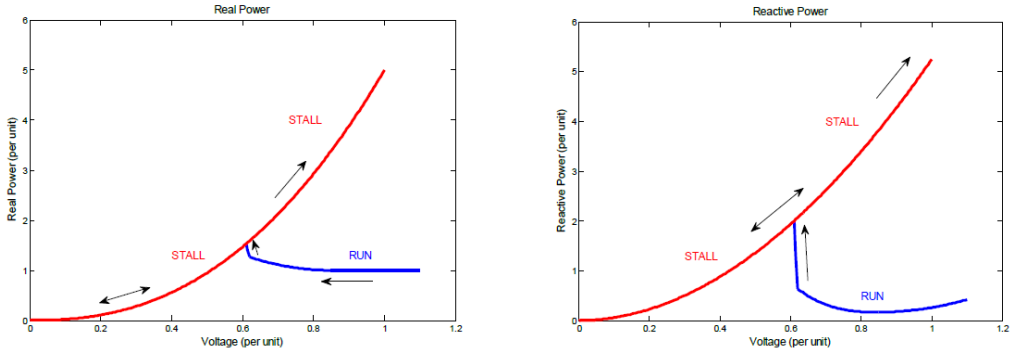

Figura 9. Característica de potencia vs tensión del modelo del aire acondicionado monofásico [15].

El modelo tiene dos condiciones operativas distintas en las que el motor puede funcionar. Estas incluyen los estados "RUN" (Funcionamiento) y "STALL" (Bloqueo), definidos por los parámetros Vstall y Tstall en el modelo. Cuando el voltaje terminal del modelo del motor experimenta una magnitud de voltaje por debajo del umbral Vstall durante la duración Tstall, el motor cambia del estado RUN al estado STALL y la representación algebraica del motor se "cambia". En el estado STALL, el motor consume grandes cantidades de corriente debido a las condiciones de rotor bloqueado, especialmente una vez que el voltaje terminal se ha recuperado. Para las condiciones donde el voltaje es menor que Vstall pero la duración de Tstall no se ha excedido, el modelo debe seguir el estado RUN y continuar hacia el estado STALL de menor voltaje para acomodar una transición suave entre estados. Una vez en el estado STALL, el motor permanece bloqueado hasta que la función de protección del relé térmico desconecta el motor. El modelo del relé térmico implementado para los acondicionadores de aire monofásicos representa el comportamiento agregado de estas cargas utilizando un mecanismo de disparo lineal [15].

- Cargas electrónicas: El componente de electrónica de potencia del modelo de carga compuesto está diseñado para modelar todas las cargas de los consumidores que están conectadas al sistema a través de una interfaz basada en inversores. Estos tipos de cargas incluyen dispositivos electrónicos de consumo como computadoras, televisores, etc., hasta cargas de motores con control de velocidad variable. El componente de electrónica de potencia tiene una representación algebraica simple con:

  - Consumo constante de potencia activa y reactiva en un rango de tensión especificado por el usuario.
  - Reducción lineal en el consumo de potencia activa y reactiva a medida que el voltaje cae por debajo del rango de voltaje especificado por el usuario, para representar la desconexión por baja tensión de estos dispositivos.

  El modelo también permite un porcentaje especificado por el usuario de carga electrónica que se reconecta al sistema a medida que el voltaje se recupera por encima del umbral de desconexión. El comportamiento de la carga electrónica se muestra en Figura 10. El modelo comienza a desconectar la carga cuando el voltaje terminal cae por debajo de Vd1 y desconecta el 100% de la carga por debajo de Vd2. El modelo realiza un seguimiento del voltaje terminal mínimo Vmin y lo utiliza junto con el parámetro frcel para calcular la fracción de carga reconectada a medida que el voltaje se recupera.

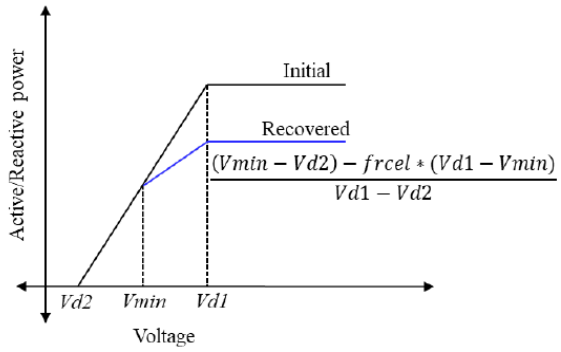

Figura 10. Característica de potencia activa/reactiva vs tensión del modelo de carga electrónica.

- Cargas estáticas: Representada por el modelo ZIP descrito en la sección 1.1.1.2.

2.1.2 Parametrización de los modelos de carga

Seleccionar un modelo para proporcionar una mejor representación de la carga es solo la mitad del camino hacia una representación adecuada de la carga en estudios dinámicos. Otro aspecto importante del modelado de carga es la parametrización del modelo, de modo que represente de una forma precisa la respuesta agregada de la carga. Parametrizar un modelo de carga es una tarea desafiante, ya que la carga del sistema siempre está cambiando en su nivel y composición, y el hecho de que la mayoría de los planificadores de transmisión tienen poca visibilidad de los detalles de las cargas de los consumidores [16]. Para abordar el desafío de la parametrización del modelo de carga, se han utilizado dos enfoques diferentes en conjunto, y el uso combinado de estos enfoques ha mostrado resultados prometedores para la parametrización del modelo. Las dos metodologías comúnmente utilizadas son: Metodología basada en componentes y metodología basada en mediciones.

2.1.2.1. Metodología basada en componentes: El enfoque de modelado de carga basado en componentes es una metodología de abajo hacia arriba que agrupa las cargas de distribución según clases de carga estándar y los componentes de carga dentro de cada clase. En este enfoque, se utiliza una estructura común del modelo de carga y un conjunto asociado de valores de parámetros en todo el modelo del sistema. Lo que varía en todo el modelo del sistema es la composición porcentual (por ejemplo, el porcentaje de carga motora frente a la carga estática) de un nodo a otro y los parámetros que pueden depender significativamente de la temperatura (por ejemplo, la tensión de estancamiento para la carga de motores de a/c). En muchos casos, incluso estos porcentajes pueden mantenerse constantes en una región o zona del modelo del sistema debido a la falta de mejor información.

La Figura 11 muestra que la carga suministrada en un nodo puede categorizarse en clases de carga según el consumo de potencia activa (indicado por el recuadro rojo). Típicamente, las clases de carga utilizadas son residencial, comercial, industrial, agrícola e iluminación

general (incluye iluminación pública y de calles). La carga en un nodo puede dividirse en una o más de estas clases. La demanda medida en el nodo de carga puede utilizarse para determinar la división de clases de carga. Es importante señalar que la demanda medida estará típicamente disponible para cada hora del año, pero para estudios de planificación, solo se utilizan tiempos específicos del año. Estos generalmente incluyen el pico de carga del sistema en verano, el pico de carga del sistema en invierno y casos de carga ligera o media del sistema [17].

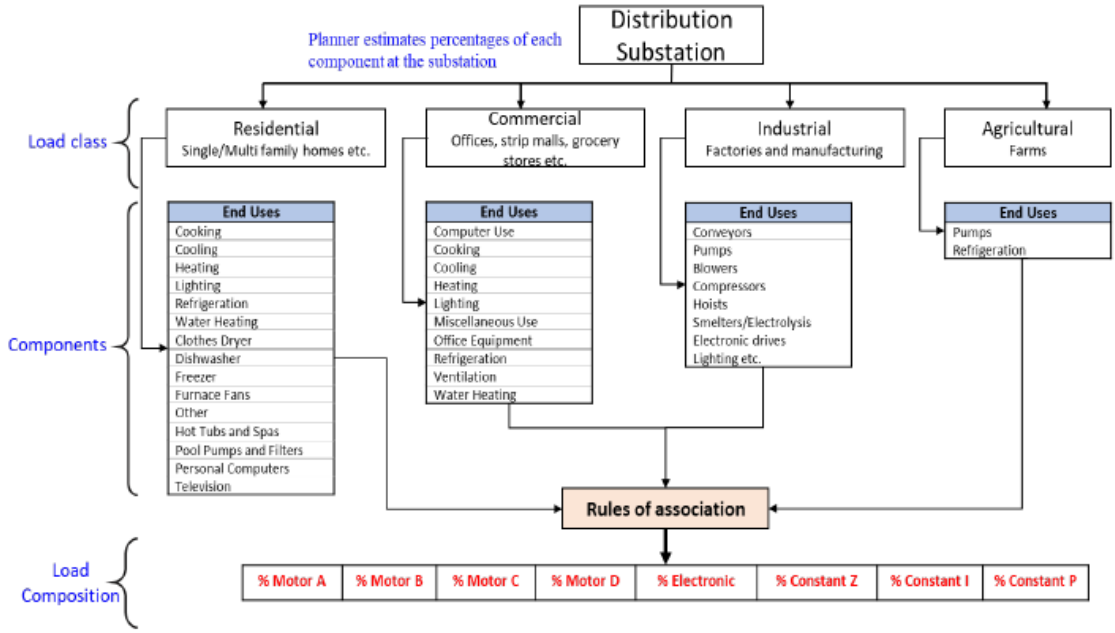

Figura 11. Modelado de Carga Basado en Componentes. [16]

2.1.2.2. Metodología basada en mediciones: El enfoque basado en mediciones se fundamenta en el desarrollo de una estructura de modelo basada en una estimación de los componentes subyacentes y luego utilizar datos de medición para parametrizar la estructura del modelo. En el contexto del modelado de carga, un enfoque basado en mediciones requeriría una medición como voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva para un evento en la red, que luego se utilizaría para parametrizar el modelo de carga compuesto. Los pasos fundamentales involucrados en el enfoque basado en mediciones son los siguientes [16]:

- Derivar mediciones de las variables eléctricas para un evento en la red.

- Procesar las mediciones de manera que puedan ser utilizadas en el marco de modelado relevante (secuencia positiva, fasores o plataforma de simulación).

- Utilizar un marco para ingresar las variables eléctricas de entrada en el modelo y ajustar los parámetros del modelo para lograr una coincidencia razonable entre las mediciones de potencia activa y reactiva y la salida del modelo. .Existen varios métodos de optimización que pueden ser empleados para esta tarea, entre los cuales se encuentran:

    - Método de los mínimos cuadrados [18]: El método de los mínimos cuadrados se utiliza para minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre las observaciones observadas y las predicciones del modelo. En problemas de regresión, este método busca ajustar una curva a un conjunto de datos de manera que la suma de los cuadrados de los errores sea la menor posible. Puede ser sensible a la calidad de los datos y puede no ser adecuado para funciones objetivo no lineales o complejas que no se ajusten bien a una forma cuadrática simple.
    - Algoritmos genéticos [19]: Los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda y optimización basados en los principios de la evolución natural, como la selección, el cruce y la mutación. Estos algoritmos generan una población inicial de soluciones candidatas y las evolucionan a lo largo de varias generaciones para encontrar soluciones óptimas. Se aplican comúnmente en problemas

donde la función objetivo no es fácilmente diferenciable. Pueden ser computacionalmente intensivos y requieren un tiempo considerable para converger, especialmente en problemas con un gran número de variables.

- Algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) [20]: El algoritmo PSO simula el comportamiento social de organismos como los enjambres de aves. En PSO, cada partícula en el enjambre representa una posible solución y ajusta su posición en el espacio de búsqueda en función de su experiencia personal y la de sus vecinos. Este método es eficaz para la optimización global en problemas con múltiples variables. Puede ser propenso a caer en óptimos locales y puede requerir ajustes finos de los parámetros del enjambre para lograr una convergencia eficiente.
- Método de Nelder-Mead [21]: El método de Nelder-Mead es un algoritmo de optimización sin derivadas que se utiliza para minimizar funciones no lineales en un espacio de varias dimensiones. Funciona mediante la simplicidad de una búsqueda de simplex, donde se ajustan los vértices de un simplex (un polígono generalizado) para acercarse al mínimo de la función objetivo. Puede ser ineficiente en espacios de alta dimensionalidad y no garantiza encontrar el óptimo global, especialmente en funciones con múltiples óptimos locales.

Aunque el proceso parece sencillo, existen desafíos significativos al utilizar un enfoque basado en mediciones. Estos desafíos giran en torno a la adquisición de datos de medición que se necesitan para el enfoque basado en mediciones. Los principales desafíos son los siguientes[16]:

- La disponibilidad y calidad de los datos de medición: Obtener datos precisos y de alta calidad es crucial para el éxito del modelado basado en mediciones. Esto incluye tener acceso a equipos de medición avanzados y asegurar que los datos recopilados sean representativos de las condiciones operativas reales.
- Procesamiento de datos: Los datos de medición en bruto deben ser procesados para ser útiles en el modelado. Esto puede implicar la conversión de señales de voltaje y corriente en formas adecuadas para el análisis, como la secuencia positiva o la simulación de transitorios electromagnéticos.

- Integración y ajuste de parámetros: Una vez procesados los datos, deben integrarse en el modelo de carga y ajustarse los parámetros para lograr una coincidencia precisa entre las mediciones y la salida del modelo. Este proceso puede ser complejo y requerir técnicas avanzadas de optimización y ajuste de parámetros.

2.2 Selección de modelos de carga

Para el análisis comparativo, propuesto para ser llevado a cabo en este trabajo, se seleccionan tanto modelos estáticos como dinámicos. Esto permite realizar un análisis detallado de la respuesta de las cargas eléctricas bajo diferentes estrategias de modelado. Se pretende evaluar la capacidad del modelo de representar dinámicas en el sistema tales como la recuperación retardada de la tensión. A continuación, se indican los modelos seleccionados de los presentados en la sección 2.1, incluyendo la justificación para esta selección.

2.2.1 Modelo Estático seleccionado:

2.2.1.1. Modelo polinomial ZIP: A pesar de su utilidad para describir comportamientos bajo condiciones de tensión cercanas al valor nominal, el modelo lineal no se ha seleccionado para la implementación en este trabajo, ya que el modelo ZIP ofrece una descripción más precisa de las variaciones de la potencia reactiva en respuesta a cambios en la tensión [22].

2.2.1.2. Modelo exponencial: Describe adecuadamente la relación con la potencia activa y reactiva. Sus parámetros son fáciles de identificar.[22]

2.2.1.3. Modelo de potencia constante: Es uno de los modelos más utilizados a nivel industrial ya que representa la naturaleza típica de las cargas tipo motor [3].

2.2.2 Modelos Dinámicos seleccionados

2.2.2.1. Modelo polinomial ZIP + Motor de Inducción: Es el modelo de carga más usado a nivel industrial para estudios dinámicos [3].

2.2.2.2. Modelo Complejo (CLOD): El modelo incluye tanto elementos estáticos como dinámicos de la carga eléctrica y su parametrización es más sencilla en comparación con el modelo WECC. Sin embargo, presenta una menor precisión en la representación de las dinámicas reales de las cargas [3].

2.2.2.3. Modelo compuesto de carga WECC: Desarrollado por el Western Electricity Coordinating Council. Este modelo permite la representación de motores de inducción trifásicos y monofásicos, cargas electrónicas, cargas estáticas y la red equivalente de distribución. El motor monofásico representa la dinámica de bloqueo que lleva al fenómeno de recuperación lenta de la tensión. Al ser un modelo más completo, donde se representan dinámicas de carga estática y distintos tipos de motores encontrados a nivel residencial e industrial [15], la respuesta dinámica generada por el modelo WECC será la referencia para el ajuste de los otros modelos seleccionados.

2.3 Metodología implementada para la parametrización de los modelos de carga

La metodología implementada para la parametrización de los modelos de carga seleccionados es la basada en mediciones. Se implementa un algoritmo de optimización para comparar los resultados por medio de un algoritmo desarrollado en Python para extraer las series de tiempo asociadas a las dinámicas y obtenidas desde Power Factory (ver Figura 13). El procedimiento utilizado en este trabajo se presenta a continuación y se representa en la Figura 12:

- Implementar el modelo compuesto de carga WECC en un sistema de potencia de prueba utilizando el software Power Factory. El comportamiento dinámico de la tensión del sistema con el modelo WECC durante eventos, se utiliza como referencia para optimizar los parámetros de los demás modelos seleccionados.

- Parametrizar el modelo compuesto de carga WECC: El modelo se parametriza en el software Power Factory utilizando valores genéricos de alto nivel descritos en [16], los cuales ya están implementados en el software DIgSILENT Power Factory por defecto y son presentados en el Anexo 1.

- Simulación dinámica generando un evento de cortocircuito que produzca una caída de tensión en la barra de conexión del modelo de carga.

- Registrar los datos de tensión en el punto de conexión del modelo compuesto WECC (serie temporal de referencia).

- Desconectar el modelo compuesto de carga WECC e implementar el modelo de carga que se desea parametrizar.

- Realizar de nuevo la simulación dinámica en el sistema de prueba con el modelo que se desea parametrizar y registrar los datos de la tensión en el punto de conexión del modelo.

- Optimizar los parámetros de los modelos de carga. Como algoritmo de optimización se seleccionó el método Nelder-Mead. Este método es adecuado para problemas de optimización sin derivadas y se utiliza ampliamente en la minimización de funciones no lineales en espacios de varias dimensiones. La elección del método Nelder-Mead se basa en su capacidad para manejar funciones complejas y su eficiencia en la convergencia hacia soluciones óptimas en problemas de modelado de sistemas eléctricos [21].

  El objetivo es minimizar la diferencia cuadrática entre la tensión obtenida del modelo de carga y la tensión medida durante un evento de referencia (desempeño dinámico con el modelo de carga WECC). Esta diferencia se cuantifica mediante una función de costo J que se define como la suma de los errores cuadrados de la serie de tiempo de referencia (V_{ref}) y las tensiones medidas (modelo de carga evaluado) (V_{med}) en cada instante de tiempo t: $J = \sum_t (V_{ref}(t) - V_{med}(t))^2$

  Los parámetros del modelo de carga que se ajustan incluyen, pero no se limitan a, las constantes de tiempo, resistencias y reactancias de los motores, y las proporciones de diferentes componentes de carga (por ejemplo, porcentajes de carga estática y dinámica). Aunque el método Nelder-Mead no maneja explícitamente restricciones, los parámetros pueden ser limitados a rangos físicamente razonables, reduciendo el espacio de búsqueda.

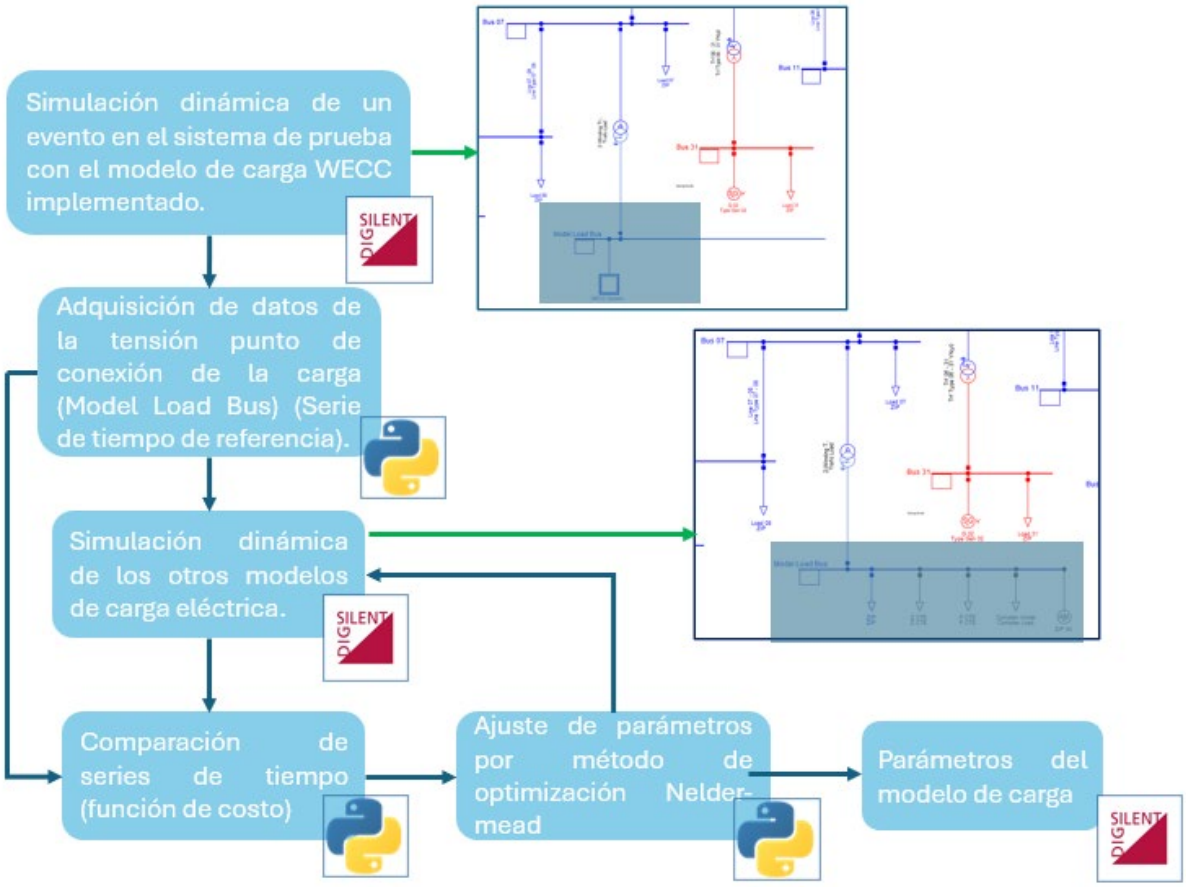

Figura 12. Metodología para la estimación de parámetros de los modelos de carga.

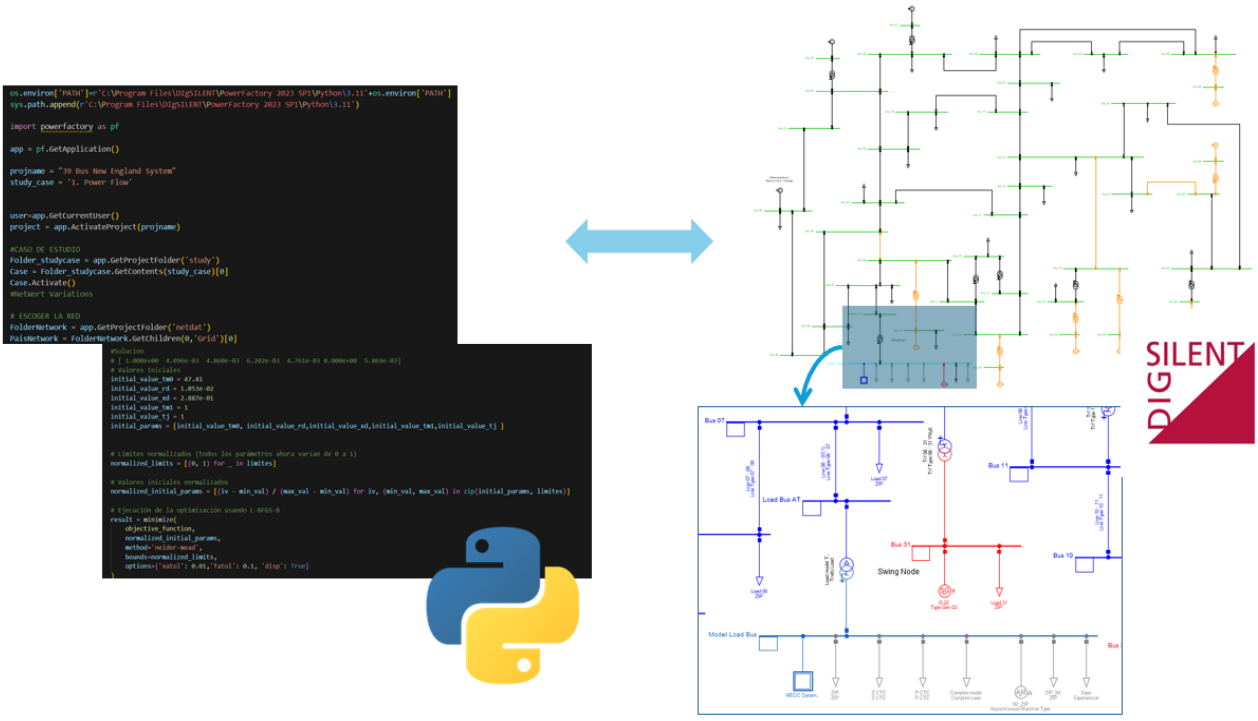

Figura 13. Esquemático de la interfaz Python y Power Factory

En este capítulo, se presentó una revisión detallada de los modelos de carga eléctrica utilizados en la planificación y análisis de sistemas eléctricos de potencia. Se discutieron tanto los modelos estáticos como los dinámicos, con énfasis en sus capacidades para representar la respuesta dinámica de las cargas ante diferentes condiciones de operación. También se abordó la importancia de una correcta parametrización de los modelos de carga y se describieron las metodologías basadas en componentes y en mediciones como enfoques viables para este propósito. Finalmente, se seleccionaron los modelos de carga más relevantes para el análisis comparativo en esta tesis, justificando la elección de cada uno en base a su capacidad de capturar dinámicas específicas del sistema, resaltando el modelo de carga WECC que es tomado como base para el ajuste de los demás modelos seleccionados.

3. Desempeño dinámico de la tensión

3.1 Marco teórico

El desempeño dinámico de la tensión se refiere al comportamiento de la tensión en los diferentes nodos de un SEP ante la presencia de eventos transitorios y dinámicos [2]. Estos eventos pueden incluir perturbaciones repentinas, como cortocircuitos, desconexiones súbitas de grandes cargas o generadores, variaciones rápidas en la demanda de energía, entre otros. En esencia, el desempeño dinámico de la tensión se centra en cómo el sistema responde y se recupera de estas perturbaciones para mantener la estabilidad de la tensión en sus nodos.

Existen dos enfoques principales para evaluar el desempeño dinámico de la tensión. En primer lugar, los estudios de estabilidad en tensión se centran en analizar la capacidad del sistema para mantener la estabilidad de la tensión después de perturbaciones. Por otro lado, los criterios de desempeño dinámico complementan los estudios de estabilidad en tensión al establecer indicadores y estándares para evaluar la respuesta del sistema a eventos dinámicos. Ambos enfoques se detallan a continuación.

3.1.1 Estabilidad en SEP

La estabilidad en los SEP es crucial para asegurar su funcionamiento seguro y confiable. Con la incorporación de nuevas tecnologías, como la generación basada en inversores, las cargas electrónicas y los dispositivos de compensación flexible de sistemas de transmisión (FACTS), la complejidad del sistema se ha incrementado. Este aumento en la complejidad hace que sea un reto mayor analizar y entender la estabilidad del SEP, garantizando así que la operación de estos sistemas avanzados continue siendo robusta y resistente ante diversas condiciones y perturbaciones.

En el trabajo desarrollado por la IEEE [23] se hace una clasificación de la estabilidad de los SEP como se muestra en Figura 14. Además, se define la estabilidad de los SEP de la siguiente manera: “La estabilidad del sistema de potencia es la capacidad de un sistema eléctrico de potencia, para una condición operativa inicial dada, de recuperar un estado de equilibrio operativo después de haber estado sujeto a una perturbación física, con la mayoría de las variables del sistema acotadas de modo que prácticamente todo el sistema permanece intacto”. Esta definición subraya la importancia fundamental de que un SEP pueda mantener su operación estable incluso después de experimentar perturbaciones, garantizando que las variables críticas del sistema, incluida la tensión, se mantengan dentro de límites aceptables y el sistema no se desestabilice.

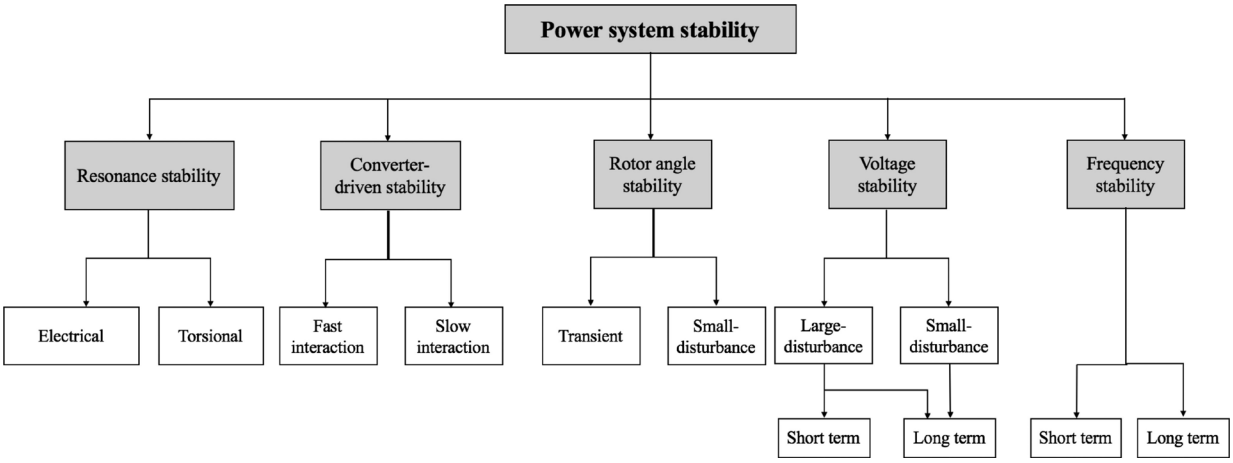

Figura 14. Clasificación de la estabilidad en los SEP.[23]

3.1.2 Estabilidad de Tensión

Como se observa en la Figura 14, la estabilidad de tensión hace parte de la clasificación de estabilidad y se define como la habilidad de un SEP de mantener los niveles de tensión en todas las barras del sistema en niveles aceptables durante condiciones normales de operación y después de estar sometido a una perturbación [1]. La estabilidad de tensión es un concepto esencial en los sistemas de energía eléctrica y abarca una amplia gama de fenómenos. Esta condición se manifiesta de manera diferente según la perspectiva de los ingenieros involucrados. Para algunos, como aquellos que trabajan con motores de inducción, cargas de aire acondicionado o enlaces de corriente continua de alta tensión, la estabilidad de tensión puede parecer un proceso rápido. Sin embargo, para otros ingenieros, puede implicar fenómenos más lentos, como los relacionados con el ajuste mecánico de los transformadores. La comunidad de ingenieros ha debatido sobre los métodos de análisis apropiados para abordar la estabilidad de tensión, y existe un debate sobre si este fenómeno es de naturaleza estática o dinámica. Los términos "inestabilidad de tensión" y "colapso de tensión" se utilizan a menudo de manera intercambiable en la mayoría de los casos [2].

A lo largo de las décadas, se han desarrollado diversas técnicas y métodos para estudiar la estabilidad de tensión en los SEP. Estos enfoques se pueden clasificar en cuatro categorías principales: flujos convencionales, flujos progresivos, análisis dinámicos y técnicas de monitoreo [24]. Los métodos estáticos, como los flujos convencionales y los flujos progresivos, son eficientes en términos de tiempo de ejecución y bajo costo de implementación, pero pueden carecer de la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios en el sistema. Por otro lado, los métodos dinámicos ofrecen una mayor precisión en la representación de eventos reales, pero requieren recursos computacionales significativos. Los métodos de monitoreo, basados en datos en tiempo real o fuera de línea, son altamente efectivos para evaluar la estabilidad de tensión, pero pueden ser costosos de implementar. La elección del método adecuado depende de las necesidades específicas de la aplicación, los recursos disponibles y en muchos casos, una combinación de enfoques puede proporcionar una visión más completa de la estabilidad tensión en sistemas de potencia [24].

Uno de los fenómenos que tomado mayor relevancia por los operadores se SEP es recuperación lenta inducida de tensión [25], la cual se refiere al desempeño dinámico en la tensión del sistema en el que, después de una perturbación o falla en el sistema eléctrico, la tensión en la red no se recupera rápidamente a sus niveles normales o nominales. Este fenómeno es particularmente común en situaciones donde una gran parte de la carga del sistema está compuesta por dispositivos que pueden entrar en un estado de estancamiento o bloqueo durante una caída de tensión, como los aires acondicionados residenciales [25].

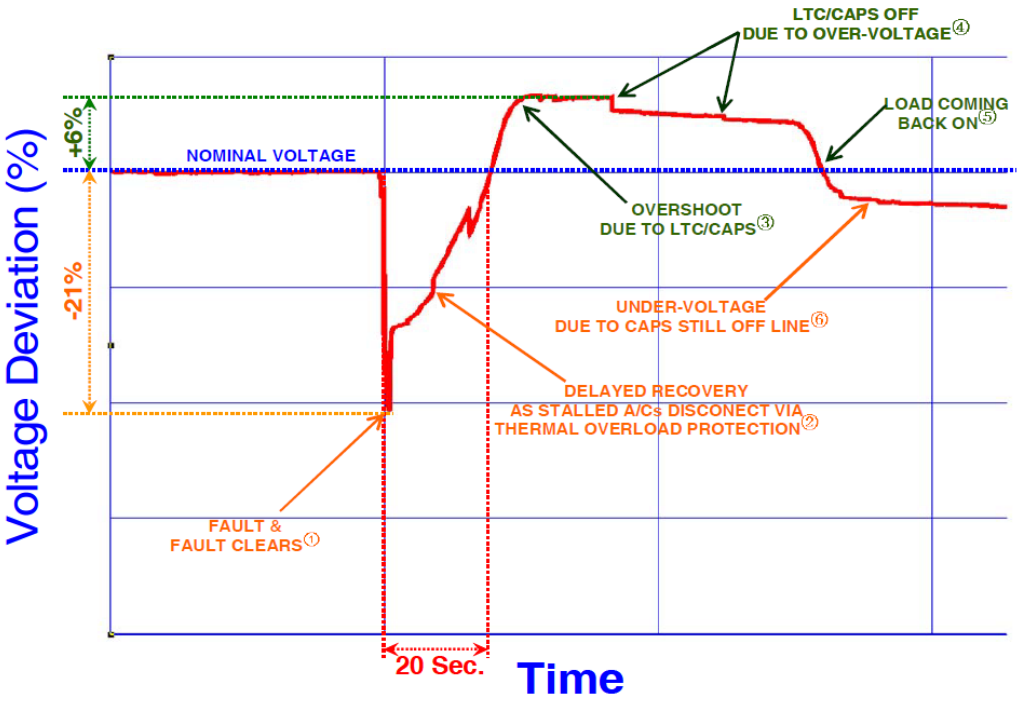

Figura 15. Recuperación de Voltaje Retrasada Típica Después de una Falla de Transmisión de 230 kV en el Sur de California. [26]

La Figura 15 muestra un perfil típico de recuperación de voltaje retrasada en un circuito de transmisión de 230 kV. Esta figura indica que justo después de la falla, el voltaje disminuyó al 79% del voltaje nominal (punto 1) antes de que la falla sea despejada por el esquema de protección de la red. Esta caída de voltaje causó que las unidades de aire acondicionado se bloquearan, ya que el voltaje en los circuitos de distribución era aún menor. Las unidades de aire acondicionado bloqueadas impidieron que el voltaje se recuperara al nivel nominal (punto 2). Cuando la protección térmica contra sobrecarga de las unidades de aire acondicionado se activó, el voltaje se recuperó gradualmente, pero superó el voltaje nominal (en este caso un 6% por encima) porque los bancos de capacitores aún estaban conectados al circuito (punto 3). Esta sobrecarga causó otro problema, que fue la desconexión del banco de capacitores debido a la sobrecarga (punto 4). Con los capacitores desconectados y la carga (incluyendo la carga de los aires acondicionados) llevando el voltaje descendió por debajo del voltaje nominal (puntos 5 y 6). Este comportamiento puede causar otro problema dado que el circuito se hace más vulnerable a otra cadena similar de eventos [26].

3.1.2.1. Evaluación de la Estabilidad en Tensión por Medio de Mediciones: Las técnicas de monitoreo de estabilidad de tensión se basan en la toma de datos y se han desarrollado a lo largo de los años para evaluar la estabilidad de tensión en línea y fuera de línea. Las metodologías incluyen el uso de mediciones de fasores de tensión, redes neuronales artificiales, estimadores de estado, equivalentes Thevenin del sistema, curvas V-I, técnicas de control preventivo y monitoreo en tiempo real. Esta revisión proporciona una base sólida para el marco teórico y contribuye al entendimiento de las diversas herramientas disponibles para el análisis de la estabilidad de tensión en sistemas eléctricos [24]. A continuación, se presentan algunos Indicadores de Estabilidad de Tensión (VSIs, por sus siglas en inglés), que permiten evaluar la estabilidad de tensión en los SEPs por medio de mediciones.

3.1.2.2. Índices de estabilidad en tensión (VSIs): Los índices de estabilidad de tensión representan valores escalares que permiten evaluar la distancia entre la situación actual de operación de un sistema eléctrico y su punto crítico de inestabilidad de tensión. Estos índices se calculan teniendo en cuenta diversos factores, como la matriz de admitancia nodal, los resultados de flujos de potencia que incluyen magnitudes de tensión y ángulos, entre otros parámetros relevantes [9]. Además de su capacidad para cuantificar la distancia a la inestabilidad, los índices de estabilidad de tensión también son útiles para identificar barras y líneas críticas en el sistema, y a partir de esta información, determinar áreas críticas de estabilidad de tensión donde se deben aplicar medidas correctivas [5].

Los índices basados en mediciones se centran en el uso de datos fasoriales de tensión y corriente en el punto de análisis, así como en otros puntos de medición dentro del SEP. Estos datos proporcionan información directa sobre la estabilidad de tensión en diferentes lugares del sistema. Algunas implementaciones de esta metodología también requieren información adicional sobre los parámetros del SEP, como resistencias, reactancias y otros elementos, que se obtienen de la matriz de admitancia del sistema [6]. A continuación, se presentan algunos índices de estabilidad en tensión basados en mediciones que han sido identificados en la literatura.

- Índice moderno de estabilidad de tensión para predecir el colapso de tensión: El índice propuesto por los autores en [7], se presenta como el Modern Voltage Stability Index (MVSI) en el contexto de la evaluación y predicción de la estabilidad de tensión en sistemas eléctricos de potencia. Su formulación matemática se basa en un modelo simplificado de un sistema de transmisión eléctrica (ver Figura 16), representando la relación entre la magnitud de la tensión de la fuente (V_s), la magnitud de la tensión de recepción (V_R) y la diferencia angular de tensión (δ). El MVSI se define como una función de la tensión del extremo emisor (V_s), potencia activa (P_R) y potencia reactiva (Q_R) en el extremo de recepción, así como la impedancia (Z) y la reactancia de la línea de transmisión (X), como se muestra en las ecuaciones 18 y siguientes.

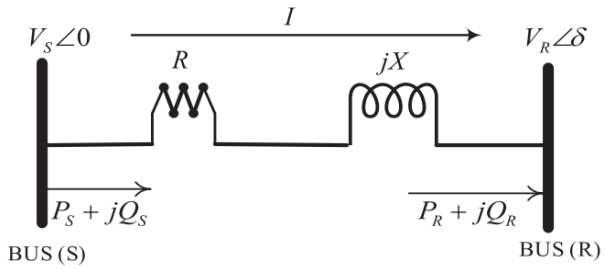

Figura 16. Diagrama simplificado de una línea eléctrica.

$$MVSI = \frac{2Z^2\sqrt{{P_R}^2 + {Q_R}^2}}{2|Q_R|Z^2 - X{V_s}^2} \leq 1 \tag{18}$$

La expresión matemática del MVSI (18), se deriva de ecuaciones que modelan la corriente y la potencia compleja en la línea de transmisión. Notablemente, el índice tiene en cuenta la resistencia parcial de la rama de la línea, destacando la importancia de este factor para evitar errores significativos en la predicción de colapsos. Su aplicabilidad se destaca en su capacidad para considerar tanto la caída de tensión debida a la impedancia de la línea como la relación entre las potencias activa y reactiva en el extremo de recepción. El índice propone que el sistema es estable cuando $MVSI \leq 1$.

El MVSI, destaca por su mejora significativa sobre otros índices existentes en la literatura. En comparación con indicadores previos como Lmn, FVSI, LQP, VSLI y NLSI, el MVSI sobresale en términos de precisión y eficacia en la predicción de colapsos de tensión en sistemas eléctricos de potencia. Para una comprensión más profunda de la formulación y definición de los índices previamente mencionados, se recomienda consultar la referencia [5].

- Índice de estabilidad: Stability index (SI) [5], se deriva de la ecuación cuadrática de tensión en los extremos de envío y recepción de un bus, así como la potencia en el extremo receptor de la rama.

$$SI = V^4 - 4\{P_R R + Q_R X\}V^2 - 4\{P_R X + Q_R E\}^2 \quad (19)$$

Cuando el valor de SI (19) es menor que cero, se considera que el sistema se encuentra en una condición de inestabilidad.

- Derivada (D) de la potencia aparente (S) con respecto a la admitancia (D)[27]: El índice DSY estima la cercanía al límite de cargabilidad, con dos mediciones locales escalares consecutivas. Se basa en que la potencia aparente de la carga es cero en el límite de cargabilidad. La ecuación se presenta en (20).

$$DSY = \frac{\Delta S_i}{{V_i}^2 \Delta Y_i} = \frac{S_{i,2} - S_{i,1}}{(V_{i,1})^2(\frac{I_{i,2}}{V_{i,2}} - \frac{I_{i,1}}{V_{i,1}})} \quad (20)$$

- Índice de estabilidad de carga: Voltage stability load index (VSLI), es obtenido a partir de un sistema de dos barras conectados a un circuito equivalente de thevenin como se muestra en la ecuación 21.

$$VSLI = \frac{4[V_R V_S \cos(\delta) - {V_R}^2 \cos(\delta)]}{{V_S}^2} \quad (21)$$

Cuando el valor de VSLI (20) es mayor a 1, se considera que el sistema se encuentra en una condición de inestabilidad.

3.2 Indicadores de desempeño dinámico de tensión basado en la experiencia de operadores de SEP

El enfoque basado en criterios de desempeño dinámico de tensión surge de la experiencia acumulada por diferentes operadores de sistemas eléctricos en todo el mundo. Estos criterios son desarrollados y aplicados por entidades como las compañías eléctricas, operadores de sistemas de energía, consejos de confiabilidad y organizaciones normativas [25]. Su objetivo principal es proporcionar pautas y estándares que garanticen un desempeño adecuado de la tensión anticipándose a problemas de inestabilidad del sistema eléctrico, especialmente en situaciones críticas como las perturbaciones de tensión transitorias tras la eliminación de fallas. Estos criterios se basan en la recopilación de datos de desempeño del sistema eléctrico, evaluaciones de riesgo y análisis de eventos pasados. Su aplicación es esencial para garantizar la operación segura y confiable de los sistemas de energía eléctrica, y la diversidad de criterios existentes refleja las variaciones en las características y requisitos específicos de cada red eléctrica.

La aplicación de criterios de desempeño dinámico de la tensión permite a los operadores de sistemas eléctricos identificar áreas críticas en el sistema, así como barras y líneas que pueden ser propensas a problemas de estabilidad de tensión. Esto facilita la implementación de medidas correctivas y acciones de mitigación para prevenir situaciones de inestabilidad que podrían dar lugar a interrupciones en el suministro de energía eléctrica. Estos criterios son fundamentales para garantizar la seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico en las redes de todo el mundo, adaptándose a las necesidades y particularidades de cada sistema eléctrico. En [25] se realiza una revisión de los criterios de diferentes operadores de SEP:

3.2.1 WECC (Consejo de Coordinación de Electricidad del Oeste):

Los estándares de planificación del WECC son tomados del documento “Estándares de planificación, abril de 2003” del NERC/WECC. A continuación, se resumen los criterios de tensión de WECC según las categorías de desempeño de NERC:

- El voltaje debe recuperarse al 80% del voltaje previo a la contingencia dentro de los 20 segundos posteriores al evento inicial para todos los eventos desde P1 hasta P7.

- El voltaje en cada bus aplicable del SEP que suministre carga no debe caer por debajo del 70% del voltaje previo a la contingencia por más de 30 ciclos ni permanecer por debajo del 80% del voltaje previo a la contingencia por más de dos segundos para todos los eventos desde P1 hasta P7.

- Para contingencias sin una falla (evento de categoría P2.1), las caídas de voltaje en cada bus aplicable del BES que suministre carga no deben caer por debajo del 70% del voltaje previo a la contingencia por más de 30 ciclos ni permanecer por debajo del 80% del voltaje previo a la contingencia por más de dos segundos.

Los tipos de modos de operación (Desde P0 hasta P7) se definen en el documento de la NERC “Transmission System Planning Performance Requirements” [28].

En la documentación de WECC, se establecen criterios de tensión para las categorías B y C de NERC, que definen límites para la disminución de tensión en diversas situaciones de contingencia. Se puede observar el criterio de recuperación lenta de tensión en la Figura 17 y el criterio de recuperación normal de tensión después de un evento en el sistema en la Figura 18. Estos criterios se extraen del documento TRL-001-WECC-CRT-3.2, conocido como el "Documento de planificación del rendimiento del sistema de transmisión" [29].

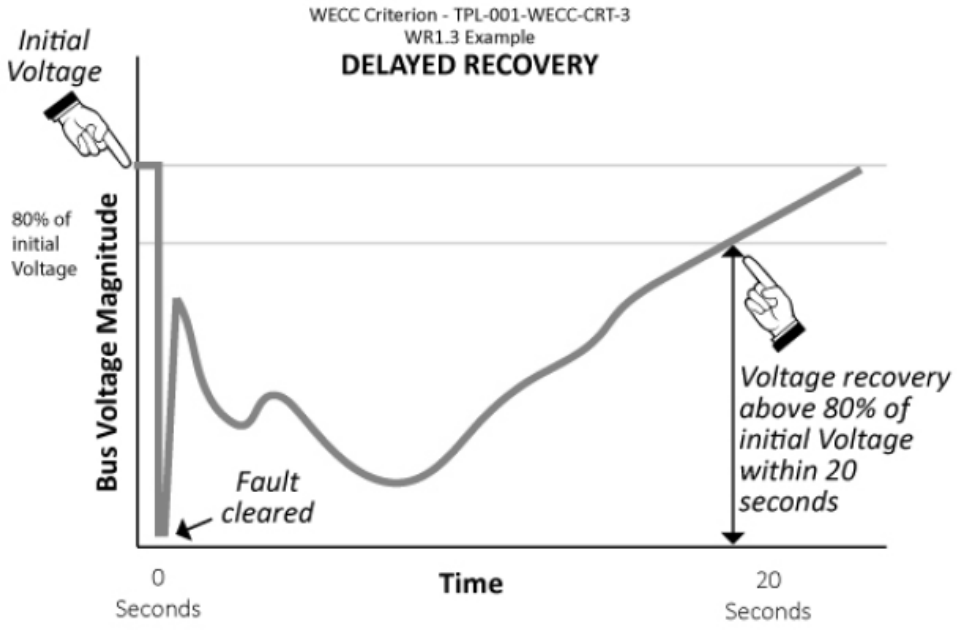

Figura 17. Criterio de recuperación lenta de tensión de WECC [29]

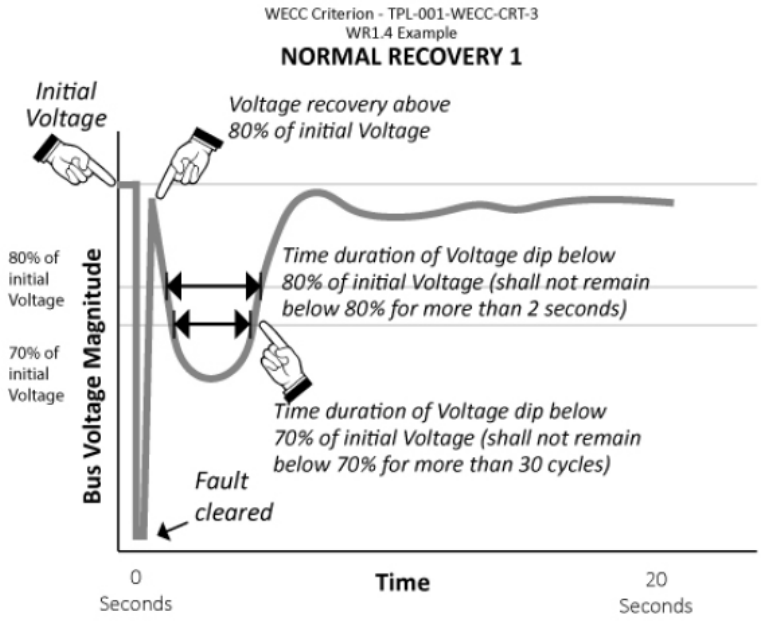

Figura 18. Criterio de recuperación de tensión después de un evento de WECC [29]

3.2.2 ISO New England

ISO New England (ISO-NE) es una organización independiente que opera y planifica la red eléctrica de Nueva Inglaterra, compuesta por seis estados en los Estados Unidos: Connecticut, Maine, Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island y Vermont. ISO-NE se encarga de asegurar el funcionamiento continuo y confiable del sistema eléctrico, así como de planificar su desarrollo futuro para satisfacer las necesidades energéticas de la región [30].

El "Transmission Planning Technical Guide" de ISO New England establece criterios detallados para el desempeño de la tensión, particularmente en relación con las caídas de tensión transitorias y las recuperaciones post-falla. Uno de los criterios específicos implementados por esta organización es que la caída de tensión de secuencia positiva mínima posterior a la falla debe mantenerse por encima del 70% del voltaje nominal. Además, no debe exceder los 250 milisegundos por debajo del 80% del voltaje nominal dentro de los 10 segundos posteriores a una falla. Estos límites están respaldados por las tolerancias típicas de caída de tensión mostradas en las Figuras C.5 a C.10 de la Norma IEEE 1346-1998 [31].

3.2.3 MAPP (Área de Potencia de Medio Continente)

MAPP establece criterios específicos de caída de tensión. Por ejemplo, para algunos buses, no permite que la tensión caiga por debajo del 0.70 p.u. ni exceda el 1.20 p.u. durante un tiempo específico después de la eliminación de una falla.

3.2.4 WPSC (Corporación de Servicios Públicos de Wisconsin)

WPSC exige que la tensión del bus de transmisión sea mayor al 0.90 p.u. a 0.5 segundos después de una falla y al 0.95 p.u. a 5.0 segundos después de una falla.

3.2.5 ONS-Brazil (Operador Nacional del Sistema Eléctrico en Brasil)

ONS establece que, en la primera oscilación después de una contingencia, la tensión no debe ser menor al 60% de su valor mínimo, y en las siguientes oscilaciones, no debe ser menor al 80% de su valor mínimo.

3.2.6 EdF (Electricité de France)

EdF establece criterios de caída de tensión específicos para generadores conectados a redes regionales e interconectadas. Estos criterios definen valores máximos y mínimos para diferentes duraciones de la caída de tensión, asegurando un desempeño confiable de la red eléctrica. A continuación, se detallan los estándares de EdF para las curvas de tensión versus tiempo con respecto a las caídas de tensión:

Generación conectada a redes regionales (es decir, 225 kV o menos)

- Caída de tensión de 1.0 p.u. durante 250 ms
- Caída de tensión de 0.5 p.u. durante 450 ms
- Pendiente ascendente de la caída de tensión de 0.5 p.u. a 0.9 p.u. en 400 ms
- Caída de tensión de 0.9 p.u. durante 400 ms
- Pendiente ascendente de la caída de tensión de 0.9 p.u. a 1.0 p.u. en 500 ms

Generador conectado a redes de interconexión (es decir, 400 kV)

- Caída de tensión de 1.0 p.u. durante 150 ms
- Caída de tensión de 0.5 p.u. durante 550 ms
- Pendiente ascendente de la caída de tensión de 0.5 p.u. a 1.0 p.u. en 800 ms

3.2.7 Operadores Chinos del Sistema Eléctrico Nacional de China

Para caídas de tensión por debajo de 0.75 que duren más de 1 segundo, los operadores chinos consideran la situación como no aceptable.

3.2.8 Tennessee Valley Authority (TVA)

TVA exige que la tensión del sistema de transmisión se recupere al 90% de la tensión nominal del sistema dentro de 0.5 segundos después de eliminar una falla en la categoría B de NERC.

- Categoría B de NERC

La tensión del sistema de transmisión debe recuperarse al 90% de la tensión nominal del sistema dentro de 0.5 segundos después de la eliminación de la falla.

- Categoría C de NERC

La tensión del sistema de transmisión debe recuperarse al 90% de la tensión nominal del sistema dentro de 0.5 segundos después de la eliminación de la falla o la desconexión de la unidad.

- Categoría D de NERC

Se mide la capacidad del sistema de transmisión para recuperar su tensión nominal después de una falla severa o la desconexión de una unidad generadora. Si la tensión no se recupera al 90% del valor nominal en 0.5 segundos, se considera que hay una pérdida de carga en el sistema.

3.2.9 ITIC (Information Technology Industry Council) Curve

La caída de tensión no debe exceder el 30% durante 1.2 a 30 ciclos (20 ms a 500 ms), el 20% durante 30 a 600 ciclos (500 ms a 10 s), y el 10% para condiciones de estado estable

3.3 Selección de indicador para evaluar el desempeño dinámico de la tensión

Considerando el objetivo planteado en este trabajo, para seleccionar un indicador conservador que permita evaluar la estabilidad y el desempeño dinámico de la tensión, se consolidarán los diferentes criterios mencionados anteriormente, tomando los valores más

restrictivos y aplicándolos de manera integral. A continuación, se presenta el criterio consolidado:

Tabla 1. Indicadores de desempeño dinámico de tensión implementados

Inidicador	Descripción	Referencia	Criterio evaluado
1	La tensión debe recuperarse al 80% de la tensión previa a la contingencia dentro de los 10 segundos **posteriores al despeje de la falla.**	Criterio ITIC	Recuperación lenta de la tensión
2	La tensión en cada bus aplicable del SEP que suministre carga no debe caer por debajo del 70% del voltaje previo a la contingencia por más de 30 ciclos.	Criterio WECC	Desempeño subtransitorio de la tensión
3	La tensión no debe permanecer por debajo del 80% del voltaje previo a la contingencia por más de dos segundos después de superar este umbral.	Criterio WECC	Desempeño transitorio de la tensión
4	La tensión debe recuperarse al 50% de la tensión previa a la contingencia en 450 milisegundos.	Crierio EDF	Desempeño transitorio de la tensión
5	La tensión debe recuperarse al 90% de la tensión previa a la contingencia dentro de los 15 segundos **posteriores al despeje de la falla.**	Criterio propuesto	Estabilidad de la tensión a largo plazo

En este capítulo, se abordaron conceptos de estabilidad de tensión, incluyendo tanto indicadores teóricos como aquellos basados en la experiencia de los operadores del sistema para la evaluación del desempeño dinámico. Posteriormente, se realizó una selección cuidadosa de los indicadores más relevantes, teniendo en cuenta su capacidad para evaluar el desempeño dinámico de la tensión en diferentes horizontes temporales: muy corto, corto y largo plazo. Esta selección permite un análisis más integral de la respuesta del sistema bajo diversas condiciones de operación y eventos de cortocircuito.

4. Caso de estudio

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó el sistema IEEE de 39 barras [32], el cual ha sido ampliamente analizado desde el punto de vista de estabilidad de tensión en muchas referencias bibliográficas. Además, este sistema ofrece un equilibrio adecuado entre complejidad y practicidad. Incluye suficientes elementos (generadores con controles dinámicos, líneas de transmisión, cargas y transformadores) para representar interacciones complejas, sin ser tan grande como para hacer la simulación intensiva. Este sistema se implementa en el software Power Factory como se muestra en la Figura 19, para realizar el análisis del impacto de los modelos de carga seleccionados y presentados en la sección 2.2.

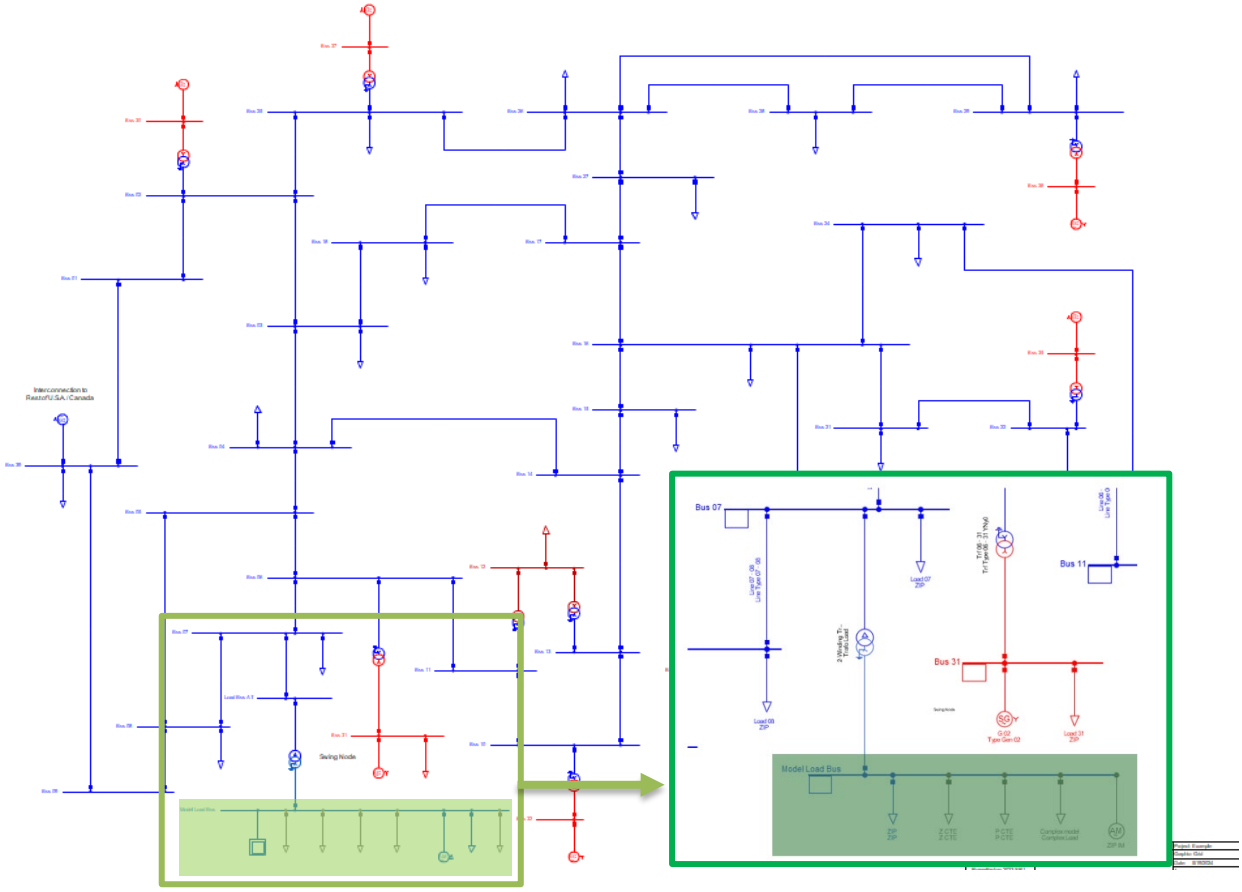

Figura 19. Sistema de prueba IEEE de 39 barras.

4.1 Parametrización de los modelos

La parametrización de los modelos de carga es una etapa crucial para asegurar que estos representen de manera precisa la respuesta agregada de la carga. En este estudio, se lleva a cabo la metodología definida en la sección 2.3, utilizando el modelo compuesto WECC como modelo de referencia debido a su amplia aceptación y versatilidad en la representación de diferentes tipos de carga.

4.1.1 Parametrización del modelo compuesto WECC.

El modelo compuesto WECC se parametrizó utilizando valores típicos obtenidos de la literatura [16] y ajustando los parámetros del motor D para obtener el efecto de la recuperación lenta de la tensión. La distribución de las cargas es mostrada en la Figura 20

Fma	0.2		Share of motor A
Fmb	0.12		Share of motor B
Fmc	0.05		Share of motor C
Fmd	0.25		Share of motor D
Fel	0.195		Share of electronic load
Pset	80	MW	Active power setpoint of the composite load
Qset	40	Mvar	Reactive power setpoint of the composite load

Figura 20. Distribución de los tipos de cargas en el modelo WECC.

Fma, Fmb, Fmc, Fmb corresponde al porcentaje de carga del modelo del motor A, motor B, motor C y D respectivamente. Fel corresponde al porcentaje del modelo de carga electrónica y el porcentaje restante corresponde al modelo de carga estática.

Para obtener una serie de tiempo de referencia, se generó un evento de cortocircuito en la barra 5 del sistema, generando el perfil de tensión del barraje “Model bus load” como se muestra en Figura 21. Además, se parametrizó la potencia activa consumida por la carga (Pset) en 80 [MW] y la potencia reactiva (Qset) en 40 [MVAr].

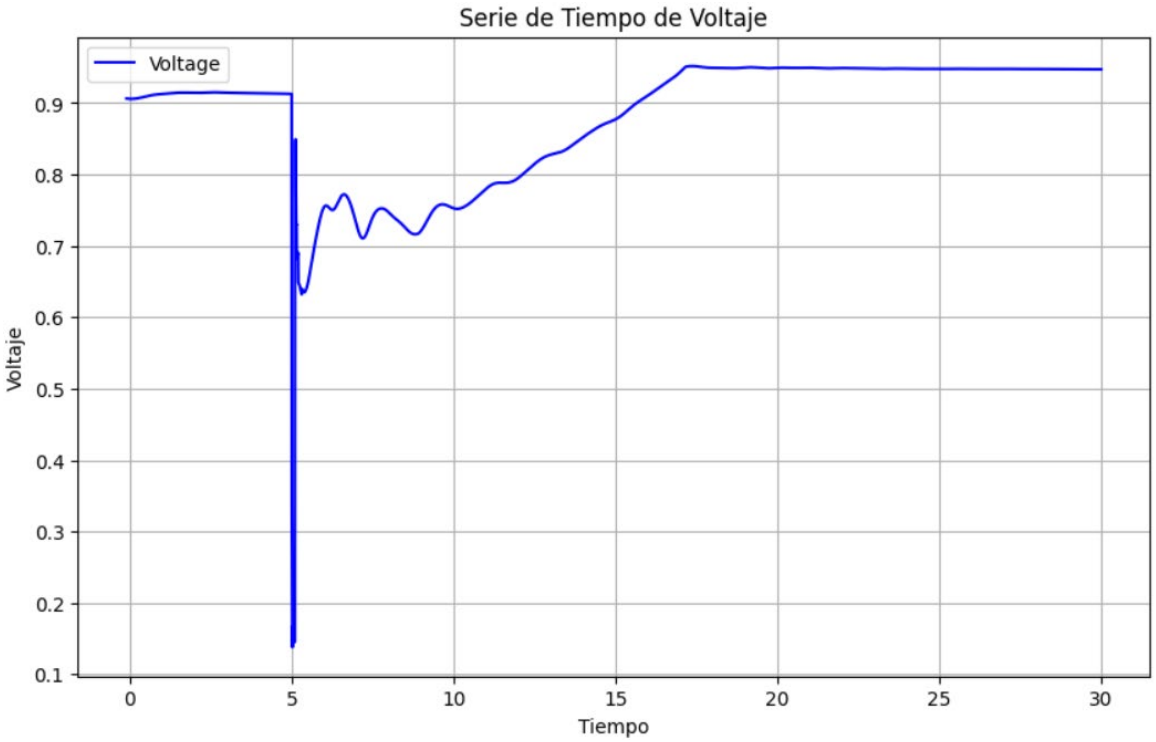

Figura 21. Tensión en el punto de conexión de las cargas con el modelo WECC.

4.1.2 Parametrización de los modelos de carga seleccionados diferentes al WECC

La parametrización de los modelos de carga se realizó siguiendo el procedimiento de parametrización descrito en 2.3 y tomando como referencia el comportamiento dinámico de la tensión mostrado en la Figura 21. Los parámetros descritos para los modelos se presentan desde la Figura 22 hasta la Figura 25. Para los modelos de potencia constante e impedancia constante no fue necesario realizar ajuste de parámetros ya que los únicos parámetros del modelo son la potencia activa y potencia reactiva, las cuales fueron ajustadas en 80 [MW] y 40 [MVAr] respectivamente, como en el modelo WECC.

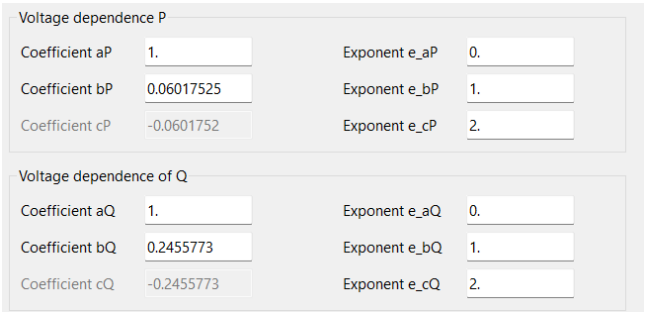

Figura 22. Parametrización modelo ZIP

Donde:

aP, aQ es el grado de participación de la componente de potencia constante.

bP, bQ es el grado de participación de la componente de corriente constante

cP, cQ es el grado de participación de la componente de impedancia constante

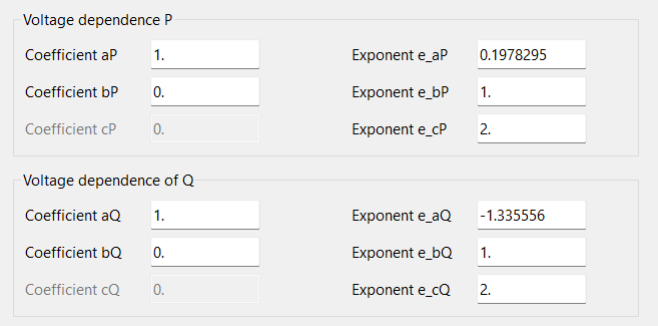

Figura 23 Parametrización modelo exponencial

Donde:

aP es el grado de participación de la componente exponencial (100% para esta aplicación)

e_aP es el parámetro ajustado para la potencia activa.

e_aQ es el parámetro ajustado para la potencia reactiva.

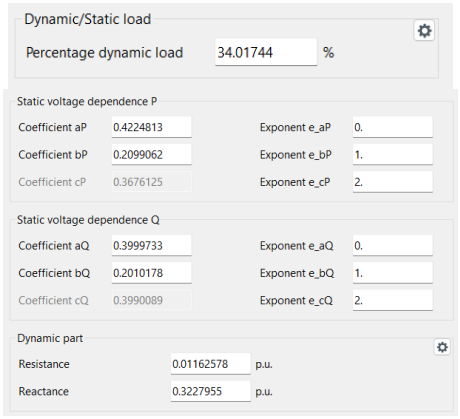

Figura 24. Parametrización modelo complejo

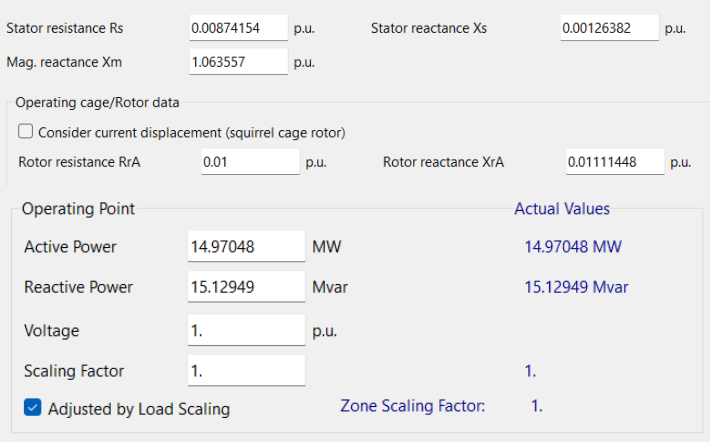

Figura 25. Parametrización modelo ZIP + Motor de inducción

Donde:

Percentage Dynamic load es el porcentaje de carga dinámica asociada al modelo.

Resistance y Reactance son la resistencia y reactancia del estator, asociadas a los modelos dinámicos de los motores.

Donde:

El ajuste de la componente ZIP corresponde a lo mostrado en la Figura 22.

Los valores ajustados son Rs, Xs, Xm, Rra, Xra que corresponde a los valores de resistencia de estator, reactancia de estator, rama de magnetización resistencia de rotor y reactancia de rotor respectivamente.

4.2 Desempeño dinámico de la tensión

En esta sección, se seleccionaron escenarios de fallas que son críticos para evaluar la estabilidad de tensión del sistema. Se eligieron eventos que provocan caídas significativas de tensión en el nodo de conexión de la carga. Estos eventos fueron seleccionados estratégicamente para excitar las dinámicas características de los motores de inducción,

lo que desencadena el fenómeno de recuperación lenta de la tensión. Este tipo de respuesta es especialmente relevante, ya que pone a prueba la capacidad de los modelos de carga para representar con precisión la respuesta transitoria y la recuperación de la tensión bajo condiciones de estrés severo en el sistema eléctrico. La elección de estos escenarios asegura que se evalúe de manera exhaustiva la robustez de los modelos bajo análisis, en condiciones que simulan situaciones reales de operación que podrían comprometer la estabilidad del sistema. Los escenarios planteados se presentan a continuación:

- Escenario 1: Cortocircuito trifásico en la barra “Model Load Bus” (punto de interconexión de los modelos de carga) a los 5 segundos y despeje de falla 100 milisegundos después.
- Escenario 2: Cortocircuito trifásico a el 50% de la línea 04-14 a los 5 segundos y desconexión de la línea a los 100 milisegundos de falla.
- Escenario 3: Cortocircuito trifásico en la barra “Bus 06” a los 5 segundos y despeje de falla 100 milisegundos después.

4.2.1 Desempeño dinámico de la tensión Escenario 1

Durante el escenario 1, se evalúa el cumplimiento de los indicadores para el desempeño dinámico de la tensión mostrado en la Figura 26. En la Tabla 2 se presenta la evaluación de cada indicador según los criterios definidos en la Tabla 1. Además, la Figura 27 presenta el consumo de potencia reactiva de cada modelo de carga durante el escenario 1.

En el modelo ZIP más motor de inducción, se presentan condiciones iniciales específicas para el flujo de carga en términos de tensión y potencia reactiva. Esto se debe a que los parámetros de optimización para este modelo incluyen ajustes que impactan directamente en el flujo de carga, tales como el porcentaje de carga estática y dinámica dentro del modelo. A diferencia de otros modelos, el consumo inicial de potencia reactiva en el modelo ZIP más motor de inducción no corresponde al consumo inicial del modelo WECC debido a estas diferencias en la configuración y la parametrización.

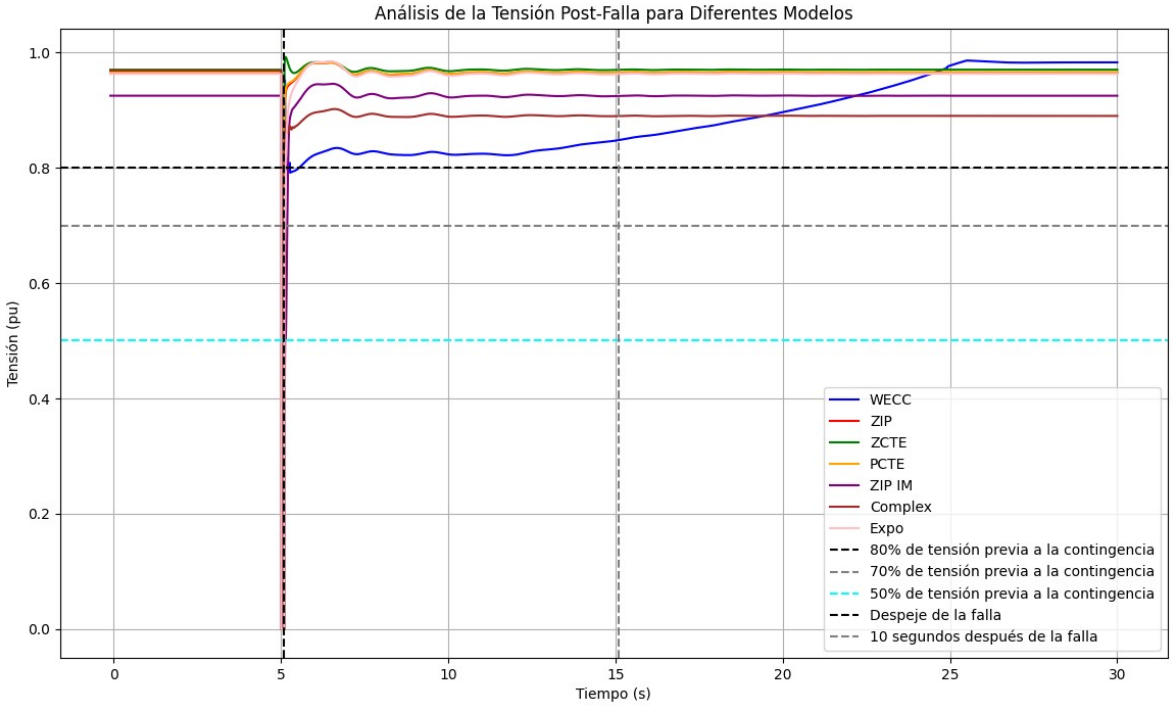

Figura 26. Desempeño dinámico de la tensión - Escenario 1

Tabla 2. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 1

Indicador	Modelo WECC	Modelo ZIP	Modelo Z constante	Modelo P constante	Modelo Exponencial	Modelo ZIP + Motor de inducción	Modelo Complejo
1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
2	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
5	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No

Donde:

- "Sí": Indica que el modelo de carga cumple con el indicador de desempeño dinámico específico. Esto significa que el modelo ha satisfecho el criterio definido en la Tabla 1 para ese indicador en el escenario evaluado.

- "No": Indica que el modelo de carga no cumple con el indicador de desempeño dinámico específico. Esto significa que el modelo no ha satisfecho el criterio definido en la Tabla 1 para ese indicador en el escenario evaluado.

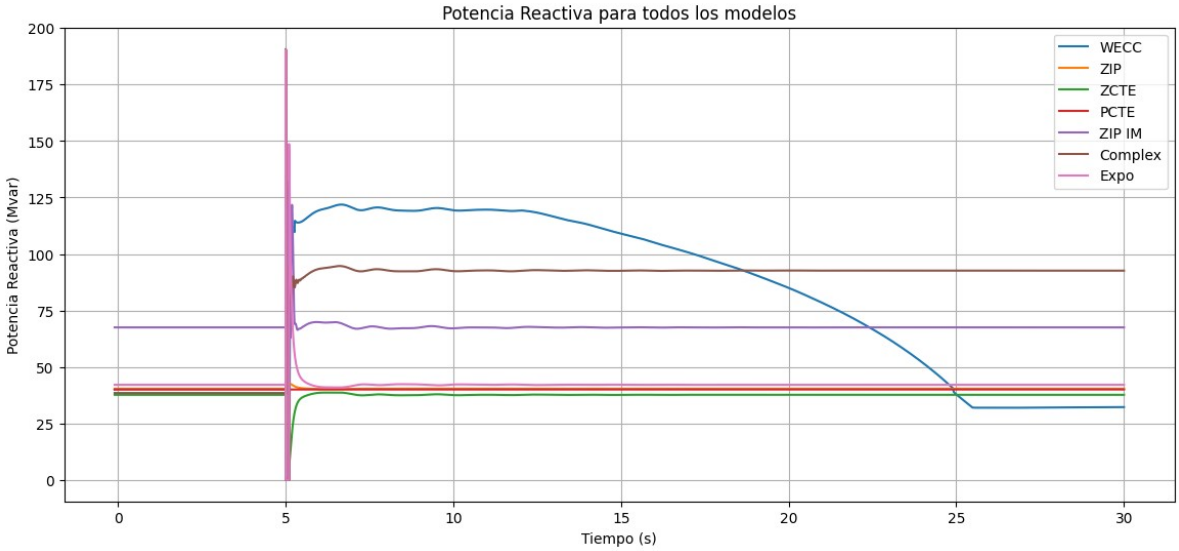

Figura 27. Consumo de potencia reactiva - Escenario 1

4.2.2 Desempeño dinámico de la tensión Escenario 2

Durante el escenario 2, se evalúa el cumplimiento de los indicadores para el desempeño dinámico de la tensión mostrado en la Figura 28. En la Tabla 3 se presenta la evaluación de cada indicador según los criterios definidos en la Tabla 1.

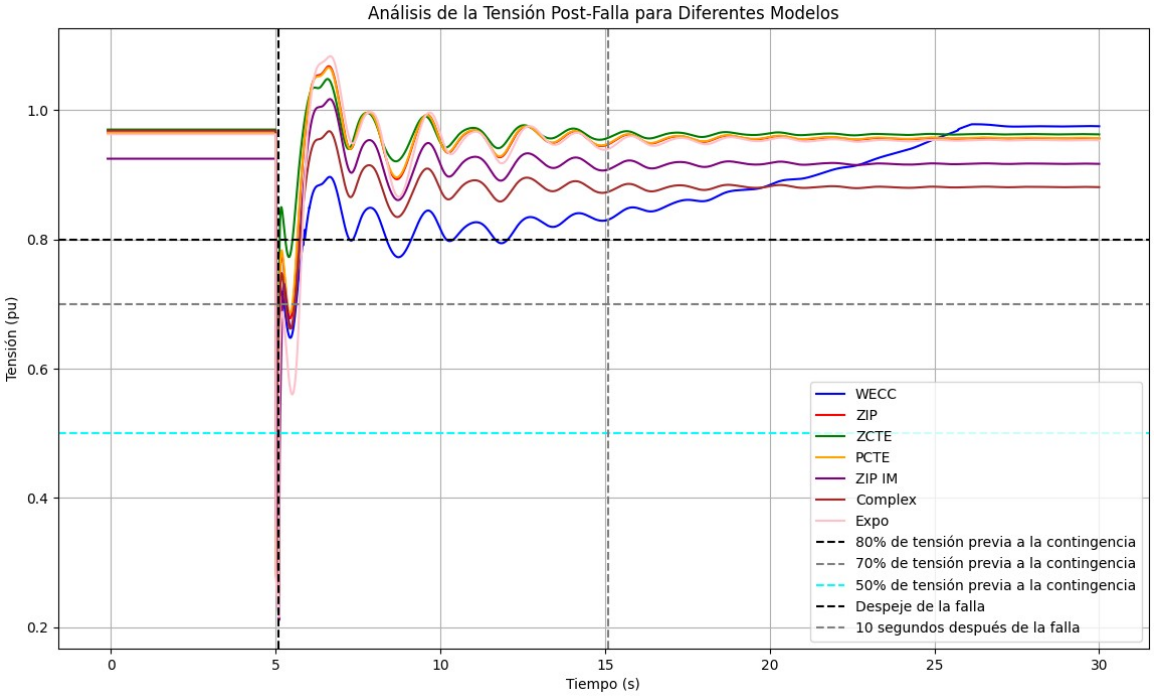

Figura 28. Desempeño dinámico de la tensión - Escenario 2

Tabla 3. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 2

Indicador	Modelo WECC	Modelo ZIP	Modelo Z constante	Modelo P constante	Modelo Exponencial	Modelo ZIP + Motor de inducción	Modelo Complejo
1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
2	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
5	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No

La Figura 29 presenta el consumo de potencia reactiva de cada modelo de carga durante el escenario 2, destacando la incapacidad de los modelos estáticos y del modelo ZIP más motor de inducción para representar el fenómeno de recuperación lenta de la tensión. Esto se debe a que estos modelos recuperan los valores de consumo de potencia reactiva que tenían antes de la falla en menos de 2 segundos.

Un caso particular ocurre con el modelo complejo, donde se observa un aumento en el consumo de potencia activa y una disminución en el consumo de potencia reactiva durante

y después de la falla. Esta diferencia en comportamiento se debe a la inclusión detallada de un motor de inducción en el modelo complejo. Durante la falla, el motor de inducción experimenta un aumento en el deslizamiento, lo que incrementa su consumo de potencia reactiva. Sin embargo, después de la falla, mientras el motor intenta re-acelerar a su velocidad nominal, sigue consumiendo una cantidad significativa de potencia reactiva. Este proceso de re-aceleración es lento debido a la inercia del motor y la constante de tiempo de aceleración (Ti), lo que resulta en un consumo de potencia reactiva que tarda mucho más en retornar a los valores iniciales previos a la falla.

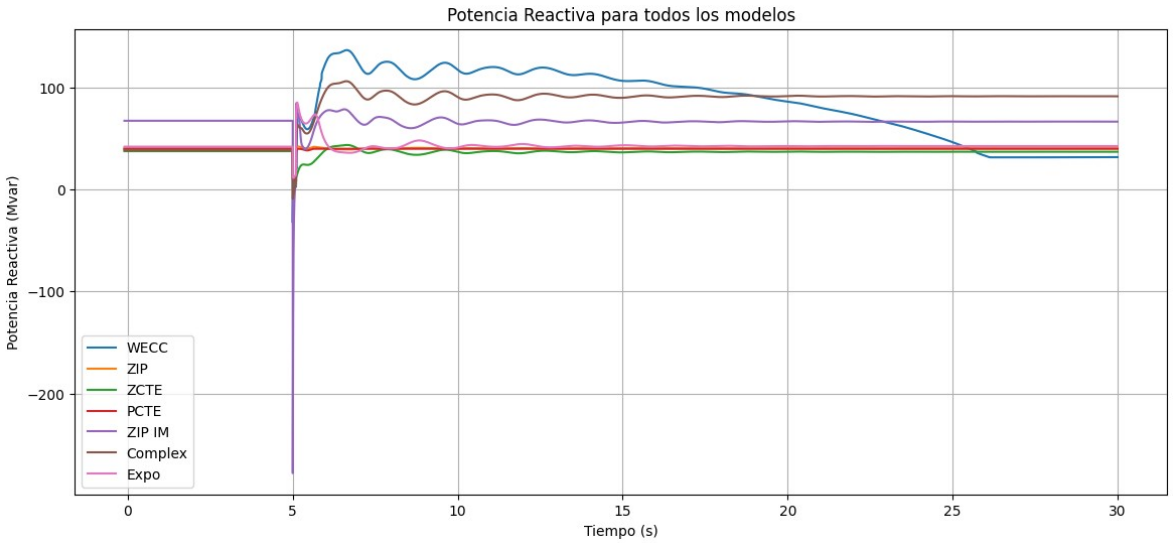

Figura 29. Consumo de potencia reactiva - Escenario 2

4.2.3 Desempeño dinámico de la tensión Escenario 3

Durante el escenario 3, se evalúa el cumplimiento de los indicadores para el desempeño dinámico de la tensión mostrado en la Figura 30. En la Tabla 4 se presenta la evaluación de cada indicador según los criterios definidos en la Tabla 1.

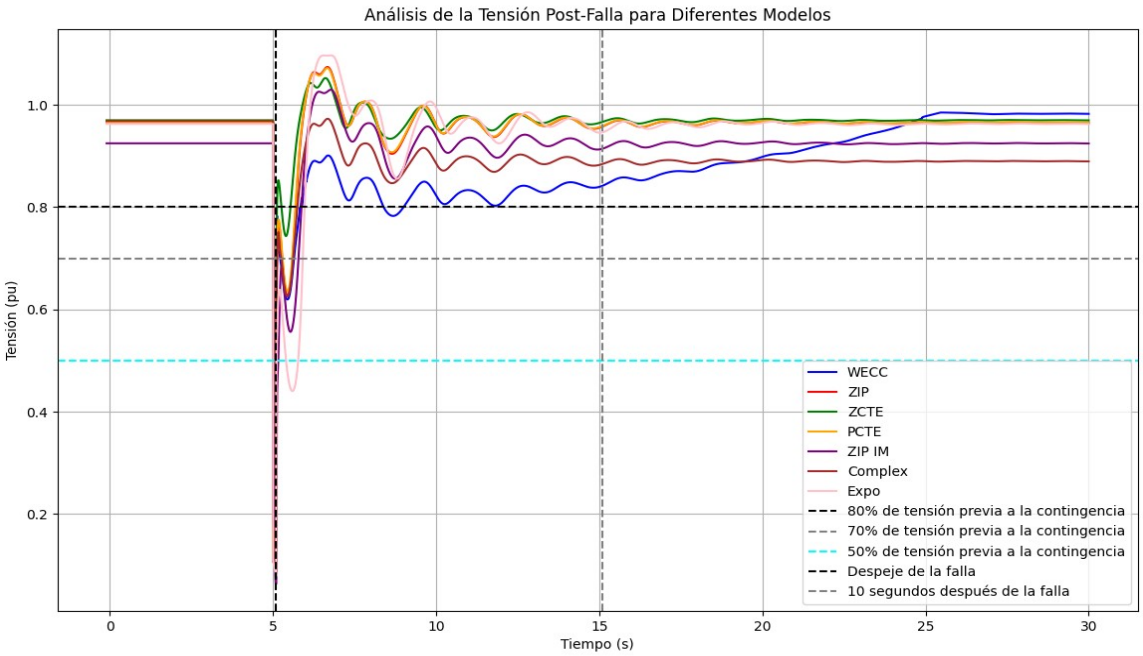

Figura 30. Desempeño dinámico de la tensión - Escenario 3

Tabla 4. Evaluación de los indicadores de desempeño dinámico - Escenario 3

Indicador	Modelo WECC	Modelo ZIP	Modelo Z constante	Modelo P constante	Modelo Exponencial	Modelo ZIP + Motor de inducción	Modelo Complejo
1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
2	No	No	No	No	No	No	No
3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
5	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No

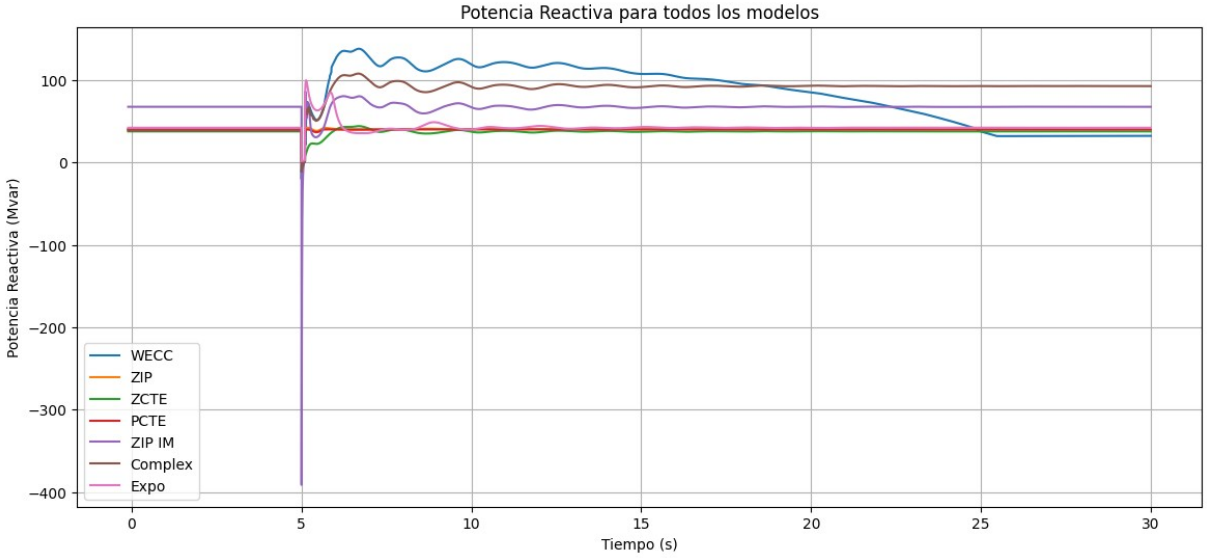

Figura 31. Consumo de potencia reactiva - Escenario 3

4.3 Análisis comparativo

A partir de la revisión de los resultados presentados desde la Figura 26 hasta la Figura 31 y en las Tablas 2, 3 y 4, se encuentra que:

Los modelos dinámicos consiguen capturar las complejas interacciones y respuestas del sistema eléctrico ante perturbaciones. Modelos como el WECC, que incluyen múltiples submodelos para representar diversas cargas, ofrecen una mayor precisión y capacidad de generalización en comparación con los modelos estáticos. Estos modelos permiten simular de manera más realista los fenómenos de recuperación lenta de la tensión y otras dinámicas críticas que pueden ocurrir en un SEP.

Entre los modelos estáticos, el modelo exponencial se destaca por su capacidad para representar adecuadamente las respuestas transitorias de las cargas. Sin embargo, estos modelos carecen de la precisión necesaria para capturar las dinámicas a largo plazo del sistema. En particular, no son efectivos para representar la recuperación lenta de la tensión, un fenómeno común en sistemas con alta penetración de motores de inducción y cargas electrónicas. Los modelos de potencia constante e impedancia constante, aunque

simples, presentan limitaciones similares y no son adecuados para estudios dinámicos detallados.

El modelo complejo intenta representar la caída de tensión y la recuperación, pero presenta limitaciones significativas. Aunque incluye motores de inducción y otros componentes dinámicos, la tensión nunca se recupera completamente a los valores iniciales previos a la falla, lo que no representa la realidad del sistema. Este comportamiento se debe a la inclusión detallada de un motor de inducción en el modelo complejo. Durante la falla, el motor de inducción experimenta un aumento en el deslizamiento, incrementando su consumo de potencia reactiva. Sin embargo, después de la falla, el motor sigue consumiendo una cantidad significativa de potencia reactiva mientras intenta re-acelerar a su velocidad nominal. Este proceso de re-aceleración es lento debido a la inercia del motor y la constante de tiempo de aceleración, lo que resulta en un consumo de potencia reactiva que tarda mucho más en retornar a los valores iniciales previos a la falla.

El modelo ZIP más motor de inducción muestra diferencias notables en su comportamiento inicial comparado con el modelo WECC. Estas diferencias se deben a los ajustes específicos de los parámetros de optimización, que impactan directamente en el flujo de carga, como el porcentaje de carga estática y dinámica dentro del modelo. Esta parametrización resulta en condiciones iniciales específicas para la tensión y la potencia reactiva, que no corresponden a los valores iniciales del modelo WECC.

En la Tabla 5 se presenta una evaluación del desempeño dinámico de la tensión de los diferentes modelos de carga, fundamentada en los indicadores de la Tabla 1.

Tabla 5. Desempeño dinámico de la tensión de los modelos de carga

MODELO DE CARGA	RESPUESTA TRANSITORIA	RECUPERACIÓN LENTA DE LA TENSIÓN	ESTABILIDAD A LARGO PLAZO	COMENTARIOS
WECC	Sí	Sí	Sí	Modelo robusto y versátil, adecuado para estudios dinámicos detallados.
ZIP	Sí	No	Sí	Bueno para respuestas transitorias, pero no representa bien la recuperación lenta.
Z CONSTANTE	Sí	No	Sí	Representa respuestas transitorias simples, no adecuado para dinámicas a largo plazo.
P CONSTANTE	Sí	No	Sí	Representa respuestas transitorias simples, no adecuado para dinámicas a largo plazo.
EXPONENCIAL	Sí	No	Sí	Mejor que otros modelos estáticos

				para transitorios, pero carece de precisión a largo plazo.
ZIP + MOTOR DE INDUCCIÓN	Sí	No	Sí	Incluye motores de inducción que ayudan a representar mejor las dinámicas transitorias y algunas dinámicas un par de segundos después del despeje de la falla.
COMPLEJO	Sí	Parcialmente	Sí	Intenta representar la caída de tensión provocada por los motores y el consumo de potencia reactiva de los mismos. Sin embargo, estos valores se mantienen a largo plazo por lo que no representa la realidad de las cargas.

Con la revisión de la Tabla 4 se puede concluir que ninguno de los modelos permite evaluar el impacto en la tensión tal como el modelo WECC, siendo el modelo complejo el que más se acerca a su respuesta.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La implementación de indicadores de desempeño dinámico de la tensión permite una evaluación robusta y detallada del comportamiento de los modelos de carga, lo que facilita la identificación de sus fortalezas y limitaciones en la representación de las dinámicas del sistema eléctrico.

El modelo WECC es esencial para capturar con precisión las interacciones complejas y las respuestas del sistema eléctrico ante perturbaciones. Este modelo permite una simulación más realista de fenómenos críticos, como la recuperación lenta de la tensión, que no pueden ser representados adecuadamente por los otros modelos de carga.

Aunque los modelos estáticos, como el modelo exponencial, son útiles para representar respuestas transitorias, carecen de la precisión necesaria para capturar las dinámicas a largo plazo del sistema. En particular, no son efectivos para representar la recuperación lenta de la tensión, un fenómeno común en sistemas con alta penetración de motores de inducción monofásicos como los encontrados en los aires acondicionados.

El modelo complejo, aunque intenta representar la caída de tensión y la recuperación, presenta limitaciones significativas. La tensión nunca se recupera completamente a los valores iniciales previos a la falla, lo que no representa la realidad del sistema. Este comportamiento se debe a la inclusión detallada de un motor de inducción en el modelo complejo, que experimenta un aumento en el deslizamiento durante la falla, incrementando su consumo de potencia reactiva.

En el modelo ZIP más motor de inducción, se presentan condiciones iniciales específicas para el flujo de carga en términos de tensión y potencia reactiva. Estas diferencias se

deben a los ajustes específicos de los parámetros de optimización, que impactan directamente en el flujo de carga, tales como el porcentaje de carga estática y dinámica dentro del modelo.

Los modelos dinámicos como el complejo y el ZIP más motor de inducción no son suficientes para estudios dinámicos que impliquen variaciones considerables en el SEP de análisis. A diferencia del modelo WECC, estos modelos no representan adecuadamente las dinámicas de los aires acondicionados, la acción de protecciones eléctricas, la conexión y reconexión de contactores, entre otras dinámicas que dependen del nivel de tensión y que son típicas en los sistemas eléctricos. Este tipo de dinámicas puede generar recuperaciones lentas de tensión, sobretensiones y otras respuestas que no son posibles de representar con los modelos complejos y ZIP más motor de inducción. Por lo tanto, para estudios que requieran un análisis detallado de la estabilidad de tensión y la respuesta dinámica del sistema, es crucial utilizar modelos que puedan capturar estas variaciones y comportamientos complejos, como lo hace el modelo WECC.

En este trabajo se han logrado cumplir todos los objetivos propuestos de manera satisfactoria. Se implementaron y evaluaron diversos modelos de carga en el sistema IEEE de 39 barras, utilizando el software Power Factory, para analizar su impacto en el desempeño dinámico de la tensión. Los resultados mostraron que el modelo WECC es el más robusto y versátil, capaz de capturar con precisión las interacciones complejas y las respuestas del sistema eléctrico ante perturbaciones, cumpliendo con los indicadores de desempeño definidos. Se destacaron las limitaciones de los modelos estáticos y de algunos modelos dinámicos, como el complejo y el ZIP más motor de inducción, que no lograron representar adecuadamente la recuperación lenta de la tensión.

5.2 Recomendaciones

Es recomendable analizar la interacción del modelo WECC con otras dinámicas del sistema eléctrico, como las fuentes de generación basadas en inversores y dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Estos componentes modernos tienen características de comportamiento distintas que pueden influir significativamente en la estabilidad de tensión y la dinámica del sistema. Evaluar cómo el modelo WECC interactúa

con estas tecnologías ayudará a identificar posibles mejoras en la parametrización del modelo y permitirá desarrollar estrategias de control y operación más efectivas para mantener la estabilidad y eficiencia del sistema.

Es crucial realizar un análisis exhaustivo tomando como referencia medidas reales de diferentes escenarios operativos del sistema eléctrico. Esto permitirá ajustar todos los modelos de carga, incluyendo el modelo WECC, para que reflejen con mayor precisión las condiciones y dinámicas reales del sistema. La recopilación de datos de campo durante diversas condiciones de carga y eventos transitorios proporcionará una base sólida para la validación y optimización de los parámetros de cada modelo. Este enfoque mejorará la representatividad de los modelos y aumentará la confiabilidad de los estudios de estabilidad y desempeño del sistema.

La implementación de modelos ajustados y validados con datos reales debe ir acompañada de una estrategia de validación continua. Es fundamental establecer un proceso regular de comparación entre las simulaciones del modelo y las mediciones reales del sistema. Esto permitirá detectar discrepancias y ajustar los modelos de manera iterativa, asegurando que sigan representando fielmente las condiciones operativas del sistema eléctrico. La validación continua también contribuirá a la identificación temprana de problemas potenciales y la implementación de soluciones proactivas.

Además, con la incorporación de las tecnologías basadas en inversores, es importante considerar simulaciones de transitorios electromagnéticos (EMT) para capturar las dinámicas de alta frecuencia que se pueden presentar en el SEP y su interacción con la carga eléctrica.

Bibliografía

[1] P. Kundur, *Power system stability and control*. Palo Alto, California, 1994.

[2] Carson W. Taylor, “Power System Voltage Stability,” Palo Alto, California, 1994.

[3] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, and D. Zhao, “Load modeling - A review,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 5986–5999, Nov. 01, 2018. doi: 10.1109/TSG.2017.2700436.

[4] “Reliability Guideline Developing Load Model Composition Data NERC | Report Title | Report Date I,” 2017.

[5] H. S. Salama and I. Vokony, “Voltage stability indices–A comparison and a review,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 98, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.107743.

[6] S. M. Pérez-Londoño, G. Olivar-Tost, and J. J. Mora-Flórez, “Una propuesta de clasificación para los índices de estabilidad de tensión Voltage stability indices-A review and a new classification,” 2014.

[7] S. Mokred, Y. Wang, and T. Chen, “Modern voltage stability index for prediction of voltage collapse and estimation of maximum load-ability for weak buses and critical lines identification,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 145, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108596.

[8] J. Modarresi, E. Gholipour, and A. Khodabakhshian, “A comprehensive review of the voltage stability indices,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63. Elsevier Ltd, pp. 1–12, Sep. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.010.

[9] RAMÍREZ SINDY, “Metodología para el monitoreo de la estabilidad de tensión en tiempo real en sistemas de potencia usando mediciones,” UNIVERSIDAD DEL VALLE, SANTIAGO DE CALI, 2018.

[10] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Canadian Region. and Institute of Electrical and Electronics Engineers. Vancouver Section., *2008 IEEE Electrical Power and Energy Conference : “energy innovation” : Vancouver, BC, Canada, October 6-7 2008*. IEEE, 2008.

[11] X. Xu, M. Elkhatib, and M. Wu, “NERC TPL-001-4 Compliance Study: Application of A New Composite Load Model in Dynamic Voltage Assessment,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE Computer Society, Aug. 2020. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281597.

[12] vol. 8, no. 2, pp. 472–482, IEEE Trans. Power Syst., “Load representation for dynamic performance analysis,” 1993.

[13] IEEE Power & Energy Society, IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems 3 2013.10.02-04 Istanbul, and EPECS 3 2013.10.02-04 Istanbul, *2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS) 2-4 Oct. 2013, Yildiz Technical University, Davutpase Campus, Istanbul, Turkey*.

[14] Z. Ma, Z. Wang, Y. Wang, R. Diao, and D. Shi, “Mathematical representation of WECC composite load model,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 5, pp. 1015–1023, Sep. 2020, doi: 10.35833/MPCE.2019.000296.

[15] “NERC | Technical Reference Document, Dynamic Load Modeling” 2016.

[16] “Technical Reference on the Composite Load Model”. EPRI

[17] Gaikwad Anish, Markham Penn, and Pourbeik Pouyan, *Implementation of the WECC Composite Load Model for Utilities using the Component-Based Modeling Approach*, IEEE T & D Exposition. 2016.

[18] W. H. Press, “Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing,” *Cambridge University Press*, 2007.

[19] D. E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning,” *Addison-Wesley*, 1989.

[20] J. K. y T. B. R. Poli, “Particle Swarm Optimization: An Overview,” *Swarm Intelligence*, 2007.

[21] J. A. Nelder y R. Mead, “A Simplex Method for Function Minimization,” *Computer Journal, vol. 7, no. 4, pp. 308-313*, 1965.

[22] L. Korunovic *et al.*, “Overview of Existing Load Models and Their Applications,” 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271272882

[23] N. Hatziargyriou *et al.*, “Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, Jul. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.

[24] J. E. Candelo, G. Caicedo, and F. Castro, “Métodos para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia,” *Informacion Tecnologica*, vol. 19, no. 5, pp. 97–110, 2008, doi: 10.1612/inf.tecnol.3963it.07.

[25] M. J. J. P. F. C. W. T. F. D. J. Shoup, “A Survey of Current Practices for Transient Voltage Dip/Sag Criteria Related to Power System Stability,” *IEEE*, 2004.

[26] A. Dmitry Kosterev, “Load Modeling in Power System Studies: WECC Progress Update,” 2008.

[27] M. Parniani and M. Vanouni, “A fast local index for online estimation of closeness to loadability limit,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 584–585, Feb. 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036460.

[28] “TPL-001-5-Transmission System Planning Performance Requirements.”

[29] “TPL-001-WECC-CRT-3.2-Transmission System Planning Performance 2 4.2.2.7. Other buses specifically excluded by each Planning Coordinator or Transmission Planner internal to its system,” 2019.

[30] I. New England, “Transmission Planning Technical Guide © ISO New England Inc. System Planning” 2024.

[31] “Transmission Planning Technical Guide Appendix E Dynamic Stability Simulation,” Iso New England, 2013.

[32] R. Podmore and S. V. Memeber, “A practical method for the direct analysis of transient stability.” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.2 March/April 1979

Anexo 1: Parámetros implementados en el modelo de carga WECC

A continuación, se detallan los parámetros utilizados en DIgSILENT PowerFactory para la parametrización del modelo compuesto de carga WECC. Estos parámetros han sido extraídos de [16], donde se justifica su elección en función de las características típicas de las cargas industriales y residenciales. Esta parametrización permite representar con precisión la respuesta dinámica de las cargas, asegurando que el modelo refleje las condiciones reales de operación en diferentes escenarios.

Parámetros del motor A

Parameter	Default	Reason
LfmA	0.75	Load MVA = MW/MVA Rating
RsA	0.04	These are 'generic' motor parameters for this type of load, based on laboratory testing.
LsA	1.8	
LpA	0.12	
LppA	0.104	
TpoA	0.095	
TppoA	0.0021	
HA	0.1	Majority of these motors are small – low inertia
etrqA	0*	$T_{mech} = T_{mech,0} * \omega^{E_{trq}}$ – Constant Torque
Vtr1A	0.65	Assumed performance of these motors: • Represents higher performance motors – large commercial building chillers/air handlers • First trip level at about 0.65 pu voltage, trip time around 100 ms • 20% of these motors have this type of protection • Manual reconnection
Ttr1A	0.1	
Ftr1A	0.2	
Vrc1A	0.1	
Trc1A	9999	
Vtr2A	0.5	Assumed performance of these motors: • Represents majority of 'brute' motors – standard design, rugged, automated • Contactor tripping levels - 0.50 pu voltage, trip time < 2 cycles • 75% of these motors have this type of protection • Contactors reclose around 0.65 pu within 100 ms. NOTE: Vtr1A & Vtr2A should not equal 1; keep some fraction online at all times for numerical purposes with the model.
Ttr2A	0.02	
Ftr2A	0.75	
Vrc2A	0.65	
Trc2A	0.1	

Parámetros del motor B

Parameter	Default	Reason
LfmB	0.75	Load MVA = MW/MVA Rating
RsC	0.03	These are 'generic' motor parameters for this type of load, based on laboratory testing.
LsB	1.8	
LpB	0.19	
LppB	0.14	
TpoB	0.2	
TppoB	0.0026	
HB	0.5	Large inertia commercial/industrial fan motor loads
etrqB	2*	$T_{mech} = T_{mech,0} * \omega^{E_{trq}}$ - Torque ∝ Speed-Squared

Vtr1B	0.55	Assumed performance of these motors:
		• All fans assumed to only have contactor tripping – no controls-based protection; therefore
		• Two sets of tripping levels representing diversity of motor load
		• Level 1
		  • Trip at 0.55 pu voltage, trip time < 2 cycles
		  • 30% of these motors have this type of protection
		  • Auto-reconnect – 0.65 pu voltage within 50 ms
		• Level 2
		  • Trip level at 0.50 pu voltage, trip time < 2 cycles
		  • 30% of these motors have this type of protection
		  • Auto-reconnect – 0.6 pu within 50 ms

Ttr1B	0.02	
Ftr1B	0.3	
Vrc1B	0.65	
Trc1B	0.05	
Vtr2B	0.5	
Ttr2B	0.025	
Ftr2B	0.3	
Vrc2B	0.60	
Trc2B	0.05	

Parámetros del motor C

Parameter	Default	Reason
LfmC	0.75	Load MVA = MW/MVA Rating
RsC	0.03	These are 'generic' motor parameters for this type of load, based on laboratory testing.
LsC	1.8	
LpC	0.19	
LppC	0.14	
TpoC	0.2	
TppoC	0.0026	
HC	0.1	Low inertia commercial/industrial fan motor loads
etrqC	2*	$T_{mech} = T_{mech,0} * \omega^{E_{trq}}$ - Torque ∝ Speed-Squared

Vtr1C	0.58	Assumed motor protection is same as for Motor B (only contactors) – slightly offset to represent motor load diversity.
		• Level 1
		  • Trip at 0.58 pu voltage, trip time < 2 cycles
		  • 20% fraction of motor trips
		  • Contactors reclose at 0.68 pu in 50 ms
		• Level 2
		  • Trip at 0.53 pu voltage, trip time < 2 cycles
		  • 30% fraction of motors trip
		  • Contactors reclose at 0.62 pu in 50 ms

Ttr1C	0.03	
Ftr1C	0.2	
Vrc1C	0.68	
Trc1C	0.05	
Vtr2C	0.53	
Ttr2C	0.03	
Ftr2C	0.3	
Vrc2C	0.62	
Trc2C	0.05	

Parámetros del motor D

Parameter	Default	Reason
LfmD	1.0	Load MVA = MW/MVA Rating
CompPF	0.98	Assumed slightly inductive motors load
Vstall	0.45-0.60	Stall voltage (range) based on laboratory testing
Rstall	0.1	Based on laboratory testing results of residential air-conditioners
Xstall	0.1	
Tstall	0.033	Stall time (range) based on laboratory testing
Frst	0.2	Captures diversity in load; also based on testing (fraction of motors capable of restart).
Vrst	0.95	Reconnect when acceptable voltage met
Trst	0.3	Induction motor restart time is relatively short
fuvr	0.1	Assumed fraction of A/C units with undervoltage relaying is relatively low.
vtr1	0.6	Undervoltage relay settings (set higher than stall characteristic; therefore, small percentage of motors equipped with U/V protection will not stall).
ttr1	0.02	
vtr2	0.1	No second level undervoltage tripping specified.
ttr2	9999	
Vc1off	0.6	Assume (based on lab testing) that contactors will start dropping out at this point.
Vc2off	0.4	Assume (based on lab testing) that all contactors dropped out at this point.
Vc1on	0.65	Assume all contactors have reclosed at this point.
Vc2on	0.5	Assume contactors will start reclosing at this point.
Tth	15	Varies based on manufacturer and external factors – sensitivity analysis required
Th1t	0.7	Assumed tripping starting at 70% temperature, with all tripped at 190% temperature
Th2t	1.9	
tv	0.025	Assumed generic transducer time lag

Parameter	Default	Reason
LFadj	1	Load factor adjustment to the stall voltage10
Kp1	0	Real power constant for running state 111
Np1	1	Real power exponent for running state 1
Kq1	6	Reactive power constant for running state 1
Nq1	2	Reactive power exponent for running state 1
Kp2	12	Real power constant for running state 2
Np2	3.2	Real power exponent for running state 2
Kq2	11	Reactive power constant for running state 2
Nq2	2.5	Reactive power exponent for running state 2
Vbrk	0.86	Compressor motor "breakdown" voltage (pu)
CmpKpf	1	Real power constant for frequency dependency
CmpKqf	-3.3	Reactive power constant for frequency dependency

Parámetros de la carga estática

Parameter	Default	Reason
Pfs	-0.99 to 1.0	Generally near unity power factor (lighting); rather than specify shunt compensation, assume slight capacitive power factor for static load to account for shunt compensation at substation and down the feeder
P1e	2.0	$P=P_0*(P_{1c}*V/V_0^{P1e}+P_{2c}*V/V_0^{P2e}+P_3)*(1+P_{frq}*D_f)$ Polynomial fit for static load based on utility experience, measurement data, or laboratory testing; values provided are good assumption.
P1c	0.3	
P2e	1.0	
P2c	0.7	
Pfreq	0.0	Assume real power not frequency dependent
Q1e	2.0	Q=Q0*(Q1c*V/V0Q1e + Q2c*V/V0Q2e + Q3) * (1 + Qfrq * Df) Polynomial fit for static load based on utility experience, measurement data, or laboratory testing; values provided are good assumption.
Q1c	-0.5	
Q2e	1.0	
Q2c	1.5	
Qfreq	-1.0	Assume Q inversely frequency dependent